

ارائه مدل جدید برای برآورد میزان همگرایی راهروهای معادن زغال سنگ

(مطالعه موردی: راهروی K21 معدن تزره)

سید محمد اسماعیل جلالی^{۱*}، رضا حیدری شیبانی^۲، مهدی نوروزی^۳

۱- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، jalalisme@shahroodut.ac.i

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، rh.miner@gmail.com

۳- دانشجوی دکتری مهندسی استخراج معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، mnoroozi.mine@gmail.com

(دریافت ۲۹ اردیبهشت ۱۳۸۹، پذیرش ۱۷ مهر ۱۳۹۰)

چکیده

پدیده همگرایی در راهروهای معادن زیرزمینی ناشی از جابجایی سقف، کف و دیواره‌های آن است و بر پایداری وابسته به زمان راهرو شدیداً تأثیرگذار است. همگرایی، ساده‌ترین پارامتر برای اندازه‌گیری به شمار می‌آید. با محاسبه میزان همگرایی می‌توان به دیدگاه مناسبی در خصوص فشار اعمال شده بر سیستم نگهداری دست یافت. در این مقاله، رابطه‌ای برای پیش‌بینی میزان همگرایی در راهروهای معادن زیرزمینی زغال سنگ از طریق شبیه‌سازی پارامترهای راهروی K21 معدن تزره ارائه شده است. برای تعیین ضرایب متغیرهای مستقل در معادله همگرایی، تحلیل رگرسیون خطی چندگانه با کاربرد کلیه پارامترهای تأثیرگذار در همگرایی به گونه‌ای که رابطه‌ای خطی بین پارامترهای مستقل و پارامتر وابسته برقرار باشد، بکار رفته است. اعتبارسنجی مدل ارائه شده با بررسی داده‌ها از لحاظ نرمال بودن، ثابت بودن واریانس و خطی بودن رابطه متغیر مستقل و وابسته انجام شده است. مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده همگرایی، توسط مدل ارائه شده و مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های مورد بررسی، نشان می‌دهد که مدل ارائه شده بخوبی قادر به پیش‌بینی میزان همگرایی در راهروی مورد نظر است.

کلمات کلیدی

همگرایی، رگرسیون خطی چندگانه، معدن زیرزمینی، زغال سنگ، معدن تزره

* نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات

۱- مقدمه

در راهروهای سنگی، عمدتاً دو نوع ناپایداری اتفاق می‌افتد. در حالت اول، ناپایداری راهرو با تخریب ناگهانی همراه است. در این حالت، ناپیوستگی‌ها، سنگ‌های اطراف راهرو را به قطعات جداگانه تقسیم می‌کنند و قطعات مزبور می‌توانند حرکت انتقالی و یا چرخشی داشته باشند. در حالت دوم که عمدتاً ناپایداری در اعماق زیاد و در اثر وجود تنش‌های اولیه بالا ایجاد می‌شود، بر خلاف حالت اول، ناپایداری با همگرایی^۱ تدریجی راهرو همراه است. روش‌های جدید در طراحی راهرو بر اساس تحلیل دقیق اندرکنش سیستم نگهداری با سنگ استوار است. در بسیاری موارد، تهیه اطلاعات طراحی، قبل از ساخت راهرو بسیار دشوار است. بررسی برخی خواص توده سنگ نیز تنها با انجام تحلیل برگشتی^۲ بر روی اطلاعات صحرایی امکان‌پذیر می‌باشد. برای تحلیل اندازه‌گیری‌های همگرایی و تعیین اثر پیشروی سینه‌کار، مدل‌های المان محدود با تقارن محوری برای زمین‌های با خواص مقاومتی مختلف مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از آنها توابعی برای تعیین همگرایی راهرو بر حسب فاصله از سینه کار بدست آمده است [۱].

پس از آن معادله همگرایی کامل شده و در آن همگرایی وابسته به زمان حاصل از پیشروی سینه‌کار در ارتباط با همگرایی خزشی و گسترش ناحیه تسلیم مورد توجه قرار گرفته است. با این حال در اینگونه معادلات نیز جوانب مهمی نظیر آثار مربوط به اندرکنش زمین با سیستم نگهداری اعمال نشده است [۲]. در سال ۱۹۸۷ روشی برای تفسیر اطلاعات حاصل از اندازه‌گیری همگرایی در مجاورت سینه‌کار راهروهای معدنی ارائه گردید که در آن تمام جوانب مهم پیشروی راهرو شامل شرایط سینه‌کار، حفاری مرحله‌ای و اندرکنش سنگ با سیستم نگهداری مورد توجه قرار گرفته بود [۳].

در سال ۱۹۹۳ روابطی برای تعیین میزان همگرایی در راهروهای دایره‌ای و عمیق، بر اساس مدل‌های پیش‌بینی رفتار وابسته به زمان ماکسول^۳، برگرز^۴، استاندارد و کلونین^۵ بیان شد [۴]. هوک و مارینس^۶ در سال ۲۰۰۰ رابطه‌ای برای تعیین همگرایی راهروهای دایره‌ای در زمین‌های آماسی و تحت شرایط تنش هیدرواستاتیک ارائه کردند. در این رابطه، میزان همگرایی بر اساس قطر اولیه راهرو، مقاومت ماده سنگ و تنش‌های برجا محاسبه می‌شد [۵]. پس از آن، در سال ۲۰۰۱ نیز روش‌هایی برای تعیین همگرایی بر اساس تئوری چگالی ارائه شد [۶].

