

اثرات اقتصادی رقیق‌شدگی پیش‌بینی نشده در کارگاه‌های استخراج زیرزمینی، مطالعه موردی مجموعه معادن منگنز و نارچ

مجید محسنی^۱، محمد عطایی^{۲*}، رضا کاکایی^۳

^۱ دانشجوی دکتری استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، m.mohsenil@shahroodut.ac.ir
^۲ استاد دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، ataei@shahroodut.ac.ir
^۳ استاد دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، R_kakaie@shahroodut.ac.ir

(دریافت: ۱۲-۱۱-۱۳۹۶، پذیرش: ۲۸-۰۳-۱۳۹۷)

چکیده

در کارگاه‌های استخراج زیرزمینی به دلیل اضافه‌شکست و ریزش دیواره‌ها و سقف و مخلوط شدن باطله با ماده معدنی پدیده رقیق‌شدگی پیش‌بینی نشده رخ می‌دهد. این پدیده از یک طرف سبب کاهش عیار ماده معدنی و به دنبال آن صرف هزینه برای جبران نقصان عیار و از طرف دیگر موجب صرف هزینه برای استخراج باطله می‌شود. از این رو اندازه‌گیری میزان اضافه‌شکست و ریزش برای تعیین رقیق‌شدگی و به دنبال آن بررسی اثر اقتصادی ناشی از آن در کارگاه‌های استخراج زیرزمینی اهمیت زیادی دارد. لازمه این اندازه‌گیری، رصد کردن فضای حفاری است زیرا تنها با معلوم بودن عیار محصول خروجی معدن که مخلوطی از تولید کارگاه‌های مختلف با تناژها، عیارها و رقیق‌شدگی‌های گوناگون است نمی‌توان وضعیت رقیق‌شدگی‌های رخ داده در کارگاه‌ها را به تفکیک کارگاه مشخص و از آنجا پیامدهای حاصل از اضافه‌شکست را مطالعه کرد. از این رو در این مقاله با استفاده از سیستم مانیتورینگ فضای حفاری، به بررسی تاثیر اضافه‌شکست و ریزش کارگاه‌ها در کاهش عیار و ایجاد رقیق‌شدگی و از آنجا افزایش هزینه استخراج کانسنگ و به دنبال آن کاهش سود حاصل از فروش محصول پرداخته شد. به این منظور با تعریف معادل خطی اضافه‌شکست و ریزش برای رقیق‌شدگی، سیستم یاد شده بر روی تعداد ۲۴ کارگاه استخراج، از مجموعه معادن منگنز و نارچ به اجرا در آمد و منجر به کشف روابط حاکم بین پارامترهای اضافه‌شکست و رقیق‌شدگی و پارامترهای اقتصادی از جمله رابطه پیش‌بینی افت سود ناشی از اضافه‌شکست شد. نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد، اضافه‌شکست حد سربه‌سری در مقدار ۲/۱۸ متر که رقیق‌شدگی ۶۷/۳۸ درصد را به همراه دارد اتفاق افتاده است و در این حالت میانگین عیار ماده معدنی استخراجی نسبت به عیار برجا با ۱۶ واحد افت همراه بوده است و اضافه‌شکست و ریزش بیشتر از آن زیان‌دهی معدنکاری را در پی خواهد داشت.

کلمات کلیدی

کارگاه استخراج زیرزمینی، مانیتورینگ فضای حفاری، رقیق‌شدگی پیش‌بینی نشده، اثرات اقتصادی

۱- مقدمه

ظرفیت و افزایش استهلاک و در نهایت کاهش عمر مفید سیستم‌های حمل و نقل از جمله نوار نقاله اشاره کرد، همچنین رفع انسداد نقاط تخلیه که از طریق باطله‌ها مسدود می‌شوند و نیز کنترل گرد و غبار اضافه از منابع ایجاد هزینه‌های غیرمستقیم در مرحله حمل و نقل است.

در مرحله سنگ‌شکنی اولیه که در داخل معدن اتفاق می‌افتد، رقیق‌شدگی سبب افزایش هزینه‌های سنگ‌شکنی می‌شود این هزینه‌ها شامل افزایش توان مصرفی برای دستگاه‌ها و افزایش استهلاک و کاهش ظرفیت سنگ‌شکن‌ها است. همچنین هزینه انباشت باطله‌ها در داخل معدن و هزینه اثرات زیست محیطی ناشی از این انباشت موارد دیگر هزینه‌های این مرحله است.

در مرحله فرآوری مواد معدنی، هزینه‌های ناشی از رقیق‌شدگی، اهمیت بیشتری دارد، به ویژه در مواردیکه خواص ماده معدنی با باطله از نظر فرآوری بسیار نزدیک به هم باشد. در این مرحله که مواد باطله استخراج‌شده همراه ماده معدنی وارد کارخانه فرآوری می‌شوند، منجر به افزایش هزینه‌های خردایش ثانویه، حملونقل، نرم‌کردن، سرنده‌کردن، پرعیارسازی، آبگیری، انباشت باطله و سایر موارد می‌شود. همه این موارد موجب کاهش ظرفیت تولید، کاهش بازیابی، کاهش کیفیت و در نتیجه کاهش قیمت فروش محصول نهایی می‌شوند. همچنین هزینه‌های زیست‌محیطی انباشت باطله با ملاحظات مربوط به آب و هوا و زمین و نیز جنبه‌های کنترل و مانیتورینگ مربوط به آن از نمونه هزینه‌های مربوط به این مرحله است. رقیق‌شدگی در مرحله پایانی مراحل معدنکاری نیز اثر خود را در تحمیل هزینه‌ها نشان می‌دهد. هزینه‌های اضافی مربوط به خشک کردن و حمل و نقل به مقصد و همچنین پرداخت جریمه به مشتری از جمله این هزینه‌ها است.

کاهش اندکی در میزان رقیق‌شدگی و به دنبال آن کاهش خسارت در ماشین‌آلات سبب افزایش زیادی در سودآوری معدنکاری می‌شود.

به طور کلی هزینه‌های رقیق‌شدگی را می‌توان به دو دسته هزینه‌های مستقیم و هزینه‌های غیرمستقیم تقسیم کرد. هزینه‌های مستقیم مربوط به اداره و رسیدگی فیزیکی ماده معدنی می‌شود، در حالی که هزینه‌های غیرمستقیم مربوط به اثرات ناشی از ناپایداری کارگاه است. هزینه‌های مستقیم شامل بارگیری، باربری، خردایش، بالابری و نرم‌کنی مواد باطله و مواد اضافه برای پرکردن است. هزینه‌های غیرمستقیم شامل تاخیر سیکل کارگاه، خسارت و ضرر به ماشین‌آلات، مسدود شدن

هدف از معدنکاری، استخراج اقتصادی ماده معدنی با رعایت ایمنی برای نیروی کار و ماشین‌آلات است و برای نیل به این هدف، روش‌های گوناگون معدنکاری با توجه به شرایط شکل، اندازه، عمق، جهت و مواد باطله دربرگیرنده ماده معدنی توسعه یافته و به کار گرفته شده‌اند اما پدیده رقیق‌شدگی که عبارت از مخلوط شدن باطله با ماده معدنی است تاثیر بسزایی را بر هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم معدنکاری می‌گذارد. رقیق‌شدگی تاثیر بسیار زیادی بر قیمت تمام شده یک کارگاه و در نهایت بر سودآوری حاصل از عملیات معدنکاری دارد زیرا

موجب افزایش هزینه‌های یک کارگاه می‌شود، تمامی هزینه‌های ناشی از استخراج، حمل و نقل، خردایش، جابه‌جایی، نرم کردن و نیز عملیات بر روی مواد باطله بی‌ارزش یا سنگ‌های کم عیار که ارزش کمی دارند، تحت تاثیر رقیق‌شدگی قرار می‌گیرند. همچنین صرف وقت اضافه بابت کندن و پر کردن کارگاه‌های بزرگی که از برداشتن مواد باطله ایجاد می‌شوند سبب بروز تاخیرهای غیر برنامه‌ریزی و ایجاد هزینه‌های نوسازی می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که رقیق‌شدگی، عامل تعطیل شدن تعداد زیادی از معادن زیرزمینی بوده است. به عنوان نمونه می‌توان به معدن طلای مونت‌تود^۱ اشاره کرد [۱].

اثرات اقتصادی رقیق‌شدگی در مراحل مختلف معدنکاری وجود دارد و در ابتدا از کارگاه استخراج شروع می‌شود. در کارگاه، با استخراج ناخواسته مواد باطله، ماشین‌آلات معدنکاری مدت زمان بیشتری را صرف جابه‌جایی مواد استخراجی می‌کنند. این زمان اضافه که مربوط به مواد باطله است موجب افزایش زمان سیکل ماشین‌آلات می‌شود. افزایش زمان سیکل، منجر به افزایش دفعات تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات و تجهیزات می‌شود. این موضوع همچنین سبب افزایش گرد و غبار اضافی در کارگاه می‌شود و قابلیت دید کارکنان را کاهش می‌دهد که ممکن است در کاهش کیفیت محصول تولیدی موثر باشد.

در مرحله بعد از کارگاه استخراج، یعنی مرحله حمل و نقل، رقیق‌شدگی موجب هزینه‌های اضافه در حمل به ویژه در فواصل زیاد می‌شود. این هزینه‌ها به صورت مستقیم و غیرمستقیم در حمل و نقل موثرند. افزایش میزان انرژی لازم برای حمل مواد توام با باطله به صورت مستقیم در افزایش هزینه دخالت دارد اما از انواع غیرمستقیم آن می‌توان به کاهش

¹Mount Todd mine

$$D = \frac{W}{W + O} \times 100 \quad (2)$$

که در آن:

D مقدار رقیق‌شدگی بر حسب (درصد)
 W میزان باطله استخراج‌شده (تن)
 O مقدار ماده معدنی استخراج‌شده (تن)

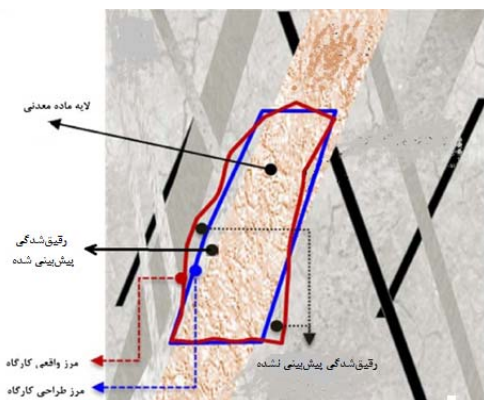
همچنین برای تعیین رقیق‌شدگی، می‌توان اندازه‌گیری مستقیم عیار ماده معدنی استخراجی و برجا را انجام داد. بر این اساس مقدار رقیق‌شدگی از رابطه ۳ که برای تمام روش‌های استخراج زیرزمینی کاربرد دارد به دست می‌آید [۵].