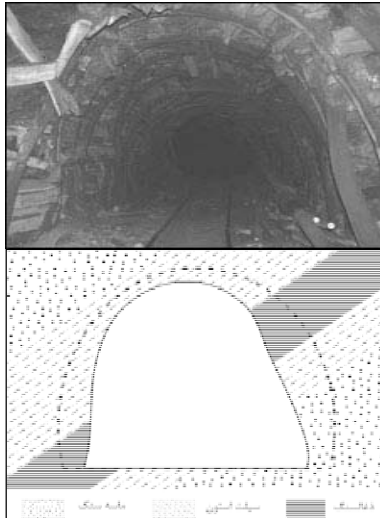
در سال ۲۰۰۴ برای پیش‌بینی رفتار آماسی تونل‌ها و مغارها در سنگ‌های نرم، نوع خاصی از روش آنالیز عددی، متفاوت از روش‌های عددی مرسوم توسعه داده شد [۷]. آنتیگا^۷ و همکاران در سال ۲۰۰۷ با استفاده از تحلیل‌های عددی، تأثیر حالت غیر هیدرواستاتیکی تنش را بر روی میزان همگرایی و شکل ناحیه گسترش شکست در راهروهای دایره‌ای مورد بررسی قرار دادند [۸]. این روش‌ها به واسطه دارا بودن ماهیتی عددی از پیچیدگی‌های خاص خود برخوردار هستند. در سال ۲۰۰۸ برای محاسبه همگرایی راهروی واقع در محیط ویسکوالاستیک-پلاستیک، روشی بر اساس فرمول‌بندی تحلیلی و حل معادلات وابسته به آن توسعه داده شد [۹]. تاکنون نیز منحنی اندرکنش زمین بر اساس فشار اعمالی بر سیستم نگهداری، بطور موفق برای تعیین همگرایی و جابجایی دیواره‌های تونل مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰]. با این وجود یک مدل ساده و تجربی، به دور از پیچیدگی‌های روابط عددی که قادر به پیش‌بینی مقدار همگرایی راهروهای معادن زغال‌سنگ باشد، می‌تواند مورد استقبال جامعه معدنکاری قرار گیرد.

۲- معدن زغال‌سنگ تزره

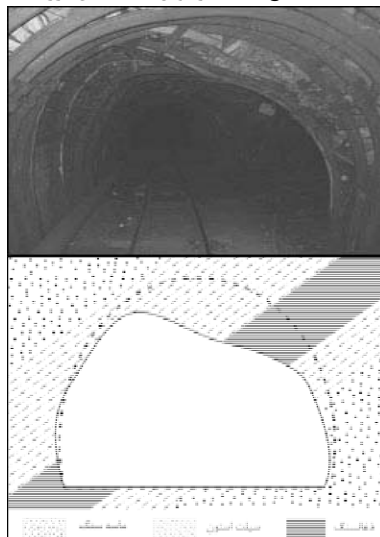
معدن تزره در فاصله ۵۰ کیلومتری شمال غربی شاهرود قرار دارد. این مجموعه زغال‌دار، در طول ۲۶/۵ کیلومتر و عرض ۱/۵ کیلومتر از سطح منطقه گسترش یافته است. در این منطقه، لایه‌های زغال‌سنگ دارای شیب ۳۵ تا ۵۰ درجه هستند ضخامت لایه زغال‌سنگ در این راهرو ۴۵ تا ۷۵ سانتی‌متر است. کمربالای لایه‌های زغال‌سنگ را ماسه‌سنگ‌های دانه‌ریز تا دانه‌درشت کوارتزار با ساختمان لایه‌ای به همراه سیلت‌استون و آرژیلیت با ساختمان یکنواخت، تشکیل می‌دهند. کمرپایین لایه‌های زغال‌سنگ نیز عموماً شامل سیلت‌استون و بندرت ماسه‌سنگ و آرژیلیت است. تشکیلات زغال‌دار نیز از تناوب ماسه‌سنگ، سیلت‌استون، آرژیلیت و لایه‌های زغال تشکیل شده است. این لایه‌ها به علت عدم یکنواختی در برابر فشارهایی که از بالا و پایین بر آنها وارد شده، دچار شکستگی‌های مختلف شده است. در این مقاله، راهروی K21 از معدن مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. انتخاب این راهرو به دلیل در دسترس بودن اطلاعات کامل این راهرو نسبت به سایر راهروها و همچنین

تشابه مشخصات هندسی - مکانیکی این راهرو با سایر راهروها بوده است. خصوصیات ژئومکانیکی زغال سنگ، کمربالا و کمرپایین راهروی K21 در جدول ۱ ارائه شده است.

مساحت مقاطع و با کاربرد رابطه ۱ و همچنین با استفاده از روابط مربوط به راهروهای معادن زغال آلمان (رابطه ۲) [۱۳] محاسبه و نتایج حاصل در جدول ۲ نشان داده شده است.



الف- مقطع BM1 از تونل K1 معدن تزره



ب- مقطع BM2 از تونل K1 معدن تزره

شکل ۱: شبیه سازی مقاطع

$$K = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100 \quad (1)$$

$$K = -78 + 0.666H + 4.3mK_f + 7.7\sqrt{10K_f} \quad (2)$$

در این روابط،

K: همگرایی نهایی راهرو

A₁: سطح مقطع اولیه (بر مبنای مشخصات هندسی قاب) بر

حسب متر مربع

جدول ۱: پارامترهای ژئومکانیکی زغال سنگ، کمربالا و کمرپایین راهروی K21 [۱۱]