در این روش، مقدار رقیق‌شدگی برابر است با:

$$D = \frac{C_p - C_a}{C_p - C_r} \times 100 \quad (3)$$

که در آن:

D میزان رقیق‌شدگی (درصد)
 C_p عیار فلز با ارزش در مواد معدنی برجا (درصد)
 C_a عیار فلز با ارزش در داخل مواد استخراجی (درصد)
 C_r عیار فلز با ارزش در سنگ‌های جانبی (درصد)



شکل ۱- محدوده‌های رقیق‌شدگی پیش‌بینی شده و پیش‌بینی نشده.

کلارک و پاکالنیس [۶]. برای تعریف رقیق‌شدگی، مفهوم معادل خطی اضافه شکست یا ریزش (ELOS) را ارایه کردند. مقدار ELOS بر حسب متر است و مطابق با رابطه ۴ از تقسیم حجم ریزش یا اضافه شکست بر مساحت دیواره کارگاه حاصل می‌شود.

$$ELOS (m) = \frac{V_a - V_d}{S_d} \quad (4)$$

⁶Equivalent linear overbreak/ slough

نقاط تخلیه، کاهش عیار در فرآوری، افزایش باطله‌ها، ایجاد ملزومات نوسازی، عدم دسترسی، معدنکاری اضافی، کاهش بهره‌وری معدن، افزایش ریسک در باربری و پرکردن است [۲].

در این مقاله، اثر رقیق‌شدگی پیش‌بینی نشده بر سود حاصل از فروش کانسنگ استخراجی مجموعه معادن منگنز و نارچ که در آن کارگاه‌های استخراج به دلیل ضعف موجود در کمربالا و کمرپایین لایه استخراجی، رقیق‌شدگی نسبتاً بالایی را تحمل می‌کنند، مورد بررسی قرار گرفته است. برای بالا بردن دقت در تعیین رقیق‌شدگی، با استفاده از یک روش نوین، حجم واقعی کارگاه‌های استخراجی، به تفکیک اندازه‌گیری شده و با حجم اولیه طراحی مورد مقایسه قرار گرفته است و از آنجا مقادیر رقیق‌شدگی، از دو روش معادل خطی ریزش و درصد رقیق‌شدگی محاسبه شده است و در ادامه روابط پیش‌بینی افت سود بر اساس رقیق‌شدگی ارایه و از آنجا مقدار رقیق‌شدگی بحرانی تعیین شده است.

۲- تعاریف رقیق‌شدگی

مخلوط شدن ماده معدنی با باطله‌ها یا مواد با عیار کمتر از عیار حد، رقیق‌شدگی^۱ نامیده می‌شود. در روش‌های استخراج زیرزمینی رقیق‌شدگی در اثر ریزش سقف و دیوارها، برش سقف و کف، بارگیری مواد خاک‌ریز و مواد تخریب ایجاد می‌شود. در یک تقسیم‌بندی کلی رقیق‌شدگی به دو دسته پیش‌بینی شده یا طراحی شده^۲ (داخلی^۳) و پیش‌بینی نشده یا غیرطراحی^۴ (خارجی^۵) تقسیم می‌شود. رقیق‌شدگی پیش‌بینی شده مربوط به حالتی است که با توجه به مشخصات کانسار و برای طراحی کارگاه مقداری از سنگ‌های کمربالا و کمرپایین گرفته می‌شود و رقیق‌شدگی پیش‌بینی نشده در خارج از محدوده طراحی کارگاه قرار دارد و حاصل خردایش بیش از حد کمربالا به دلیل شکستگی‌های ناخواسته است.

مجموع رقیق‌شدگی‌های پیش‌بینی شده و پیش‌بینی نشده، رقیق‌شدگی کلی را تشکیل می‌دهند [۳]. محدوده‌های رقیق‌شدگی پیش‌بینی شده و رقیق‌شدگی پیش‌بینی نشده در شکل ۱ نشان داده شده است.

$$D = \frac{W}{O} \times 100 \quad (1)$$

¹Dilution

²Planned dilution

³Internal dilution

⁴Unplanned dilution

⁵External dilution

که در آن:

V_a حجم واقعی کارگاه (مترمکعب)

V_d حجم طراحی کارگاه (مترمکعب)

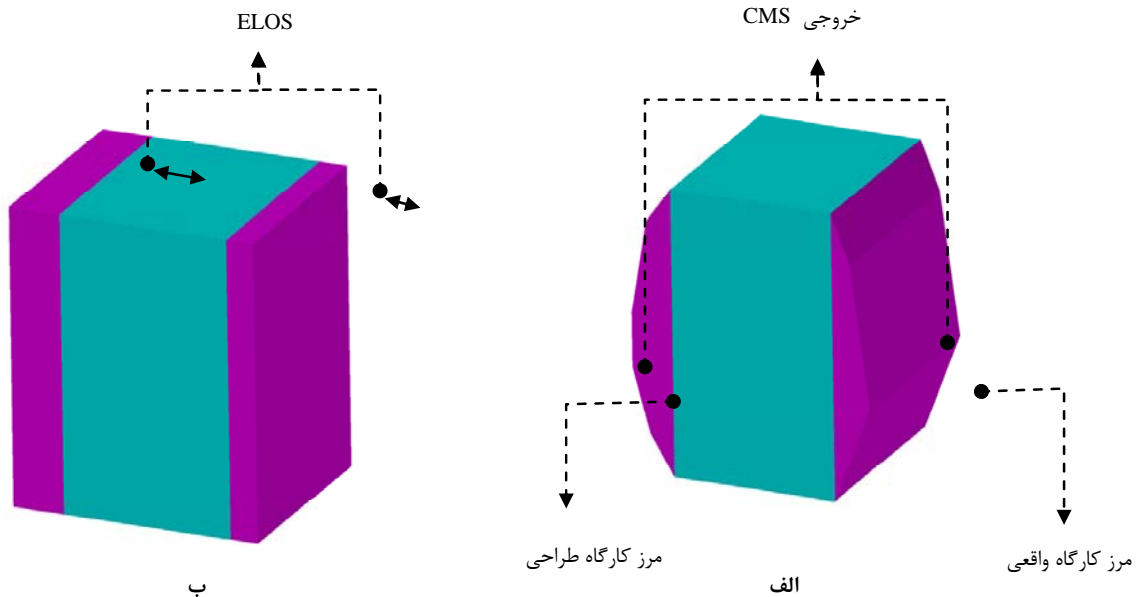
S_d سطح طراحی کارگاه (مترمربع)

در این روش، ملاک رقیق‌شدگی، مقدار ریزش و اضافه شکست دیواره‌ها است و این موضوع مستقل از عرض کارگاه است. بنابراین دو کارگاه با مقدار ریزش برابر و عرض متفاوت، مقدار ELOS برابر اما درصد رقیق‌شدگی متفاوت دارند زیرا کارگاه با عرض کمتر دارای درصد رقیق‌شدگی بیشتری است. به عنوان مثال گزارش درصد رقیق‌شدگی در دو کارگاه باز با عرض‌های ۱۰ و ۵ متر به ترتیب برابر با ۲۲ و ۳۲ درصد بوده در حالی که مقدار ELOS گزارش شده برای این دو کارگاه برابر با ۱/۹ متر بوده است [۷]. مزیت اصلی تعیین رقیق‌شدگی به روش ELOS، استفاده از سیستم مانیتورینگ فضای حفاری (CMS)^۱ برای محاسبه دقیق حجم واقعی کارگاه و سطوح استخراجی است. داده‌های حاصل از این سیستم به محققان کمک می‌کند تا علت تفاوت مقادیر مختلف رقیق‌شدگی‌های ایجاد شده در کارگاه‌ها را با توجه به شرایط مختلف هندسه کارگاه، مشخصات زمین‌شناسی، حفاری، آتشیاری و عملیاتی بررسی کنند. از این رو آنالیز برگشتی حاصل از داده‌های CMS کمک شایانی در پیش‌بینی رقیق‌شدگی، برای طراحی کارگاه‌های استخراج زیرزمینی ارائه می‌دهد. مزیت دیگر تعیین رقیق‌شدگی به روش ELOS آن است که با استفاده از آن می‌توان دریافت که منشا رقیق‌شدگی مربوط به کدام یک از دیواره‌های کارگاه است. این موضوع در برنامه‌ریزی تولید و نگهداری کارگاه موثر است. در شکل ۲ مفهوم ELOS به صورت شماتیک نشان داده شده است. در شکل ۲-الف، محدوده کارگاه طراحی و نیز محدوده کارگاه واقعی که نشان‌دهنده حجم ریزش است و از طریق CMS مشخص می‌شود، نشان داده شده است. مقدار ELOS کارگاه از تقسیم مقدار حجم کل ریزش بر مجموع مساحت دیواره‌های کارگاه حاصل می‌شود. چنانچه تعیین مقدار ELOS هر کدام از دیواره‌های کارگاه به تفکیک مد نظر باشد، می‌توان مطابق با شکل ۲-ب، حجم ریزش هر دیواره را بر مساحت آن دیواره تقسیم کرد. بدیهی است مقدار ELOS کل کارگاه برابر با مجموع مقادیر ELOS دیواره‌های کمربالا و کمرپایین است.

برای اندازه‌گیری مقدار ELOS باید از روش CMS استفاده کرد. این روش نخستین بار توسط میلر و همکاران [۸] در سال ۱۹۹۲ استفاده شد. سیستم اولیه‌ای که استفاده شد متشکل از یک فاصله‌یاب لیزری بود که در انتهای یک بوم نصب شده بود و قابلیت رساندن دستگاه به داخل فضای حفاری تا ۵ متر را داشت. با این روش سطح و حجم فضای حفاری شده محاسبه و اختلاف بین حجم طراحی و حجم واقعی و در نتیجه مقدار اضافه شکست، ELOS به دست آمد. تاکنون مطالعات زیادی بر روی موضوع رقیق‌شدگی در معادن زیرزمینی با استفاده از این روش انجام شده است [۹-۱۸].

در این مقاله برای تعیین رقیق‌شدگی از مفهوم ELOS استفاده شده است از آنجا که برای اندازه‌گیری مقدار ELOS باید از روش CMS استفاده شود و از آنجا که در CMS باید حجم واقعی کارگاه محاسبه شود برای محاسبه حجم کارگاه، نیمرخ مقاطع عرضی کارگاه در فواصل مساوی برداشت و به هم اتصال داده شده‌اند. برای برداشت نیمرخ‌ها از فاصله‌یاب لیزری مدل Leica-D810، استفاده شده است. برای برداشت هر مقطع، ابتدا فاصله‌یاب بر روی یک سه‌پایه مطابق با شکل ۳-الف که در مرکز ضلع پایینی مقطع و در کف کارگاه قرار گرفته، نصب شده است سپس فاصله نقطه یاد شده تا دیواره‌ها و سقف کارگاه تحت زاویه‌های مختلف (هر ۱۰ درجه یک بار) قرائت شده و با انتقال این نقاط به نرم‌افزار AutoCAD یک مقطع عرضی کارگاه مطابق با شکل ۳-ب ترسیم شد، سپس با انتقال سه پایه به مراکز ضلع پایینی مقاطع بعدی و تکرار روش یاد شده، مقاطع عرضی لازم از کارگاه برداشت شده است. در ادامه با اتصال مقاطع، ترسیم فضای سه بعدی کارگاه انجام و از آن جا مطابق با شکل‌های ۳-پ و ۳-ت سطح و حجم واقعی برای هر کارگاه محاسبه شده است. در شکل ۳-ث، تصویر دو کارگاه طراحی و واقعی نشان داده شده است. همچنین در شکل ۳-ج، تصویر میزان اضافه شکست و ریزش کارگاه نشان داده شده است. به این ترتیب در هر کارگاه با مشخص بودن حجم طراحی و حجم واقعی، مقدار ELOS، محاسبه شده است.

^۱Cavity monitoring system



شکل ۲- تعریف شماتیک ELOS، الف) محدوده کارگاه طراحی و ب) مقدار ELOS برای کمر بالا و کمر پایین کارگاه.

۳- ارزیابی هزینه‌های رقیق‌شدگی در مجموعه معادن منگنز و نارچ (متدولوژی، ساخت و اجرای مدل)

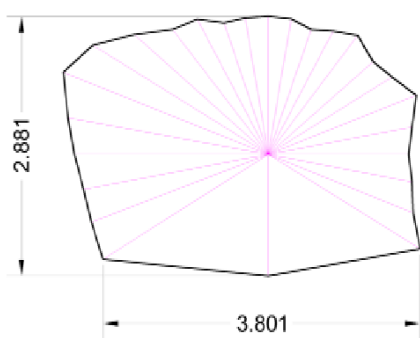
جهان به عنوان کمک ذوب بیشترین کاربرد را دارد و به این منظور به صورت خام و فرآوری نشده به فروش می‌رسد.

هزینه‌های سالانه عملیات معدنکاری در مجموعه معادن منگنز و نارچ، به تفکیک عملیات مورد بررسی قرار گرفتند. این عملیات شامل حفاری، آتشیاری، باربری زیرزمینی، بالابری، باربری سطحی، خردایش اولیه، خاک‌برداری، پرکردن و پرسنلی است. با توجه به مقادیر هزینه‌های عملیات یاد شده و مقدار تناژ تولید سالانه، هزینه هر عملیات برای تولید یک تن سنگ منگنز مشخص و از آنجا هزینه کل و نیز سهم هر کدام از عملیات‌های یاد شده برای تولید یک تن سنگ منگنز مشخص شده است. نمودار آورده شده در شکل ۴ سهم هر یک از این عملیات را نشان می‌دهد [۲۰].

همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، هزینه بالابری و هزینه آتشیاری به ترتیب با ۶ و ۱۶ درصد دارای کمترین و بیشترین سهم در قیمت تمام شده‌اند. محاسبات نشان می‌دهد هزینه لازم برای تولید یک تن سنگ منگنز در سال ۲۰۱۶ برابر با ۱,۴۴۰,۰۰۰ ریال، معادل ۴۸ دلار (با فرض میانگین قیمت هر دلار برابر با ۳۰,۰۰۰ ریال) بوده است [۲۰]. بدیهی است که ایجاد هر مقدار درصد رقیق‌شدگی در معدن، سبب افزایش هر یک از هزینه‌های یاد شده و در مجموع کل هزینه‌ها می‌شود. برای مطالعه وضعیت رقیق‌شدگی مجموعه معادن منگنز و نارچ، ۲۴ کارگاه از مجموعه معادن منگنز و نارچ مورد بررسی قرار گرفتند.

معادن منگنز و نارچ در ۲۷ کیلومتری جنوب‌غربی قم و ۲ کیلومتری روستای و نارچ و در طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۴۵ دقیقه و ۴۲ ثانیه و در عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۵ دقیقه و ۳ ثانیه قرار گرفته‌اند. این معادن در حال حاضر با ذخیره‌ای بالغ بر ۸/۶ میلیون تن بزرگترین معادن منگنز ایران و خاورمیانه و با تولید حدود ۱۰۰ تا ۱۱۰ هزار تن سنگ منگنز در سال بزرگ‌ترین تولیدکننده سنگ منگنز در ایران‌اند. وسعت کانسار در حدود ۴۰ کیلومتر مربع و طول زون ماده معدنی حدود ۱۲ کیلومتر است. کانسار تا عمق حدود ۴۰۰ متری شناسایی شده است. میانگین عیار ماده معدنی حدود ۲۰ درصد و ضخامت قابل استخراج آن بین ۰/۵ تا ۵ متر و گاهی بیشتر است. شیب لایه‌های منگنزدار بین ۶۵ تا ۹۰ درجه و سنگ‌های دربرگیرنده کانسار از توفها و گدازه‌های آندزیتی و پورفیری تشکیل شده است. کانسار بر اثر پدیده‌های زمین‌شناسی به بخش‌های متعددی تقسیم شده و استخراج از هر بخش به صورت معادن جداگانه انجام می‌شود. استخراج در تمام معادن به روش کندن و پرکردن انجام می‌گیرد [۱۹].

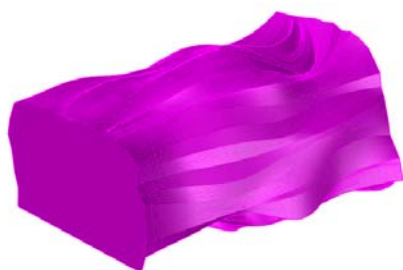
محصول تولیدی معدن با عیار متوسط ۲۰ درصد پس از خردایش اولیه به صورت خام و با عیار متوسط ۲۰ درصد، در سر معدن به شرکت فولاد فروخته می‌شود. سنگ منگنز در



ب



الف



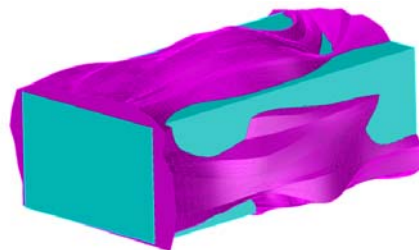
ت



پ



ج



ث

شکل ۳- مراحل محاسبه حجم واقعی کارگاه و اضافه شکست و تعیین مقدار ELOS.

الف) سیستم فاصله‌یاب لیزری به همراه سه پایه. ب) روش برداشت مقاطع عرضی کارگاه. پ) سطح دیواره کارگاه واقعی. ت) حجم کارگاه واقعی. ث) کارگاه واقعی و کارگاه طراحی. ج) مقدار اضافه شکست.

وزن مخصوص ۳۱۷۲ و کارگاه شماره ۲۰ با وزن مخصوص ۳۱۰۵ تن بر مترمکعب است. بیشترین و کمترین وزن مخصوص باطله به ترتیب متعلق به کارگاه‌های شماره ۱۵ و ۱۶ با وزن مخصوص ۳۱۲ و کارگاه‌های شماره ۱۹ و ۲۰ با وزن مخصوص ۲۱۲۰ تن بر مترمکعب است.

در جدول ۱ مشخصات کارگاه‌های یاد شده شامل عیار برجا، وزن مخصوص ماده معدنی و نیز وزن مخصوص باطله آورده شده است. بیشترین و کمترین عیار برجا به ترتیب مربوط به کارگاه شماره ۲۳، با عیار ۳۳/۰۲ درصد و کارگاه شماره ۲۰ با عیار ۱۸/۴۲ درصد منگنز است. همچنین بیشترین و کمترین وزن مخصوص کانسنگ به ترتیب مربوط به کارگاه شماره ۲۳ با



شکل ۴- سهم عملیات معدنکاری در قیمت تمام شده تولید یک تن ماده معدنی [۲۰].

جدول ۱- مشخصات کارگاه‌های استخراج مجموعه معادن منگنز و نارچ که در آن‌ها روش CMS به اجرا در آمده است [۱۹].

شماره کارگاه	عیار منگنز (درصد)	وزن مخصوص برجای ماده معدنی (تن / مترمکعب)	وزن مخصوص باطله (تن / مترمکعب)
۱	۲۲٫۲۲	۳٫۱۰	۲٫۳۰
۲	۲۱٫۳۵	۳٫۰۸	۲٫۳۵
۳	۲۲	۳٫۱۰	۲٫۳۵
۴	۲۴	۳٫۴۲	۲٫۳۵
۵	۲۶	۳٫۶۰	۲٫۳۰
۶	۲۵٫۲۲	۳٫۵۵	۲٫۳۰
۷	۲۳٫۴۸	۳٫۳۷	۲٫۶۰
۸	۲۲٫۵۳	۳٫۳۰	۲٫۶۵
۹	۲۴٫۷۵	۳٫۴۵	۲٫۶۰
۱۰	۲۲٫۳۶	۳٫۲۷	۲٫۷۵
۱۱	۲۵٫۶۴	۳٫۵۷	۲٫۶۵
۱۲	۲۳٫۸۱	۳٫۳۵	۲٫۶۰
۱۳	۲۴٫۲۲	۳٫۴۸	۳٫۱۰
۱۴	۲۱٫۴۵	۳٫۱۵	۳٫۱۰
۱۵	۲۳٫۳۶	۳٫۵۷	۳٫۲۰
۱۶	۲۲٫۵۱	۳٫۱۵	۳٫۲۰
۱۷	۲۴٫۴۱	۳٫۴۴	۳٫۱۰
۱۸	۲۲٫۶۸	۳٫۱۷	۳٫۱۰
۱۹	۲۴	۳٫۴۰	۲٫۲۰
۲۰	۱۸٫۴۲	۳٫۰۵	۲٫۲۰
۲۱	۲۲٫۲۹	۳٫۱۵	۲٫۵۰
۲۲	۲۰٫۸	۳٫۱۰	۲٫۴۰
۲۳	۳۳٫۰۲	۳٫۷۲	۲٫۴۰
۲۴	۳۲٫۳	۳٫۶۸	۲٫۶۴

در ادامه با توجه به جدول ۱ و مشخص بودن مقدار عیار برجای ماده معدنی، عیار ماده معدنی استخراج شده با استفاده از رابطه ۵ مشخص و از آنجا مقدار افت عیار برای هر کارگاه محاسبه شده است.

$$\bar{g} = \frac{g_o \cdot W_o}{W_o + W_w} \quad (5)$$

که در آن:

g_o عیار برجای ماده معدنی

W_o وزن ماده معدنی استخراجی

W_w وزن باطله استخراجی

به عنوان مثال مقدار افت عیار کارگاه شماره ۲۰ عبارت است از:

$$DG = 18.42 - \frac{18.42 \times 4361.5}{4909.3} = 2.06$$

نتایج این محاسبات به صورت خلاصه در جدول ۳ آورده شده است. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، بیشترین کمترین مقدار رقیق‌شدگی به ترتیب مربوط به کارگاه شماره ۱۴ با ۱۸٫۸۷ و کارگاه شماره ۲ با ۶٫۰۱ درصد و بیشترین کمترین مقدار افت عیار به ترتیب مربوط به کارگاه شماره ۲۴ با ۴٫۵۷ واحد و کارگاه شماره ۲ با ۱٫۲۸ واحد است. در شکل ۶ نمودار ستونی مربوط به افت عیار کارگاه‌ها نشان داده شده است.