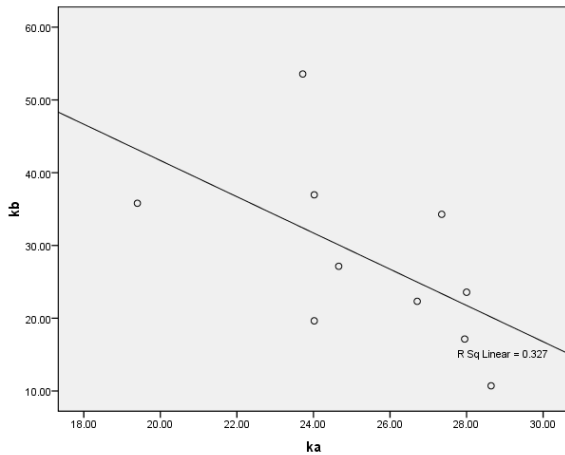
پارامتر	واحدها	کمر بالا	زغال سنگ	کمر پایین
مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر	MPa	۳۰	۲۸	۳۰
ضریب صدمه دیدگی ^۸	---	۰/۸	۰/۸	۰/۸
مقاومت برشی ذاتی	MPa	۰/۲۷	۰/۲۶	۰/۲۷
زاویه اصطکاک داخلی	درجه	۳۱/۲۹	۳۰/۷۷	۳۱/۲۹
مقاومت کششی توده سنگ	MPa	-۰/۰۳۶	-۰/۰۳۳	-۰/۰۳۶
مقاومت فشاری توده سنگ	MPa	۲/۲۱	۲/۰۶	۲/۲۱
مدول تغییر شکل توده سنگ	MPa	۹۱۰	۹۷۰	۹۱۰

۳- تعیین میزان همگرایی راهرو K21 با استفاده از اندازه گیری های میدانی و روابط موجود

پدیده همگرایی در راهروها ناشی از جابجایی سقف، کف و دیواره های آن است و بر پایداری راهرو شدیداً تأثیرگذار است. با محاسبه میزان جابجایی، می توان فشار اعمال شده بر سیستم نگهداری را پیش بینی و از آن طریق سیستم نگهداری مناسبی طرح نمود [۱۲].

به منظور مطالعه عوامل مؤثر در تغییر شکل راهرو و ارائه مدلی برای تخمین میزان همگرایی، تعداد ۱۰ ایستگاه انتخاب و با علامت های اختصاری BM1 تا BM10 نامگذاری شده است. سطح مقطع راهرو در محل هر ایستگاه به روش اخراج عمود برداشت شده است. مساحت تمام مقاطع با توجه به اطلاعات برداشتی و با استفاده از شبیه سازی انجام شده در نرم افزار AutoCad که نمونه ای از آن در شکل ۱ مشاهده می شود، محاسبه شده است. سطح مقطع اولیه نیز بر مبنای مشخصات هندسی قاب (سطح مقطع قاب ارائه شده از سوی تولیدکننده) بدست آمده است. میزان همگرایی راهرو با بررسی تغییر

چنان که مقایسه نتایج در شکل ۲ نشان می‌دهد، بین مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده همگرایی نهایی راهرو، همبستگی بالایی وجود ندارد.



شکل ۲: مقایسه مقادیر محاسبه شده (k_a) و اندازه‌گیری شده (k_b)

بنابراین می‌توان گفت که استفاده از رابطه ۲ که برای پیش‌بینی همگرایی راهروهای معادن زغال‌سنگ و سپس طراحی قاب فولادی کشویی بکار می‌رود، در مورد راهرو K21 معدن تزره اعتبار ندارد.

۴- پارامترهای تأثیرگذار در همگرایی

برای تصحیح رابطه ۲، فرض شده که عوامل و شرایط زیر در تعیین همگرایی راهروی K21 تأثیرگذار باشند:

(۱) عمق راهرو (H)

(۲) ضخامت لایه زغال‌سنگ (m)

(۳) شرایط سنگ‌های کف راهرو (K_f)

(۴) شیب لایه زغال‌سنگ (a)

به نظر می‌رسد شیب لایه در محاسبه همگرایی نهایی راهرو تأثیرگذار است. شیب لایه زغال‌سنگ در راهرو K21 تزره از ۳۷ تا ۵۰ درجه متغیر است. منظور نشدن پارامتر اثر شیب در رابطه ۲ یکی از عوامل عدم ایجاد همبستگی در شکل ۲ است.

(۵) زمان استخراج (t)

از آنجا که برداشت در زمانی صورت گرفته که کارگاه‌های اطراف راهرو کاملاً استخراج شده‌اند، به نظر می‌رسد فاصله زمانی بین اتمام استخراج کارگاه‌های اطراف راهرو تا زمان برداشت، بر میزان همگرایی تأثیرگذار باشد. این پارامتر نیز در رابطه ۲ منظور نشده است.

(۶) شرایط تخریب (s)

A_2 : سطح مقطع ثانویه (برداشت‌شده) بر حسب متر مربع
 K_f : ضریبی است که مقدار آن تابع سنگ‌های کف راهرو است و بر اساس جدول ۳ بدست می‌آید.

K_t : ضریبی است که مقدار آن تابع سیستم نگهداری کارگاه استخراج مجاور راهرو است و از جدول ۴ بدست می‌آید.

H : عمقی که راهرو در آن واقع شده بر حسب متر

m : ضخامت لایه زغال‌سنگ بر حسب متر

جدول ۲: مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده پارامتر همگرایی

(K) در راهرو K21 معدن تزره

مقادیر همگرایی		ایستگاه
مقادیر اندازه‌گیری شده (%)	مقادیر محاسبه شده (%)	
۳۵/۸	۱۹/۴	BM1
۲۷/۱۴	۲۴/۶۶	BM2
۱۹/۶۴	۲۴/۰۲	BM3
۵۳/۵۷	۲۳/۷۲	BM4
۳۶/۹۶	۲۴/۰۲	BM5
۱۰/۷۱	۲۸/۶۴	BM6
۱۷/۱۴	۲۷/۹۵	BM7
۲۳/۵۷	۲۸	BM8
۲۲/۳۲	۲۶/۷۱	BM9
۳۴/۲۸	۲۷/۳۵	BM10

جدول ۳: اندازه ضریب K_f در شرایط مختلف [۱۳]