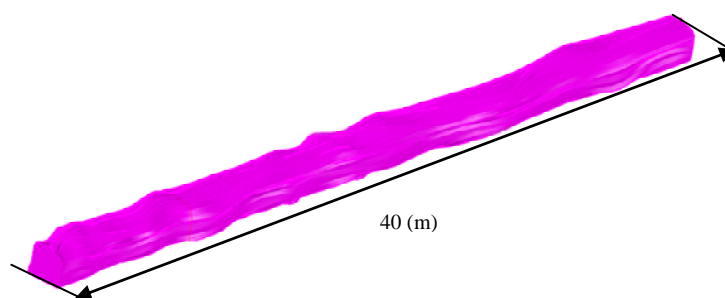
در ادامه سیستم مانیتورینگ فضای حفاری، CMS برای ۲۴ کارگاه به اجرا در آمد. برای نمونه خروجی CMS کارگاه شماره ۳ که بخشی از آن در شکل ۳ آورده شده است، به طور کامل در شکل ۵، نشان داده شده است. مقدار ELOS کارگاه یاد شده با استفاده از رابطه ۴ عبارت است از:

$$ELOS = \frac{947.92(m^3) - 840(m^3)}{568(m^2)} = 0.19(m)$$

مقادیر ELOS سایر کارگاه‌ها نیز به طریق مشابه محاسبه و نتایج آن در جدول ۲ گنجانده شده است. در این جدول، حجم کارگاه واقعی و حجم و سطح دیواره‌های کارگاه طراحی و همچنین مقدار ELOS آورده شده است. مقدار ELOS از تقسیم مقدار اختلاف حجم واقعی و طراحی بر مقدار سطح دیواره‌های کارگاه طراحی به دست آمده است. همان‌طور که در جدول یاد شده مشاهده می‌شود، بیشترین و کمترین مقدار ELOS به ترتیب متعلق به کارگاه شماره ۱۴ با ۰٫۴۸ و کارگاه شماره ۲ با ۰٫۱۳ متر است.

در ادامه با توجه به جدول ۱ و معلوم بودن مقادیر وزن مخصوص ماده معدنی و باطله استخراج شده هر کارگاه و با توجه به جدول ۲ و معلوم بودن مقادیر حجم کارگاه طراحی و کارگاه واقعی، وزن ماده معدنی و باطله استخراجی هر کارگاه معین و از آنجا با استفاده از رابطه ۲ مقدار رقیق‌شدگی بر حسب درصد محاسبه شده است. به عنوان مثال مقدار رقیق‌شدگی کارگاه شماره ۲۰ عبارت است از:

$$D = \frac{2.2 \times 249}{(2.2 \times 249) + (3.05 \times 1430)} \times 100 = 11.16$$



شکل ۵- خروجی CMS کارگاه شماره ۳.

جدول ۲- نتایج حاصل از اجرای روش CMS در ۲۴ کارگاه استخراج مجموعه معادن منگنز و نارچ.

شماره کارگاه	حجم کارگاه طراحی	مساحت دیواره‌های کارگاه طراحی (مترمکعب)	حجم کارگاه واقعی (مترمکعب)	اختلاف دو حجم (مترمکعب)	ELOS (متر)
۱	۹۲۵	۶۸۵	۱۰۲۰٫۹۰	۹۵٫۹۰	۰٫۱۴
۲	۱۰۱۲٫۵۰	۶۵۲٫۵۰	۱۰۹۷٫۳۰	۸۴٫۸۰	۰٫۱۳
۳	۴۰۸	۳۴۲	۴۶۶٫۱۴	۵۸٫۱۴	۰٫۱۷
۴	۸۴۰	۵۶۸	۹۴۷٫۹۲	۱۰۷٫۹۲	۰٫۱۹
۵	۲۵۲	۲۶۴	۳۱۲٫۷۲	۶۰٫۷۲	۰٫۲۳
۶	۲۶۶۶	۱۳۱۱	۲۹۹۴	۳۲۸	۰٫۲۵
۷	۱۳۵۸	۸۰۲٫۵۰	۱۵۱۸٫۵۰	۱۶۰٫۵۰	۰٫۲۰
۸	۸۰۴٫۲۰	۶۰۱٫۲۰	۱۰۰۲٫۶۰	۱۹۸٫۴۰	۰٫۳۳
۹	۶۸۱٫۶۰	۵۲۶	۸۷۶٫۲۲	۱۹۴٫۶۲	۰٫۳۷
۱۰	۱۳۸۶	۷۳۸	۱۶۶۶٫۴۴	۲۸۰٫۴۴	۰٫۳۸
۱۱	۱۱۸۸	۷۵۹	۱۴۲۱	۲۳۳	۰٫۳۱
۱۲	۱۱۴۰	۷۵۶	۱۴۳۹	۱۹۹	۰٫۴۰
۱۳	۹۹۰	۶۸۷٫۵۰	۱۲۴۵	۲۵۵	۰٫۳۷
۱۴	۱۱۶۶٫۱۰	۸۵۱٫۵۰	۱۵۳۷	۴۰۶٫۹۰	۰٫۴۸
۱۵	۱۶۵۰	۹۳۰	۱۹۲۰	۲۷۰	۰٫۲۹
۱۶	۱۰۵۳	۶۳۹	۱۲۵۹	۲۰۶	۰٫۳۲
۱۷	۷۸۹٫۶۰	۵۶۱٫۶۰	۹۸۳	۱۹۳٫۴۰	۰٫۳۴
۱۸	۷۹۴٫۲۰	۶۲۷	۱۰۱۴	۲۱۹٫۸۰	۰٫۳۵
۱۹	۹۶۵٫۲۵	۶۷۶٫۵۰	۱۱۱۵	۱۴۹٫۷۵	۰٫۲۲
۲۰	۱۴۳۰	۸۷۷٫۵۰	۱۶۷۹	۲۴۹	۰٫۲۸
۲۱	۱۵۸۴	۹۰۶	۱۸۲۱	۲۳۷	۰٫۲۶
۲۲	۷۸۶٫۶۰	۵۴۹	۱۰۰۵	۲۱۸٫۴۰	۰٫۴۰
۲۳	۱۰۳۹٫۵۰	۷۲۶	۱۳۴۰	۳۰۰٫۵۰	۰٫۴۱
۲۴	۱۲۳۵	۸۹۷	۱۶۱۵	۳۸۰	۰٫۴۲

مقایسه بین مقادیر رقیق‌شدگی و ELOS مربوط به کارگاه-ها نشان می‌دهد با افزایش مقدار ELOS، مقدار رقیق‌شدگی، روند کلی افزایشی دارد. تحلیل رگرسیون نشان می‌دهد بین دو پارامتر یاد شده رابطه ۶ برقرار است. نمودار این رابطه در شکل ۶ آورده شده است.

$$D(\%) = 37.166 (ELOS) + 1.3555 \quad (۶)$$

همان‌طور که در نمودار یاد شده مشاهده می‌شود در برخی کارگاه‌ها با افزایش مقدار ELOS، مقدار رقیق‌شدگی افزایش نمی‌یابد علت آن در درجه اول مربوط به تغییرات حجم کارگاه است زیرا در تعیین ELOS، مقدار حجم اضافه شکست و ریزش

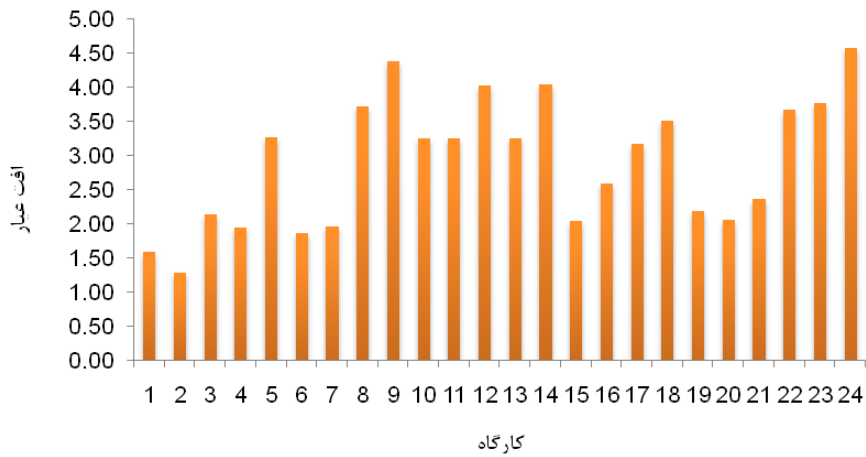
باطله نسبت به سطح کارگاه سنجیده می‌شود و ممکن است مثلا دو کارگاه A و B دارای مقدار ELOS برابر باشند اما کارگاه A به دلیل حجم بیشتر نسبت به کارگاه B، دارای مقدار رقیق‌شدگی کمتری شود. حتی ممکن است کارگاه A دارای مقدار ELOS بیشتری هم باشد اما به دلیل اختلاف زیاد در حجم با کارگاه B دارای مقدار رقیق‌شدگی کمتری باشد. به عنوان نمونه می‌توان کارگاه شماره ۱۵، با مقدار ELOS برابر با ۰٫۲۹ متر را مثال زد که به دلیل حجم بالا نسبت به کارگاه‌های شماره ۳ و ۵ که دارای مقادیر ELOS به ترتیب ۰٫۱۷ و ۰٫۲۳ است، دارای مقدار رقیق‌شدگی کمتر، ۸٫۷۸ درصد است در حالی که کارگاه‌های یاد شده دارای مقادیر رقیق‌شدگی به ترتیب

نباید اثرات آن‌ها را نادیده گرفت. در شکل ۸ اثر حجم کارگاه بر تغییرات رقیق‌شدگی حاصل از ELOS‌های مختلف نشان داده شده است.