K_f	نوع سنگ سقف
۱	ماسه سنگ
۲	شیل ماسه‌ای
۳	شیل
۴	سنگ‌های بشدت تغییر شکل یافته
۵	زغال‌سنگ
۶	زغال‌سنگ + شیل + سنگ‌های تغییر شکل یافته

در شرایط مختلف [۱۳] K_t جدول ۴: اندازه ضریب

K_t	سیستم نگهداری کارگاه استخراج مجاور راهرو
۱	مواد تراکم یافته مثل انیدریت و یا بتن
۲	جرزهای چوبی
۳	پرکردن دستی

شرایط تخریب نیز بر همگرایی تاثیرگذار است. کارگاه‌های اطراف راهرو پس از استخراج تخریب شده‌اند و بنابراین شرایط مربوط به سیستم نگهداری در رابطه ۲ (ضریب K_f) برقرار نیست؛ در نتیجه پارامتر جدیدی که شرایط تخریب نیز در آن بیان شده باشد، مطابق جدول ۵ پیشنهاد شده است. در جدول ۶ مقادیر مختلف عوامل فوق، برای مقاطع برداشتی BM1 تا BM10 نشان داده شده است.

جدول ۵: شرایط سیستم نگهداری کارگاه‌های استخراج مجاور راهرو

شرایط نگهداری کارگاه استخراج اطراف راهرو	s
تخریب کامل	۷
تخریب ناقص همراه با انباشتگی کمتر از ۵۰٪	۶
تخریب ناقص همراه با انباشتگی ۵۰ تا ۷۰٪	۵
تخریب ناقص همراه با انباشتگی بیشتر از ۷۰٪	۴
پر کردن با مواد خشک به روش دستی	۳
پر کردن با مواد خشک به روش مکانیکی	۲
پر کردن با مواد مرطوب	۱

در رگرسیون خطی چندگانه، داده‌ها باید نمونه‌ای تصادفی از جامعه باشند. فرض لازم آن است که رابطه بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل، خطی باشد و همچنین برای هر یک از ترکیب‌های مقادیر متغیرهای مستقل، توزیع مقادیر متغیر وابسته نرمال بوده و واریانس آن ثابت باشد [۱۴].

قبل از برآورد ضرایب، باید مطمئن شد که متغیرهای مستقل، رابطه‌ای خطی با متغیرهای وابسته دارند؛ در غیر این صورت باید داده‌ها به نحوی تغییر یابند که رابطه خطی برقرار شود. شکل ۳ ماتریسی از نمودارهای پراکنش را بین متغیرهای مستقل و وابسته مربوط به اطلاعات جمع‌آوری شده از راهرو K21 معدن تزره نشان می‌دهد. در این ماتریس، پراکنش رابطه دو به دو متغیرها نشان داده شده و همانطور که دیده می‌شود k_b رابطه‌ای نامشخص با متغیرهای H ، k_f ، s ، t و m دارد.

جدول ۶: شرایط سیستم نگهداری کارگاه‌های استخراج مجاور راهرو

ایستگاه	s	kf	a (deg)	m (cm)	H (m)	t (year)
BM1	۵	۱	۴۰	۵۰	۱۰۰	۱۷
BM2	۴	۱	۳۷	۶۵	۱۰۵	۱۶
BM3	۶	۱	۴۳	۶۰	۱۰۵	۱۶
BM4	۵	۱	۴۷	۵۵	۱۰۷	۱۴
BM5	۵	۱	۵۰	۶۰	۱۰۵	۱۳
BM6	۶	۱	۴۰	۷۰	۱۱۰	۱۱
BM7	۵	۱	۴۲	۷۵	۱۰۸	۱۰
BM8	۵	۱	۳۷	۶۵	۱۱۰	۱۱
BM9	۵	۱	۴۴	۷۰	۱۰۹	۱۲
BM10	۵	۱	۳۸	۶۰	۱۱۰	۱۳

در شکل ۴ ماتریس نمودار پراکنش که بعد از تغییر دادن مقیاس اندازه‌گیری متغیرهای k_f ، H ، s ، t و m بدست آمده، نشان داده شده است. تبدیل داده‌ها نسبتاً موثر بوده و دیده می‌شود که k_b در ستون خود با متغیرهای m ، s ، $\cos a$ ، t و $\ln t$ رابطه خطی قابل قبولی دارد.

همگرایی نهایی راهرو می‌تواند با استفاده از مقادیر پارامترهای مؤثر بر همگرایی نهایی راهرو که در جدول ۶ بیان شده و همچنین فرمی از معادلات رگرسیون خطی چندگانه که توسط معادله ۳ نشان داده شده، محاسبه شود. معادله رگرسیون خطی چندگانه‌ای است که برای محاسبه میزان همگرایی بکار برده شده، توسط رابطه ۴ نشان داده شده است.

$$k_b = f(H, m, \cos a, s, t) \quad (3)$$

$$k_b = B_0 + B_1 H + B_2 m + B_3 \cos a + B_4 k_f + B_5 s + B_6 t \quad (4)$$

معادله رگرسیون خطی چندگانه (رابطه ۴) بجای یک عرض از مبدأ و یک ضریب رگرسیون، دارای یک مقدار ثابت و ۶ ضریب

$m.s$	- ۲۹/۸۳	۰/۳۷
Lnt	- ۱/۹۴	۰/۲۳
Cosa	- ۷۸/۱۵	۰/۸۶
RS	۰/۷۱	----
خطای تخمین استاندارد	۸/۹۴	----

با استفاده از ضرایب متغیرهای مستقل، معادله رگرسیون به صورت زیر برآورد می‌شود:

$$K_b = 23.16 \times k_f \cdot \sqrt{H} - 29.83 \times m.s - 1.94 \times Lnt - 78.15 \times cosa - 54.22 \quad (5)$$

که در آن،

K_b : همگرایی نهایی راهرو (بر حسب درصد)

H : عمق راهرو (بر حسب متر)

m : ضخامت لایه زغال سنگ (بر حسب متر)

t : فاصله زمانی بین اتمام استخراج کارگاه‌های اطراف راهرو تا زمان برداشت (بر حسب سال)

a : شیب لایه زغال سنگ (بر حسب درجه)

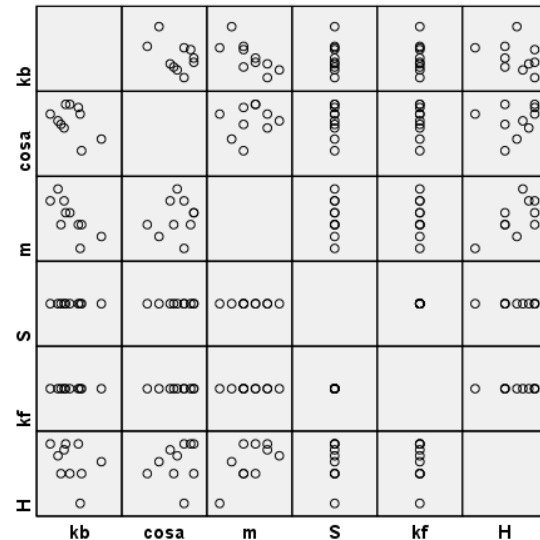
s : پارامتر مربوط به شرایط تخریب و نوع سیستم نگهداری کارگاه‌های اطراف راهرو که از جدول ۵ بدست می‌آید.

در جدول ۸ میزان همگرایی پیش‌بینی شده توسط مدل جدید ارائه شده، مقدار اندازه‌گیری شده و باقیمانده (تفاوت بین مقدار اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده) آنها برای هر یک از ایستگاه‌ها نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در ایستگاه BMI مقدار اندازه‌گیری شده (K_b) برابر ۳۵/۸۰ و مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیون (PRE) برابر ۳۷/۴۱ است؛ بنابراین باقیمانده آن برابر با ۱/۶۱- است (باقیمانده‌ها در ستون RES دیده می‌شود). این مقدار منفی است؛ یعنی مقدار اندازه‌گیری شده کوچکتر از مقدار پیش‌بینی شده همگرایی توسط مدل است. اگر باقیمانده‌ها به‌گونه‌ای استاندارد شود که میانگین آنها صفر و انحراف معیار آنها برابر ۱ گردد، می‌توان در مورد بزرگی نسبی آنها بحث کرد.

جدول ۸: میزان همگرایی پیش‌بینی شده توسط مدل جدید،

همگرایی اندازه‌گیری شده و باقیمانده‌های رگرسیون خطی مدل

ایستگاه	PRE	Kb	RES	ZRE	SRE	P
BM 1	۳۷/۴۱	۳۵/۸۰	-۱/۶۱	-۰/۱۸	-۰/۴۹	۰/۶۴
BM 2	۱۸/۳۳	۲۷/۱۴	۸/۸۱	۰/۹۹	۱/۶۲	۰/۱۷
BM 3	۳۱/۰۴	۱۹/۶۴	-۱۱/۴۰	-۱/۲۸	-۱/۵۸	۰/۱۸
BM 4	۴۴/۸۷	۵۳/۵۷	۸/۷۰	۰/۹۷	۱/۳۴	۰/۲۴



شکل ۴: ماتریس نمودار پراکنش داده‌ها بعد از تبدیل

۵- ارائه مدل همگرایی

نتایج تحلیل رگرسیون خطی چندگانه در جدول ۷ نشان داده شده است.

پارامتری که در جدول ۷ با RS نشان داده شده، بیانگر ضریب همبستگی بین مقدار مشاهده شده متغیر وابسته و مقدار پیش‌بینی شده آن از روی مدل رگرسیون است. اگر مقدار این پارامتر ۱ باشد، نشان‌دهنده آن است که از روی متغیرهای مستقل می‌توان بطور کامل مقدار متغیر وابسته را پیش‌بینی کرد. مقدار صفر به این معنی است که متغیرهای مستقل رابطه خطی با متغیر وابسته ندارند. مقدار ۰/۷۱ برای این پارامتر بیانگر این مطلب است که ۷۱ درصد از پراکندگی مشاهده شده در همگرایی نهایی راهرو K21 تزه، توسط چهار متغیر مستقل $k_f \cdot \sqrt{H}$ ، Lnt و cosa توجیه می‌شود. این نشان می‌دهد که مدل رگرسیون خطی حاضر بخوبی می‌تواند برای پیش‌بینی میزان همگرایی استفاده شود.

رابطه خطی بین متغیرهای مستقل توسط شاخصی اندازه‌گیری می‌شود که رواداری^{۱۰} نامیده می‌شود. رواداری کمتر از ۰/۱ بیانگر وجود ترکیب خطی بین یک متغیر با سایر متغیرهای مستقل و عدم صحت مدل رگرسیون خطی است. در جدول ۷ این مقدار از ۰/۲۳ تا ۰/۸۶ برای مدل ارائه شده تغییر می‌کند.