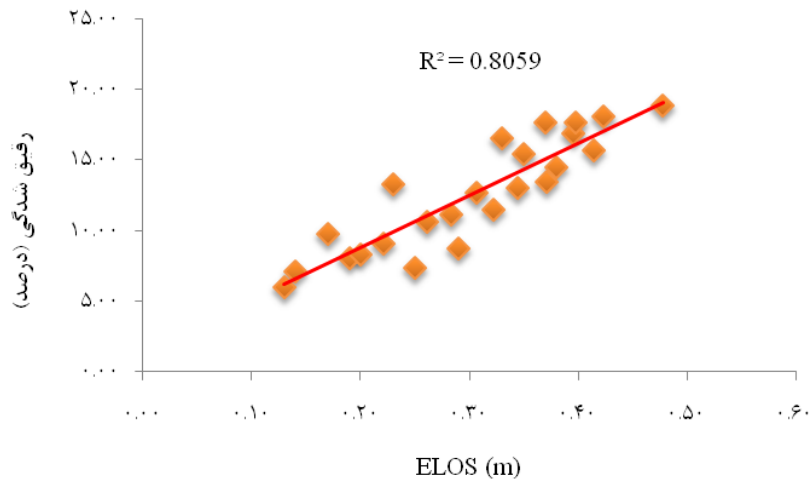
۹٫۷۵ و ۱۳٫۳۴ درصد است. علت دیگر، تغییر در عیار و وزن مخصوص کانسنگ و نیز وزن مخصوص باطله در کارگاه‌های مختلف است. هر چند به دلیل کم بودن تغییرات پارامترهای یاد شده، تغییرات کمی در مقدار رقیق‌شدگی ایجاد می‌شود اما

جدول ۳- میزان رقیق‌شدگی و افت عیار ۲۴ کارگاه استخراج مجموعه معادن منگنز و نارچ.

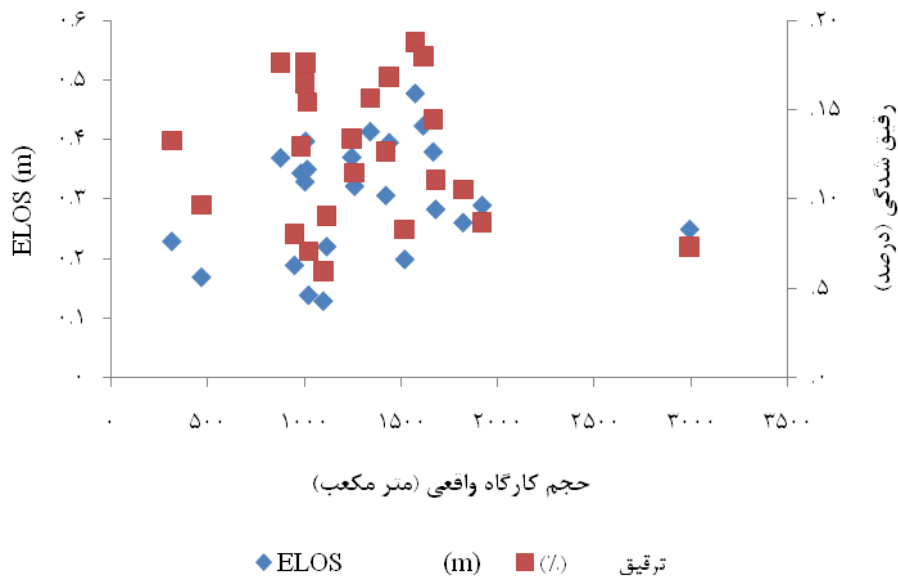
شماره کارگاه	وزن ماده معدنی استخراجی (تن)	وزن باطله استخراجی (تن)	وزن کل (تن)	عیار منگنز در ماده معدنی استخراج شده (درصد)	رقیق‌شدگی (درصد)	افت عیار (درصد)
۱	۲۸۶۸٫۵۰۰	۲۲۰٫۵۷۰	۳۰۸۸٫۰۷۰	۲۰٫۶۳۲۹	۷٫۱۴	۱٫۵۹
۲	۳۱۱۸٫۵۰۰	۱۹۹٫۲۸۰	۳۳۱۷٫۷۸۰	۲۰٫۰۶۷۶	۶٫۰۱	۱٫۲۸
۳	۱۲۶۸٫۸۰۰	۱۳۶٫۶۲۹	۱۴۰۱٫۴۲۹	۱۹٫۸۵۵۲	۹٫۷۵	۲٫۱۴
۴	۲۸۷۲٫۸۰۰	۲۵۳٫۶۱۲	۳۱۲۶٫۴۱۲	۲۲٫۰۵۳۱	۸٫۱۱	۱٫۹۵
۵	۹۰۷٫۲۰۰	۱۳۹٫۶۵۶	۱۰۴۶٫۸۵۶	۲۱٫۲۲۱۶	۱۳٫۳۴	۳٫۲۷
۶	۹۴۶۴٫۳۰۰	۷۵۴٫۴۰۰	۱۰۲۱۸٫۷۰۰	۲۳٫۳۵۸۱	۷٫۳۸	۱٫۸۶
۷	۴۵۷۶٫۴۶۰	۴۱۷٫۳۰۰	۴۹۹۳٫۷۶۰	۲۱٫۵۱۷۹	۸٫۳۶	۱٫۹۶
۸	۲۶۵۳٫۸۶۰	۵۲۵٫۷۶۰	۳۱۷۹٫۶۲۰	۱۸٫۸۰۴۶	۱۶٫۵۴	۳٫۷۳
۹	۲۳۵۱٫۵۲۰	۵۰۶٫۰۱۲	۲۸۵۷٫۵۳۲	۲۰٫۳۶۷۳	۱۷٫۷۱	۴٫۳۸
۱۰	۴۵۳۲٫۲۲۰	۷۷۱٫۲۱۰	۵۳۰۳٫۴۳۰	۱۹٫۱۰۸۵	۱۴٫۵۴	۳٫۲۵
۱۱	۴۲۴۱٫۱۶	۶۱۷٫۴۰۵	۴۸۵۸٫۵۶۰	۲۲٫۳۸۱۶	۱۲٫۷۱	۳٫۲۶
۱۲	۳۸۱۹٫۰۰۰	۷۷۷٫۴۰۰	۴۵۹۶٫۴۰۰	۱۹٫۷۸۳۰	۱۶٫۹۱	۴٫۰۳
۱۳	۳۴۴۵٫۲۰۰	۵۳۵٫۵۰۰	۳۹۸۰٫۷۰۰	۲۰٫۹۶۱۸	۱۳٫۴۵	۳٫۲۶
۱۴	۳۶۷۳٫۲۱۵	۸۵۴٫۴۹۰	۴۵۲۷٫۷۰۵	۱۷٫۴۰۱۹	۱۸٫۸۷	۴٫۰۵
۱۵	۵۸۹۰٫۵۰۰	۵۶۷٫۰۰۰	۶۴۵۷٫۵۰۰	۲۱٫۳۰۸۹	۸٫۷۸	۲٫۰۵
۱۶	۳۳۱۶٫۹۵۰	۴۳۲٫۶۰۰	۳۷۴۹٫۵۵۰	۱۹٫۹۱۲۹	۱۱٫۵۴	۲٫۶۰
۱۷	۲۷۱۶٫۲۲۴	۴۰۶٫۱۴۰	۳۱۲۲٫۳۶۴	۲۱٫۲۳۴۹	۱۳٫۰۱	۳٫۱۸
۱۸	۲۵۱۷٫۶۱۰	۴۶۱٫۵۸۰	۲۹۷۹٫۱۹۴	۱۹٫۱۶۶۱	۱۵٫۴۹	۳٫۵۱
۱۹	۳۲۸۱٫۸۵۰	۳۲۹٫۴۵۰	۳۶۱۱٫۳۰۰	۲۱٫۸۱۰۵	۹٫۱۲	۲٫۱۹
۲۰	۴۳۶۱٫۵۰۰	۵۴۷٫۸۰۰	۴۹۰۹٫۳۰۰	۱۶٫۳۶۴۶	۱۱٫۱۶	۲٫۰۶
۲۱	۴۹۸۹٫۶۰۰	۵۹۲٫۵۰۰	۵۵۸۲٫۱۰۰	۱۹٫۹۲۴۱	۱۰٫۶۱	۲٫۳۷
۲۲	۲۴۳۸٫۴۶۰	۵۲۴٫۱۶	۲۹۶۲٫۶۲۰	۱۷٫۱۲۰۰	۱۷٫۶۹	۳٫۶۸
۲۳	۳۸۶۶٫۹۴۰	۷۲۱٫۲۰۰	۴۵۸۸٫۱۴۰	۲۰٫۲۴۴۳	۱۵٫۷۲	۳٫۷۸
۲۴	۴۵۴۴٫۸۰۰	۱۰۰۳٫۲۰۰	۵۵۴۸٫۰۰۰	۲۰٫۷۲۵۲	۱۸٫۰۸	۴٫۵۷



شکل ۶- میزان افت عیار کارگاه‌های مورد مطالعه در اثر رقیق‌شدگی.



شکل ۷- نمودار رابطه بین رقیق‌شدگی بر حسب ELOS و رقیق‌شدگی بر حسب درصد.



شکل ۸- نمودار اثر حجم کارگاه بر رقیق‌شدگی در مقادیر ثابت ELOS.

ترتیب برابر با ۹/۱۲ و ۱۱/۱۶ است اما بر خلاف انتظار، مقدار افت عیار به ترتیب برابر با ۲/۱۹ و ۲/۰۶ است زیرا مطابق با جدول‌های ۱ و ۳ تفاوت قابل توجهی در مقادیر عیار برجا و وزن ماده معدنی و باطله استخراجی در این دو کارگاه مشاهده می‌شود.

با افزایش مقدار ELOS مقدار عیار محصول تولیدی کارگاه کاهش می‌یابد. با توجه به جدول‌های ۲ و ۳ می‌توان دریافت بین افت عیار محصول تولیدی کارگاه و ELOS رابطه ۸ برقرار است. در نمودار شکل ۱۰ این رابطه نشان داده شده است. با کمک این رابطه می‌توان مقدار کاهش عیار را به ازای مقادیر مختلف ELOS پیش‌بینی کرد. به عنوان مثال چنانچه در دو کارگاه با عیار برجای ۲۰ درصد، مقدار ۱۰ و ۳۰ سانتی‌متر ELOS اتفاق افتد، مقدار عیار سنگ استخراجی از ۲۰ درصد به ترتیب ۱/۱ و ۲/۸۸ واحد کاهش یافته و به ۱۸/۹ و ۱۷/۲۲ درصد می‌رسد.

$$DG = 8.1595 (ELOS)^{0.8657} \quad (۸)$$

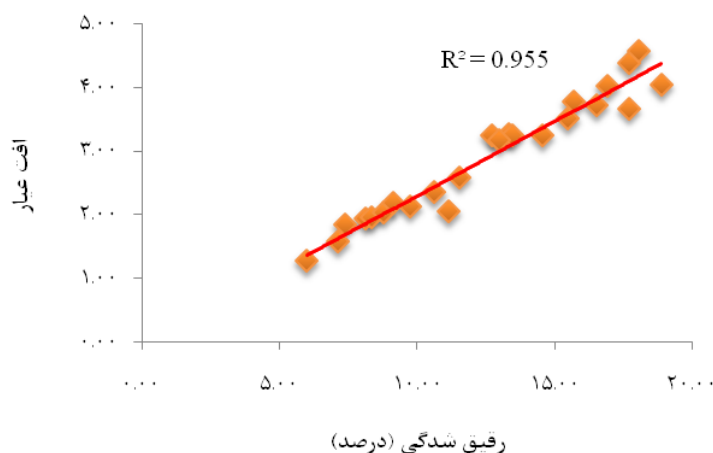
با افزایش رقیق‌شدگی، عیار محصول تولیدی کارگاه کاهش می‌یابد. با توجه به جدول ۳، میزان افت عیار ناشی از رقیق‌شدگی را می‌توان از رابطه ۷ به دست آورد.