جدول ۷: نتایج تحلیل رگرسیون خطی چندگانه

رواداری	مقدار ضرایب	پارامتر
----	- ۵۴/۲۲	مقدار ثابت
۰/۳۵	۲۳/۱۶	$k_f \cdot \sqrt{H}$

۰/۸۲	-۰/۲۴	-۰/۱۶	-۱/۴۱	۳۶/۹۶	۳۸/۳۷	BM 5
۰/۳۰	-۱/۱۵	-۱/۰۱	-۹/۰۲	۱۰/۷۱	۱۹/۷۳	BM 6
۰/۳۹	۰/۹۵	۰/۵۷	۵/۱۱	۱۷/۱۴	۱۲/۰۳	BM 7
۰/۸۸	-۰/۱۶	-۰/۱۲	-۱/۰۷	۲۳/۵۷	۲۴/۶۴	BM 8
۰/۹۸	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۲۲	۲۲/۳۲	۲۲/۱۰	BM 9
۰/۸۰	۰/۲۶	۰/۱۹	۱/۶۸	۳۴/۲۸	۳۲/۶۰	BM10

برای محاسبه باقیمانده استاندارد شده (در جدول ۸ با نام ZRE نشان داده شده است)، باقیمانده اندازه‌گیری شده به انحراف معیار برآورد شده باقیمانده‌ها (مقدار خطای تخمین استاندارد در جدول ۷ که برابر با ۸/۹۴ است) تقسیم می‌شود. اگر توزیع باقیمانده‌ها تقریباً نرمال باشد، تقریباً باید ۹۵ درصد باقیمانده‌های استاندارد شده بین ۲- تا ۲+ قرار گرفته و ۹۹ درصد آنها در فاصله ۲/۵۸- تا ۲/۵۸+ قرار بگیرند. نمونه‌هایی که باقیمانده‌های استاندارد آنها در این محدوده قرار نمی‌گیرند، غیر معمول هستند. همانطور که در ستون ZRE جدول ۸ مشاهده می‌شود، شرایط گفته‌شده برای مدل ارائه‌شده صادق است و مدل از این دیدگاه، برازش خوبی دارد.

در محاسبه باقیمانده استاندارد شده، تمام باقیمانده‌های اندازه‌گیری شده، بر عدد ثابتی تقسیم می‌شود. در حالی که پراکندگی پیش‌بینی شده، برای تمام نقاط ثابت نیست، بلکه به مقدار متغیر مستقل نیز بستگی دارد. نمونه‌هایی که مقدار متغیر مستقل آنها نزدیک به میانگین نمونه‌ها است در مقایسه با نمونه‌هایی که مقادیر آنها از میانگین فاصله دارد، دارای پراکندگی کمتری در مقادیر پیش‌بینی شده هستند. باقیمانده‌های استیودنت شده^{۱۱} تفاوت بین پراکندگی نقاط را نیز در بر می‌گیرند. باقیمانده استیودنت شده با تقسیم باقیمانده مشاهده شده به برآوردی از انحراف معیار آن باقیمانده در نقطه مربوط بدست می‌آید (باقیمانده‌های استیودنت شده در جدول ۸ با SRE نشان داده شده است).

این باقیمانده، مشاهده عدم صحت فرض‌ها را راحت‌تر می‌کند، به همین دلیل به باقیمانده استاندارد شده ترجیح داده می‌شود. اگر فرض‌های رگرسیون صادق باشند، جهت محاسبه احتمال مشاهده باقیمانده‌ی استیودنت شده (که در جدول ۸ با نماد P نشان داده شده است) که قدر مطلق مقدار آن حداقل به بزرگی مقدار اندازه‌گیری شده باشد، می‌توان از توزیع t استفاده کرد که درجه آزادی آن برابر با تعداد نمونه‌ها منهای تعداد ضرایب (شامل عرض از مبدأ) است. اگر این احتمال کمتر از ۰/۰۵ باشد، می‌توان اطمینان حاصل کرد که این باقیمانده غیر محتمل است [۱۴]. با توجه به جدول این احتمال برای مدل وجود ندارد.

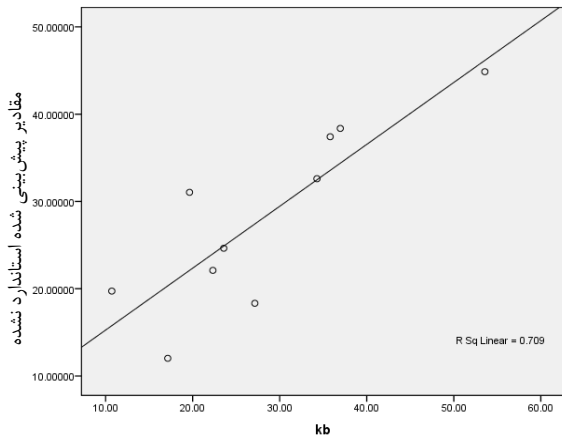
۶- اعتبار سنجی مدل

اگر فرض‌های لازم برای تحلیل رگرسیون صادق باشد، باقیمانده‌ها باید مشخصات زیر را داشته باشند:

- توزیع آنها باید تقریباً نرمال باشد.
- واریانس آنها باید برای تمام مقادیر متغیر مستقل، ثابت باشد.
- نمودار باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده نباید از الگوی خاصی پیروی کند.
- باقیمانده‌ها باید تقریباً مستقل از یکدیگر باشند.
- بنابراین در اینجا لازم است شروط فوق بررسی شوند.

۶-۱- بررسی نرمال بودن

نمودار جعبه‌ای^{۱۲} برای مقایسه توزیع‌ها بکار برده شده است. در این نمودار هر توزیع توسط یک کادر مستطیلی نمایش داده می‌شود که طول آن به دامنه بین چارکی^{۱۳} بستگی دارد. از هر طرف مستطیل، خطی بنام ویسکر^{۱۴} به طرف بزرگترین و کوچکترین مقادیر متغیر کشیده می‌شود. مقادیر خارج از آن به- عنوان مقادیر انتهایی یا پرت^{۱۵} در نظر گرفته می‌شود. یک مقدار پرت، مقداری است که بیشتر از یک و نیم برابر مستطیل از انتهای مستطیل فاصله دارد، در حالی که مقدار انتهایی^{۱۶}، مقداری است که بیشتر از سه برابر مستطیل از انتهای مستطیل فاصله دارد. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده، برای مدل ارائه‌شده، میانه در وسط نمودار قرار نگرفته است؛ بنابراین توزیع آن قرینه نیست، ولی همانطور که مشاهده می‌شود، هیچ مقدار پرتی وجود ندارد. در صورتی که باقیمانده‌ها از توزیع t پیروی کنند، نقاط بایستی نزدیک خط مستقیم قرار بگیرند. طبق شکل ۶ (نمودار Q-Q) می‌توان گفت که باقیمانده مدل از توزیع t پیروی می‌کند و تنها دو مقدار آن از خط برازش شده، فاصله دارند.



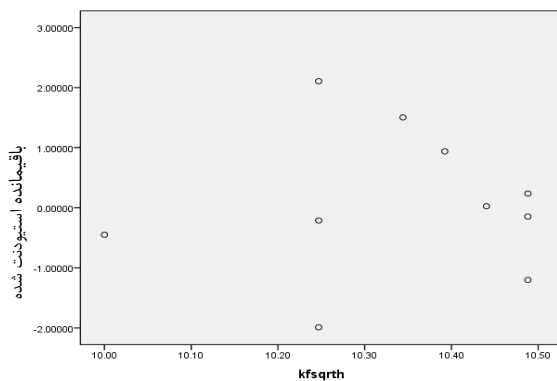
شکل ۷: نمودار پراکنش مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده مربوط به همگرایی نهایی راهرو با کاربرد رابطه ۵



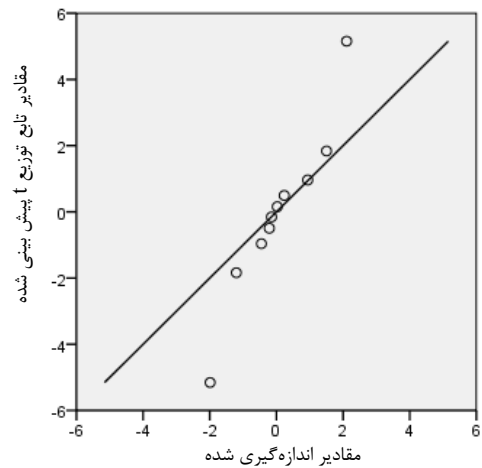
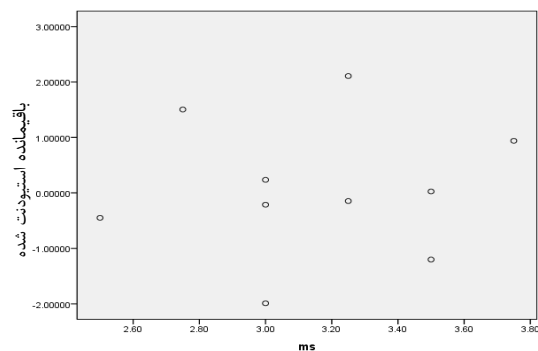
شکل ۵: نمودار مستطیلی باقیمانده‌های رابطه ۵

۳-۶- بررسی خطی بودن متغیر مستقل و وابسته

شرط اینکه مدل رگرسیون صحیح باشد این است که در نمودار باقیمانده‌ها بر حسب مقادیر متغیرهای مستقل در مدل، الگویی مشاهده نشود؛ در غیر این صورت ممکن است رابطه بین متغیر وابسته و مستقل، خطی نباشد. همانطور که در شکل‌های ۸ تا ۱۱ مشاهده می‌شود، برای مدل ارائه‌شده (رابطه ۵) الگوی خاصی مشاهده نمی‌شود.



شکل ۸: عدم ارتباط باقیمانده‌ها و متغیر مستقل $k_f \sqrt{H}$



شکل ۶: نمودار $Q-Q$ باقیمانده‌های رابطه ۵

۲-۶- بررسی ثابت بودن واریانس

برای هر مقدار اندازه‌گیری شده همگرایی نهایی، دامنه‌ای از مقادیر پیش‌بینی شده مشاهده می‌شود. اگر فرض ثابت بودن واریانس صادق باشد، این مقادیر باید برای تمام مقادیر مشاهده شده یکی باشند. با توجه به این موضوع و بر اساس شکل ۷ می‌توان نتیجه گرفت که برای مدل ارائه‌شده، واریانس نمونه‌ها تقریباً ثابت است.

تشابه مشخصات هندسی- مکانیکی این راهرو با سایر راهروها، ارائه شده است. برای این منظور ابتدا پارامترهای مؤثر بر همگرایی شامل عمق راهرو، ضخامت لایه زغال سنگ، شرایط سنگ‌های کف راهرو، شیب لایه زغال سنگ، زمان استخراج و شرایط تخریب تعیین شد. سپس معادلات رگرسیون خطی چندگانه با کاربرد کلیه پارامترهای تأثیرگذار در همگرایی به- گونه‌ای که رابطه‌ای خطی بین پارامترهای مستقل و پارامتر وابسته برقرار باشد، برای تعریف رابطه همگرایی بکار برده شد. در نهایت رابطه ارائه شده، با بررسی داده‌ها از لحاظ نرمال بودن، ثابت بودن واریانس و خطی بودن رابطه متغیر مستقل و وابسته، اعتبارسنجی شد. مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده همگرایی توسط مدل ارائه شده در این مقاله و مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد که مدل ارائه شده بخوبی قادر به تعیین میزان همگرایی در راهروی مورد نظر است. از این رابطه تجربی می‌توان برای برآورد میزان همگرایی راهروهای معادن زغال سنگ که در آنها لایه زغال سنگ دارای شیب‌های متفاوتی باشد، استفاده نمود.