$$DG = 0.2215 (D)^{1.0165} \quad (۷)$$

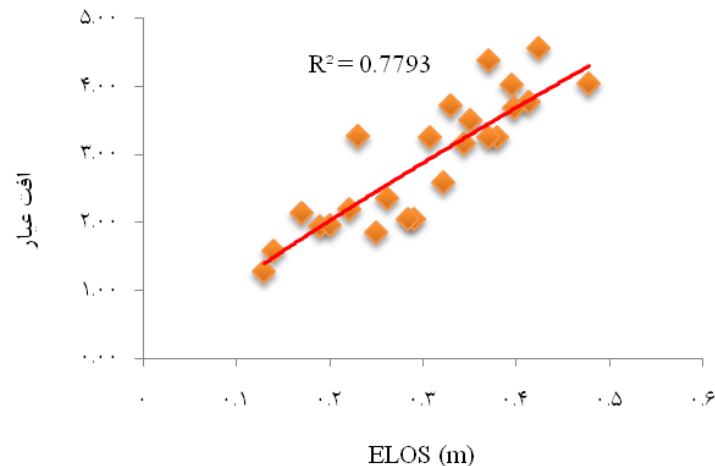
که در آن:

DG مقدار افت عیار محصول تولیدی کارگاه از مقدار عیار برجای ماده معدنی
 D مقدار رقیق‌شدگی

نمودار این رابطه در شکل ۹ نشان داده شده است. اگرچه روند کلی افزایش رقیق‌شدگی، افزایش افت عیار را به همراه دارد اما در برخی کارگاه‌ها، مقدار افزایش افت عیار، کمتر از مقدار افزایش معمول در سایر کارگاه‌ها است. علت آن مطابق با رابطه ۵ (که مقدار عیار ماده معدنی استخراجی از آن حاصل می‌شود)، تفاوت قابل توجه در مقدار عیار برجا و وزن ماده معدنی و باطله استخراجی در این کارگاه‌ها است. به عنوان مثال، در کارگاه‌های شماره ۱۹ و ۲۰ مقدار رقیق‌شدگی به



شکل ۹- نمودار رابطه بین رقیق‌شدگی و افت عیار محصول.



شکل ۱۰- نمودار رابطه بین ELOS و افت عیار محصول.

۴- اثرات اقتصادی رقیق‌شدگی

برای بررسی اثر اقتصادی رقیق‌شدگی در مجموعه معادن منگنز و نارچ، تغییر در هزینه‌های تولید و سود ناشی از فروش کانسنگ مورد مطالعه قرار گرفت. میانگین قیمت فروش یک تن سنگ منگنز در سال ۲۰۱۶ در بازارهای جهانی [۲۱] و داخلی [۲۲] به ترتیب مطابق با جدول‌های ۴ و ۵ بوده است، بنابراین برای هر کارگاه می‌توان با توجه به تناژ تولیدی (شامل مجموع تناژ ماده معدنی و باطله استخراجی) و عیار محصول خروجی، درآمد حاصل از فروش را محاسبه کرد. از آنجا که هزینه لازم برای تولید یک تن سنگ منگنز برابر با ۴۸ دلار محاسبه شده است بنابراین سود حاصل از فروش محصول هر کارگاه قابل محاسبه است. در جدول ۶ سود حاصل از فروش ۲۴ کارگاه مورد مطالعه آورده شده است.

برای تعیین افت سود حاصل از رقیق‌شدگی، درآمد و سود حاصل از فروش تولید کارگاه‌ها با فرض عدم ایجاد رقیق‌شدگی محاسبه شده است. نتایج این محاسبات در جدول ۷ آورده شده است. برای محاسبه درآمد در حالت بدون رقیق‌شدگی، تناژ محصول، در واقع همان تناژ ماده معدنی برجا با عیار برجا است. واضح است که درآمد حاصل از فروش محصول در هر دو حالت یکسان، اما سود حاصل متفاوت است زیرا در حالت ایجاد رقیق‌شدگی اگرچه ماده معدنی با عیار کمتر به فروش می‌رسد اما آن مقدار تناژ باطله‌ای هم که با ماده معدنی مخلوط شده و سبب بروز رقیق‌شدگی شده نیز به فروش می‌رسد. نکته حایز اهمیت، در تفاوت هزینه‌ها در دو حالت یاد شده است. در حالت ایجاد رقیق‌شدگی، تناژ تولید نسبت به حالت بدون رقیق‌شدگی

بیشتر و به دنبال آن هزینه تولید نیز بیشتر است و این افزایش هزینه سبب کاهش سود می‌شود. نتایج محاسبات مربوط اختلاف هزینه، درآمد و سود دو حالت یاد شده برای کارگاه‌ها در جدول ۸ آورده شده است. نمودار میله‌ای مقدار سود بر واحد تولید کارگاه‌ها در دو حالت ایجاد رقیق‌شدگی و عدم رقیق‌شدگی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

با توجه به جدول‌های ۳ و ۶ که در آن‌ها مقادیر رقیق‌شدگی و افت سود کارگاه‌های مختلف گنجانده شده است، می‌توان رابطه ۹ را به عنوان رابطه حاکم بین این دو پارامتر استخراج کرد. نمودار این رابطه در شکل ۱۲ نشان داده شده است که افزایش رقیق‌شدگی سبب افزایش افت سود می‌شود به طوری که در نقطه معینی از افت سود، مقدار سود به صفر رسیده و معدن به نقطه سر به سری می‌رسد. یعنی مقدار درآمد با مقدار هزینه برابری می‌کند. از آنجا که هزینه تولید واحد ماده معدنی ۴۸ دلار محاسبه شد، چنانچه این مقدار برابر با مقدار افت سود، DP در رابطه ۷ قرار گیرد و از طرفین رابطه، لگاریتم گرفته شود، مقدار رقیق‌شدگی معادل آن برابر با ۶۷٫۳۸ می‌شود. به عبارت دیگر نقطه سر به سری معدن در رقیق‌شدگی ۶۷٫۳۸ اتفاق می‌افتد. مقدار افت عیار ناشی از این رقیق‌شدگی را می‌توان با استفاده از رابطه ۵ محاسبه کرد که برابر با ۱۶ است. این به آن معنی است که در افت عیارهای بیشتر از آن معدن دچار زیان‌دهی می‌شود. به عبارت دیگر چنانچه میانگین عیار معدن برابر با ۲۰ درصد باشد، می‌توان عیار ۴ درصد را به عنوان عیار حد معدن دانست.

عنوان رقیق‌شدگی حد در نظر گرفت که در رقیق‌شدگی بالاتر از آن، زیان و در رقیق‌شدگی پایین‌تر از آن، سود وجود دارد. بنابراین می‌توان میزان ۶۷ درصد رقیق‌شدگی را نقطه سر به سری رقیق‌شدگی نامید.

ذکر این نکته ضروری است که با توجه به مقادیر رقیق‌شدگی موجود در معدن مورد مطالعه، رقیق‌شدگی ۶۷ درصد که منجر به زیان‌دهی معدن می‌شود در عمل به ندرت اتفاق می‌افتد و این عدد با توجه به رابطه به دست آمده بین افت سود و رقیق‌شدگی حاصل شده است.

با استفاده از رابطه ۸ می‌توان به این نتیجه رسید که چنانچه به عنوان مثال مقدار میانگین رقیق‌شدگی کارگاه‌های معدن ۲۵ سانتی‌متر باشد و چنانچه با اعمال تدابیر پیش‌گیرانه مقدار آن به ۱۵ سانتی‌متر کاهش یابد، مقدار سود حاصل از تولید ۱ تن ماده معدنی ۳۵۴ دلار افزایش می‌یابد و با احتساب تولید ۱۰۰ هزار تن سنگ منگنز در سال، مقدار افزایش سود سالانه برابر با ۳۵۴۰۰۰ دلار خواهد بود.

$$DP = 0.6646(D^{1.0165}) \quad (9)$$

$$DP = 24.479(ELOS^{0.8657}) \quad (10)$$

چنانچه به طریق مشابه، آنچه را که برای تعیین رابطه بین افت سود و رقیق‌شدگی انجام شد، برای تعیین رابطه بین افت سود و ELOS انجام شود، رابطه ۱۰ که نمودار آن در شکل ۱۳ نشان داده شده است حاصل می‌شود. بر این اساس می‌توان در کارگاه‌های مختلف صرف نظر از مقدار حجم کارگاه، مقدار سود و زیان کارگاه را بر اساس مقدار ELOS پیش‌بینی کرد. با استفاده از این نمودار و با قرار دادن مقدار ۴۸ برای افت سود، مقدار ELOS برابر با ۲/۱۸ متر می‌شود. به عبارت دیگر حد سر به سری ELOS برای معدن برابر با ۲/۱۸ متر است.

هزینه‌های مربوط به استخراج، یعنی حفاری، آتشیاری، باربری و نظایر آن که در این مقاله به آن‌ها اشاره شده است، چنانچه رقیق‌شدگی وجود نداشته باشد، صرفاً صرف استخراج ماده معدنی می‌شوند و اگر رقیق‌شدگی وجود داشته باشد به همان نسبت رقیق‌شدگی، صرف استخراج باطله می‌شود. در این حالت، معدن در تناژ تولید ثابت، دارای هزینه تولید ثابت است اما این تولید، همراه با کاهش عیار و به دنبال آن، کاهش سود است.