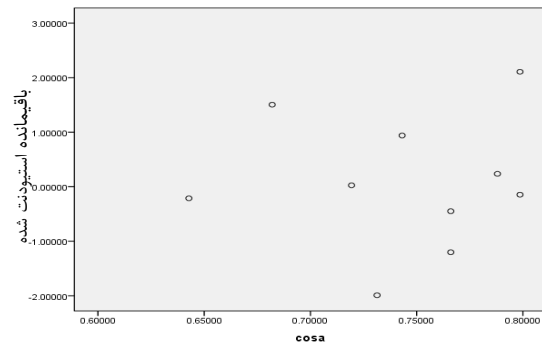
۸- تقدیر و تشکر

از معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه شاهرود بخاطر تأمین اعتبارات این طرح تقدیر و تشکر بعمل می‌آید.

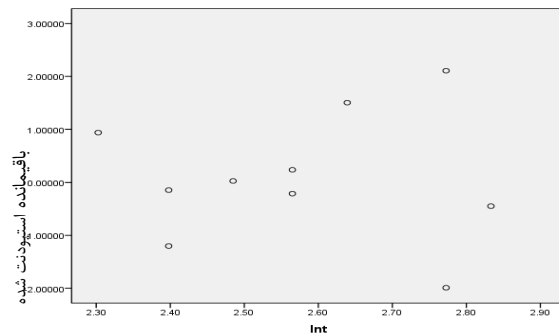
مراجع

- [1] Panet, M.; 1982; *Analysis of Convergence Behind the Face of a Tunnel*, Tunnelling 82, Institution of Mining & Metallurgy, London, pp. 197-204.
- [2] Guenot, A.; Panet, M.; Sulem, J.; 1985; *A New Aspect in Tunnel Closure Interpretation*, 26th US Symposium on Rock Mechanics, pp. 455-460.
- [3] Sulem, J.; Panet, M.; Guenot, A.; 1987; *Closure Analysis in Deep Tunnels*, International journal of rock mechanics and mining sciences, pp. 145-154.
- [4] Filcek, H., Kwasniewski, M. A., 1993; *Fundamentals of Mine Roadway Support Design: Rock-Support Interaction Analysis*, Comprehensive rock engineering, 1st Edition, Vol. 2, Pergamon Press, London.
- [5] Hoek, E.; Marinos, P., 2000; *Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses-Part I*, Tunnels and Tunnelling International.
- [6] Divsalar, D.; Dolinar, S.; Pollara, F.; 2001; *Iterative turbo decoder analysis based on density evolution*, IEEE J. Selected Areas Commun., vol. 19, pp. 891-907.
- [7] Jongpradist, P. et al.; 2004; *Rock mass deformational behaviors during the excavation of the large-scale NATM cavern in soft sedimentary formation*, J. Geotech. Eng., JSCE, No. 764, pp. 1-10.

شکل ۹: عدم ارتباط باقیمانده‌ها و متغیر مستقل $m.S$



شکل ۱۰: عدم ارتباط باقیمانده‌ها و متغیر مستقل $cosa$



شکل ۱۱: عدم ارتباط باقیمانده‌ها و متغیر مستقل Lnt

۷- نتیجه

با محاسبه میزان همگرایی راهرو که ناشی از جابجایی سقف، کف و دیواره‌های آن است، می‌توان فشار اعمال شده بر سیستم نگهداری را پیش‌بینی و از آن طریق طراحی مناسبی برای سیستم نگهداری ارائه نمود. تاکنون مدل‌های تحلیلی و عددی متنوعی به منظور تعیین میزان همگرایی راهروهای معدنی ارائه شده است. با این حال ارائه یک مدل ساده و تجربی که به دور از پیچیدگی‌های روابط عددی قادر به پیش‌بینی مقدار همگرایی راهروهای معادن زغال سنگ باشد، می‌تواند توجه معدنکاران قرار گیرد. در این مقاله، با بررسی‌ها و اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شده، مشخص شد که روابط ریاضی موجود برای پیش‌بینی همگرایی راهروهای معادن زغال سنگ، برای تعیین میزان همگرایی راهروهای معدن تزره قابل کاربرد نیستند، بنابراین رابطه‌ای برای برآورد دقیق‌تر میزان همگرایی در راهروهای معدن تزره با تمرکز بر روی راهروی K21 معدن تزره (به دلیل در دسترس بودن اطلاعات کامل این راهرو نسبت به سایر راهروها و

بی‌نوشت

-
1. Convergence
 2. Back Analysis
 3. Maxwell
 4. Burgers
 5. Kelvin
 6. Hoek & Marinos
 7. Antiga
 8. Disturbance factor
 9. Partial regression coefficients
 10. Telorance
 11. Studentized
 12. Box plots
 13. Interquartile range
 14. Whisker
 15. Outlier
 16. Extreme

[8] Antiga, A., Chiorboli, M., Coppola, P.; 2007; *Convergence-confinement method: limit of application of the closed form solutions compared with numerical models*. ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Tunnelling, Vienna.

[9] OCANA, J. G. S.; 2008; *Estudio de la Convergencia por Fluencia de Tuneles Circulares en Medios Viscoelastic Plastic*, Tesis Doctoral, University Polutecnica de Madrid.

[10] Oraee, K. et al., 2009; *Coal Pillar Strength Based On The Ground Reaction Curve- A New Approach*, 28th International Conference on Ground Control in Mining, p. 4.

[۱۱] دفتر نظارت، (۱۳۸۸)، گزارش زمین شناسی منطقه طزره.

[۱۲] دهقان بنادکی، محمد مهدی؛ (۱۳۷۹)؛ "همگرایی و کنترل

آن در راهروها"؛ انتشارات دانشگاه شاهرود، چاپ اول.

[13] Biron, C.; Arioglu, E.; 1983; *Design of Support in Mines*, John Wiley & Sons Inc.

[۱۴] فتوحی، الف و اصغری، ف؛ (۱۳۸۷)؛ "کتاب آموزشی

آنالیز آماری داده‌ها با SPSS 15"؛ کانون نشر علوم، تهران.