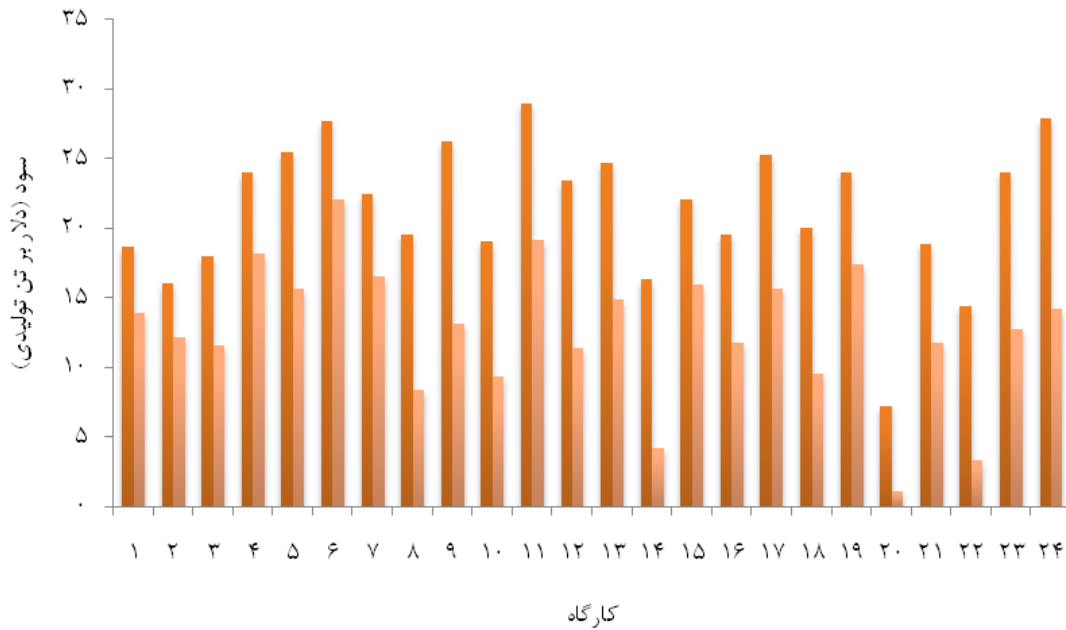
وقتی مشخص شد معدن در رقیق‌شدگی ۶۷ درصد دچار زیان‌دهی می‌شود در واقع می‌توان رقیق‌شدگی ۶۷ درصد را به

جدول ۴- میانگین قیمت سنگ منگنز در بازارهای جهانی [۲۱].

مقدار عیار	۳۸ درصد آفریقای جنوبی		۴۵ درصد استرالیا در چین
	در بندر الیزابت	در چین	
قیمت به ازای هر عیار (دلار بر تن)	۱/۵	۲/۴	۳

جدول ۵- میانگین قیمت سنگ منگنز در بازارهای داخلی [۲۲].

مقدار عیار	زیر ۳۰	۳۰ تا ۳۲	۳۳ تا ۳۵	۳۶ تا ۳۸	۳۹ تا ۴۱
قیمت به ازای هر عیار (ریال بر تن)	۹۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۱۲۰۰۰۰	۱۳۰۰۰۰	۱۴۰۰۰۰
قیمت به ازای هر عیار (دلار بر تن)	۳	۳/۶۷	۴	۴/۳۴	۴/۶۷

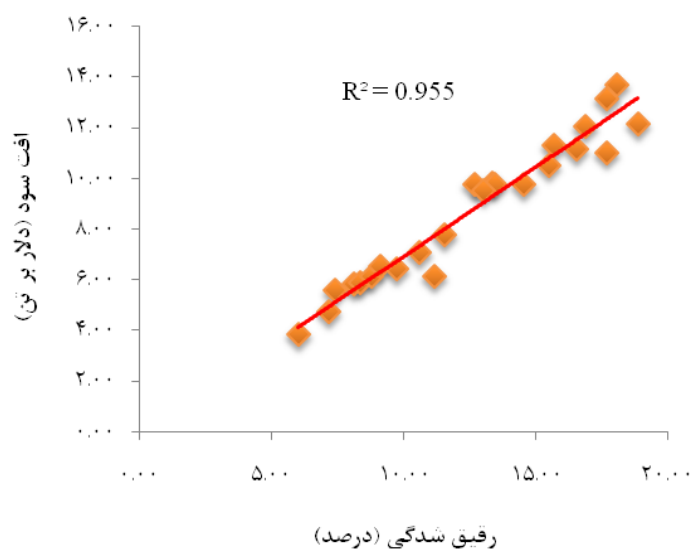


سود بر واحد تن تولید (بدون ترقیق بر واحد تن تولید) سود بر واحد تن تولید

شکل ۱۱- نمودار وضعیت سود بر تن تولیدی کارگاه‌ها در دو حالت رقیق‌شدگی و بدون رقیق‌شدگی.

جدول ۶- وضعیت اقتصادی کارگاه‌ها با احتساب رقیق‌شدگی ایجاد شده در هر کارگاه.

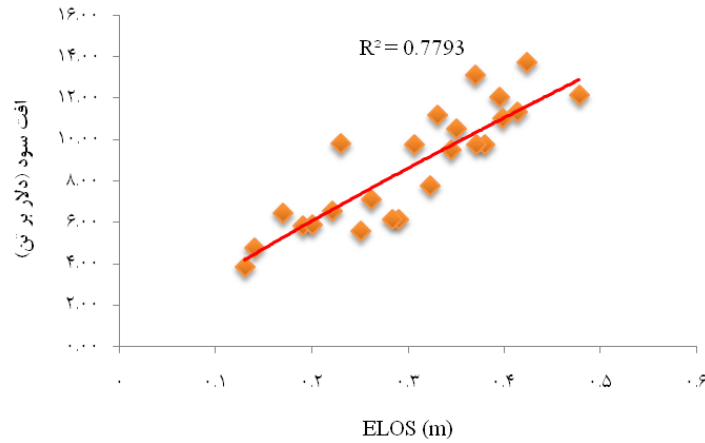
شماره کارگاه	درآمد (دلار)	هزینه (دلار)	سود (دلار)	سود بر واحد تولید (دلار بر تن)
۱	۱۹۱۱۴۷,۵۵	۱۴۸۲۲۷,۳۶	۴۲۹۲۰,۱۹	۱۳,۹۰
۲	۱۹۹۷۳۹,۵۵	۱۵۹۲۵۳,۴۴	۴۰۴۸۶,۴۹	۱۲,۲۰
۳	۸۳۴۷۶,۸۰	۶۷۲۶۸,۵۹	۱۶۲۰۸,۲۱	۱۱,۵۷
۴	۲۰۶۸۴۱,۶۰	۱۵۰۰۶۷,۷۸	۵۶۷۷۳,۸۲	۱۸,۱۶
۵	۶۶۶۷۹,۲۰	۵۰۲۴۹,۰۹	۱۶۴۳۰,۱۱	۱۵,۶۹
۶	۷۱۶۰۶۸,۹۴	۴۹۰۴۹۷,۶۰	۲۲۵۵۷۱,۳۴	۲۲,۰۷
۷	۳۲۲۳۶۵,۸۴	۲۳۹۷۰۰,۴۸	۸۲۶۶۵,۳۶	۱۶,۵۵
۸	۱۷۹۳۷۴,۴۰	۱۵۲۶۲۱,۷۶	۲۶۷۵۲,۶۴	۸,۴۱
۹	۱۷۴۶۰۰,۳۶	۱۳۷۱۶۱,۵۴	۳۷۴۳۸,۸۲	۱۳,۱۰
۱۰	۳۰۴۰۲۱,۳۲	۲۵۴۵۶۴,۶۴	۴۹۴۵۶,۶۸	۹,۳۳
۱۱	۳۲۶۲۳۰	۲۳۳۲۱۳,۲۸	۹۳۰۱۶,۷۵	۱۹,۱۴
۱۲	۲۷۲۷۹۱,۱۷	۲۲۰۶۲۷,۲۰	۵۲۱۶۳,۹۷	۱۱,۳۵
۱۳	۲۵۰۳۲۸,۲۳	۱۹۱۰۷۳,۶۰	۵۹۲۵۴,۶۳	۱۴,۸۹
۱۴	۲۳۶۳۷۱,۳۹	۲۱۷۳۲۹,۸۴	۱۹۰۴۱,۵۵	۴,۲۱
۱۵	۴۱۲۸۰۶,۲۴	۳۰۹۹۶۰,۰۰	۱۰۲۸۴۶,۲۴	۱۵,۹۳
۱۶	۲۲۳۹۹۳,۶۳	۱۷۹۹۷۸,۴۰	۴۴۰۱۵,۲۳	۱۱,۷۴
۱۷	۱۹۸۹۰۹,۰۸	۱۴۹۸۷۳,۴۷	۴۹۰۳۵,۶۱	۱۵,۷۰
۱۸	۱۷۱۲۹۸,۴۶	۱۴۳۰۰۱,۳۱	۲۸۲۹۷,۱۴	۹,۵۰
۱۹	۲۳۶۲۹۳,۲۰	۱۷۳۳۴۲,۴۰	۰,۶۲۹۵۰,۸۱	۱۷,۴۳
۲۰	۲۴۱۰۱۶,۴۹	۲۳۵۶۴۶,۴۰	۵۳۷۰,۰۹	۱,۰۹
۲۱	۳۳۳۶۵۴,۵۵	۲۶۷۹۴۰,۸۰	۶۵۷۱۳,۷۵	۱۱,۷۷
۲۲	۱۵۲۱۵۹,۹۰	۱۴۲۲۰۵,۷۶	۹۹۵۴,۱۴	۳,۳۶
۲۳	۲۷۸۶۵۱,۷۰	۲۲۰۲۳۰,۷۲	۵۸۴۲۰,۹۸	۱۲,۷۳
۲۴	۳۴۴۹۵۰,۳۲	۲۶۶۳۰۴,۰۰	۷۸۶۴۶,۳۲	۱۴,۱۸



شکل ۱۲- نمودار وضعیت افت سود بر تن تولیدی کارگاه‌ها نسبت به رقیق‌شدگی.

جدول ۷- وضعیت اقتصادی کارگاه‌ها با فرض رقیق‌شدگی صفر برای هر کارگاه.

شماره کارگاه	درآمد (دلار)	هزینه (دلار)	سود (دلار)	سود بر واحد تولید (دلار بر تن)
۱	۱۹۱۱۴۷,۵۵	۱۳۷۶۴۰,۰۰	۵۳۵۰۷,۵۵	۱۸,۶۶
۲	۱۹۹۷۳۹,۵۵	۱۴۹۶۸۸,۰۰	۵۰۰۵۱,۹۳	۱۶,۰۵
۳	۸۳۴۷۶,۸۰	۶۰۷۱۰,۴۰	۲۲۷۶۶,۴۰	۱۸,۰۰
۴	۲۰۶۸۴۱,۶۰	۱۳۷۸۹۴,۴۰	۶۸۹۴۷,۲۰	۲۴,۰۰
۵	۶۶۶۷۹,۲۰	۴۳۵۴۵,۶۰	۲۳۱۳۳,۶۰	۲۵,۵۰
۶	۷۱۶۰۶۸,۹۴	۴۵۴۲۸۶,۴۰	۲۶۱۷۸۲,۵۴	۲۷,۶۶
۷	۳۲۲۳۶۵,۸۴	۲۱۹۶۷۰,۰۸	۱۰۲۶۹۵,۷۶	۲۲,۴۴
۸	۱۷۹۳۷۴,۴۰	۱۲۷۳۸۵,۲۸	۵۱۹۸۹,۱۲	۱۹,۵۹
۹	۱۷۴۶۰۰,۳۶	۱۱۲۸۷۲,۹۶	۶۱۷۲۷,۴۰	۲۶,۲۵
۱۰	۳۰۴۰۲۱,۳۲	۲۱۷۵۴۶,۵۶	۸۶۴۷۴,۷۶	۱۹,۰۸
۱۱	۳۲۶۲۳۰	۲۰۳۵۷۵,۶۸	۱۲۲۶۵۴,۳۵	۲۸,۹۲
۱۲	۲۷۲۷۹۱,۱۷	۱۸۳۳۱۲,۰۰	۸۹۴۷۹,۱۷	۲۳,۴۳
۱۳	۲۵۰۳۲۸,۲۳	۱۶۵۳۶۹,۶۰	۸۴۹۵۸,۶۳	۲۴,۶۶
۱۴	۲۳۶۳۷۱,۳۹	۱۷۶۳۱۴,۳۲	۶۰۰۵۷,۰۷	۱۶,۳۵
۱۵	۴۱۲۸۰۶,۲۴	۲۸۲۷۴۴,۰۰	۱۳۰۰۶۲,۲۴	۲۲,۰۸
۱۶	۲۲۳۹۹۳,۶۳	۱۵۹۲۱۳,۶۰	۶۴۷۸۰,۰۳	۱۹,۵۳
۱۷	۱۹۸۹۰۹,۰۸	۱۳۰۳۷۸,۷۵	۶۸۵۳۰,۳۳	۲۵,۲۳
۱۸	۱۷۱۲۹۸,۴۶	۱۲۰۸۴۵,۴۷	۵۰۴۵۲,۹۸	۲۰,۰۴
۱۹	۲۳۶۲۹۳,۲۰	۱۵۷۵۲۸,۸۰	۷۸۷۶۴,۴۰	۲۴,۰۰
۲۰	۲۴۱۰۱۶,۴۹	۲۰۹۳۵۲,۰۰	۳۱۶۶۴,۴۹	۷,۲۶
۲۱	۳۳۳۶۵۴,۵۵	۲۳۹۵۰۰,۸۰	۹۴۱۵۳,۷۵	۱۸,۸۷
۲۲	۱۵۲۱۵۹,۹۰	۱۱۷۰۴۶,۰۸	۳۵۱۱۳,۸۲	۱۴,۴۰
۲۳	۲۷۸۶۵۱,۷۰	۱۸۵۶۱۳,۱۲	۹۳۰۳۸,۵۸	۲۴,۰۶
۲۴	۳۴۴۹۵۰,۳۲	۲۱۸۱۵۰,۴۰	۱۲۶۷۹۹,۹۲	۲۷,۹۰



شکل ۱۳- نمودار وضعیت افت سود بر تن تولیدی کارگاه‌ها نسبت به ELOS.

جدول ۸- اختلاف وضعیت اقتصادی کارگاه‌ها در حالت رقیق‌شدگی و بدون رقیق‌شدگی برای هر کارگاه.

شماره کارگاه	اختلاف درآمد (دلار)	اختلاف هزینه (دلار)	اختلاف سود (دلار)	اختلاف سود بر واحد تولید (دلار بر تن)
۱	۰	۱۰۵۸۷,۳۶	۱۰۵۸۷,۳۶	۴,۷۶
۲	۰	۹۵۶۶,۴۴	۹۵۶۶,۴۴	۳,۸۵
۳	۰	۶۵۵۸,۱۹	۶۵۵۸,۱۹	۶,۴۳
۴	۰	۱۲۱۷۳,۳۸	۱۲۱۷۳,۳۸	۵,۸۴
۵	۰	۶۷۰۳,۴۹	۶۷۰۳,۴۹	۹,۸۱
۶	۰	۳۶۲۱۱,۲۰	۳۶۲۱۱,۲۰	۵,۵۹
۷	۰	۲۰۰۳۰,۴۰	۲۰۰۳۰,۴۰	۵,۸۹
۸	۰	۲۵۲۳۶,۴۸	۲۵۲۳۶,۴۸	۱۱,۱۸
۹	۰	۲۴۲۸۸,۵۸	۲۴۲۸۸,۵۸	۱۳,۱۵
۱۰	۰	۳۷۰۱۸,۰۸	۳۷۰۱۸,۰۸	۹,۷۵
۱۱	۰	۲۹۶۳۷,۶۰	۲۹۶۳۷,۶۰	۹,۷۸
۱۲	۰	۳۷۳۱۵,۲۰	۳۷۳۱۵,۲۰	۱۲,۰۸
۱۳	۰	۲۵۷۰۴,۰۰	۲۵۷۰۴,۰۰	۹,۷۷
۱۴	۰	۴۱۰۱۵,۵۲	۴۱۰۱۵,۵۲	۱۲,۱۴
۱۵	۰	۲۷۲۱۶,۰۰	۲۷۲۱۶,۰۰	۶,۱۵
۱۶	۰	۲۰۷۶۴,۸۰	۲۰۷۶۴,۸۰	۷,۷۹
۱۷	۰	۱۹۴۹۴,۷۲	۱۹۴۹۴,۷۲	۹,۵۳
۱۸	۰	۲۲۱۵۵,۸۴	۲۲۱۵۵,۸۴	۱۰,۵۴
۱۹	۰	۱۵۸۱۳,۶۰	۱۵۸۱۳,۶۰	۶,۵۷
۲۰	۰	۲۶۲۹۴,۴۰	۲۶۲۹۴,۴۰	۶,۱۷
۲۱	۰	۲۸۴۴۰,۰۰	۲۸۴۴۰,۰۰	۷,۱۰
۲۲	۰	۲۵۱۵۹,۶۸	۲۵۱۵۹,۶۸	۱۱,۰۴
۲۳	۰	۳۴۶۱۷,۶۰	۳۴۶۱۷,۶۰	۱۱,۳۳
۲۴	۰	۴۸۱۵۳,۶۰	۴۸۱۵۳,۶۰	۱۳,۷۲

۵- نتیجه‌گیری

بررسی‌های انجام شده بر روی رقیق‌شدگی پیش‌بینی نشده ناشی از اضافه شکست و ریزش سقف و دیواره‌های کارگاه‌های استخراج زیرزمینی مجموعه معادن منگنز و نارچ که سیستم مانیتورینگ فضای حفاری، CMS، در آن‌ها به اجرا در آمد نشان داد، تغییرات افت عیار و به دنبال آن افت سود حاصل از فروش محصول تولیدی با تغییرات ELOS و رقیق‌شدگی رابطه توانی دارند. همچنین مشخص شد نقطه سربه‌سری رقیق‌شدگی در مقدار ۲/۱۸ متر ELOS و معادل آن رقیق‌شدگی ۶۷/۳۸ درصد اتفاق می‌افتد. در این حالت ۱۶ واحد افت عیار برجا در عیار محصول تولیدی مشاهده می‌شود

و سود معدنکاری به صفر می‌رسد. که در این مقاله هزینه‌های غیرمستقیم ناشی از رقیق‌شدگی شامل هزینه تاخیر سیکل کارگاه، خسارت و ضرر به ماشین‌آلات، مسدود شدن نقاط تخلیه، معدنکاری اضافی و ریسک در باربری و پرکردن در تحلیل اقتصادی دخالت داده نشده‌اند. بدیهی است در نظر گرفتن این هزینه‌ها سبب کاهش مقدار ELOS سربه‌سری می‌شود. نکته دیگر این که مقادیر مربوط به هزینه‌های تولید و قیمت فروش محصول، ثابت در نظر گرفته شده‌اند و تغییرات در آن‌ها موجب تغییر در مقدار ELOS سربه‌سری می‌شود..

مراجع

- Henning, J. G. (2007). "Evaluation of long-hole mine design influences on unplanned ore dilution". Ph.D. Thesis, McGill University.
- Miller, F., Potvin, Y., & Jacob, D. (1992). "Laser measurement of open stope dilution". CIM(Canadian Mining and Metallurgical) Bulletin, 85(962), 96-102.
- Miller, F., & Jacob, D. (1993). "Cavity monitoring system": Google Patents.
- Anderson, B., & Grebenc, B. (1995). "Controlling dilution at the Golden Giant mine". Paper presented at the Proceedings of the 12th CIM mine operators conference, Timmins.
- Mah, S., Pakalnis, R., Poulin, R., & Clark, L. (1995). "Obtaining quality cavity monitoring survey data". Proceedings of the CAMI, 95, 3rd.
- Germain, P., Hadjigeorgiou, J., & Lessard, J. (1996). "On the relationship between stability prediction and observed stope overbreak". Rock Mechanics, Aubertin, Hassani and Mitri (eds), 277-283.
- Yao, X., Allen, G., & Willett, M. (1999). "Dilution evaluation using Cavity Monitoring System at HBMS—Trout Lake Mine". Paper presented at the Proceeding of the 101st CIM annual general meeting, Calgary.
- Calvert, T., Simpson, J., & Sandy, M. (2000). "Open stope design at Normandy Golden Grove Operations". Proceedings of MassMin, 653-659.
- Uggalla, S. (2001). "Sublevel open sloping-design and planning at the Olympic Dam Mine". Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies. Society of Mining, Metallurgy and Exploration, 8307 Shaffer Parkway, Littleton, CO 80127, USA, 2001., 239-244.
- Ran, J. (2002). "Hangingwall sloughing mechanism in open stope mining". CIM bulletin, 95(1064), 74-77
- Soyer, N. (2006). "An approach on dilution and ore recovery/loss calculations in mineral reserve estimations at the cayeli mine, Turkey". Citeseer.
- Luo, Z.-q., Liu, X.-m., Zhang, B., Lu, H., & Li, C. (2008). "Cavity 3D modeling and correlative techniques based on cavity monitoring". Journal of central south university of technology, 15(5), 639-644.
- Revey, G. (1998). "Effects and Control of Overbreak in Underground Mining". Mining Engineering, pp. 63.
- Le Roux, P., & Stacey, T. (2017). "Value creation in a mine operating with open stoping mining methods". Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 117(2), 133-142
- عطایی م، (۱۳۹۵)، "مباحث ویژه در معدنکاری زیرزمینی"، چاپ اول، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- Popov, G.N.(1971). The Working of Mineral Deposits, Mir Publishers.
- Agoškov, M. I., Borisov, S. S., & Bojarskij, V. A. e. (1988). "Mining of ores and non-metallic minerals": Mir.
- Clark, L., & Pakalnis, R. (1997). "An empirical design approach for estimating unplanned dilution from open stope hangingwalls and footwalls". Paper presented at the Presentation at 99th Canadian Institute of Mining annual conference, Vancouver, BC.

21. <http://www.infomine.com/investment/metal-prices/manganese/>
22. <http://www.iranmining.com/news/>
۱۹. مهندسین مشاور کاوشگران، (۱۳۸۹)، " طرح اکتشاف کانسار و نارچ، گزارش اکتشاف تونلی معادن کانسار منگنز و نارچ".
۲۰. شرکت معادن منگنز و نارچ، (۱۳۹۶)، دفتر برنامه‌ریزی و تولید، گزارش فنی اقتصادی