

ارزیابی عددی تاثیر لایه کلیدی بر میزان نشست ناشی از معدن کاری جبهه کار طولانی مکانیزه

مهدی نجفی^{۱*}؛ ابوالفضل دلیرنسب^۲؛ مهدی نوروزی^۳

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

۲- دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشگاه یزد

۳- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳

چکیده

جنس لایه‌های بالایی کارگاه استخراج یکی از عواملی است که بر میزان نشست سطح زمین اثرگذار است. در حین معدن کاری ناپایداری لایه کلیدی نقش اساسی در نشست زمین ایفا می‌نماید. از این رو شناسایی لایه کلیدی اصلی از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف اصلی این تحقیق ارزیابی تأثیر پارامترهای مختلف هندسی و مقاومتی لایه کلیدی شامل فاصله نسبت به جبهه کار استخراج شده، زاویه، ضخامت و مقاومت آن بر میزان نشست سطح زمین بر اساس روش تفاضل محدود و با استفاده از نرم افزار *FLAC3D* است. نتایج مدل‌های عددی بررسی شده نشان داده است با افزایش فاصله لایه کلیدی از بالای کارگاه استخراج شده، میزان نشست به طور مستقیم افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه لایه کلیدی نسبت به کارگاه استخراج میزان نشست کاهش و گودی پروفیل نشست غیر متقارن شده و به سمت پایه‌های زغالی متمایل می‌شود که باعث کاهش میزان نشست حداکثر می‌شود. علاوه بر این با افزایش ضخامت و مقاومت آن، توانایی لایه کلیدی در جذب جابه‌جایی‌های بیشتر شده و دچار شکست نمی‌شود و این خود دلیلی است تا میزان نشست کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی

مدل سازی عددی، نشست زمین، لایه کلیدی، جبهه کار طولانی

۱- مقدمه

هر میزان پیش‌بینی نشست دقیق‌تر باشد بهتر می‌توان از آسیب‌های احتمالی وارده به سازه‌های سطحی و محیط زیست جلوگیری نمود. پارامترهای زیادی بر میزان نشست اثرگذار هستند که می‌توان به جنس و طبیعت لایه‌های دربرگیرنده، ارتفاع کارگاه استخراج، عمق روباره، تنش‌های برجا، روش پرکردن فضاهای استخراج شده، سرعت معدن کاری، شیب لایه، عرض فضای استخراج و زمان اشاره نمود [۲]. ۳ و ۹]. همان‌طور که بیان شد، یکی از پارامترهای اثرگذار بر نشست، جنس و طبیعت لایه‌های دربرگیرنده است. در این بین ترتیب و توالی طبقات لایه‌های دربرگیرنده نقش مهمی در میزان نشست سطح زمین ایفا می‌کنند. به عنوان نمونه در صورتی که طبقات فوقانی سخت و مقاوم باشند، در مرکز گودی پروفیل نشست کمتری رخ خواهد داد. نقطه عطف در فاصله بیشتری از لبه‌های کارگاه استخراج قرار خواهد داشت. منحنی‌های تغییر شکل سطح زمین یکنواخت‌تر و

موضوع نشست در معدن کاری جبهه کار طولانی زغال سنگ از حدود دو قرن پیش تاکنون مورد توجه محققان بوده است و یکی از چالش‌های مهم مهندسی در مناطق شهری و معدنی بوده است [۱]. نشست یک تغییر شکل وابسته به زمان توپوگرافی سطح زمین است که بر اثر حرکت روباره موجود بر روی فضاهای خالی مانند فضاهای ایجاد شده معدن کاری زیرزمینی و یا استخراج لایه‌های زغال سنگ به وجود می‌آید. این پدیده یکی از پیامدهای اجتناب‌ناپذیر استخراج لایه‌های زغال سنگ به خصوص در روش جبهه کار طولانی است [۲] و [۳]. روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی نشست حاصل از معدن کاری جبهه کار طولانی زغال سنگ مورد استفاده قرار گرفته است که از این جمله می‌توان روش‌های گرافیکی، تابع تاثیر، تابع پروفیل، روش‌های هوشمند، مدل‌های فیزیکی و روش‌های عددی بیان نمود [۴-۸]. به

است. نتایج بررسی‌های وی نشان داده است که لایه کلیدی مانند یک تیر طره‌ای در قسمت بالایی عمل می‌نماید که به راحتی شکسته نمی‌شود. این عامل باعث تمرکز تنش بر وسایل نگهداری در ورودی‌ها می‌شود [۱۴]. زو (*Xiu*) و همکاران به بررسی اثر شکست لایه کلیدی بر توزیع تنش‌های پایه‌ای در روش جبهه کار طولانی پرداخته‌اند. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داده است که تنش‌های پایه‌ای در اطراف لایه کلیدی و سقف بلاواسطه به صورت یکنواخت توزیع نمی‌شوند و شکست لایه کلیدی سبب افزایش این تنش‌ها بر روی بخش پایه‌های زغالی می‌گردد و بر روی نشست زمین اثر می‌گذارد [۱۵]. ژبو و زی (*Xiu and Xu*) با استفاده از نرم‌افزار *UDEC* به تحلیل دوبعدی اثر لایه کلیدی بر توزیع تنش‌های پایه‌ای در روش جبهه کار طولانی پرداخته‌اند. نتایج بدست آمده نشان داده است که ضخامت لایه کلیدی تاثیر بسزایی بر حداکثر مقدار تنش‌ها دارد [۱۶]. نکته قابل توجه این است که تاکنون در زمینه مدل‌سازی عددی تاثیر لایه کلیدی بر میزان نشست تحقیق مستقلاً انجام نشده است.

هدف اصلی این تحقیق ارزیابی عددی تاثیر لایه کلیدی بر میزان نشست بر اساس روش تفاضل محدود و با استفاده از نرم‌افزار *FLAC3D* است. برای این منظور تاثیر پارامترهای لایه کلیدی شامل فاصله از کارگاه استخراج، ضخامت، زاویه و مشخصات مقاومتی لایه کلیدی بر پروفیل نشست و جابه‌جایی مورد بررسی و بحث قرار گرفته است.

۲- مدل‌سازی عددی

به منظور ارزیابی عددی تاثیر لایه کلیدی سناریوهای مختلفی از وضعیت لایه کلیدی مطرح شده است و برای هر کدام وضعیت نشست بررسی شده است. به منظور مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار تفاضل محدود *FLAC3D* استفاده شده است. ابعاد مدل هندسی در نظر گرفته شده شامل ۲۵۰ متر عرض، ۲۵۰ متر طول و ۲۰۰ متر ارتفاع است. ارتفاع لایه‌ی زغال سنگ ۳ متر، طول و عرض کارگاه استخراج ۲۰۰ متر در نظر گرفته شده و فرض شده است که کارگاه استخراج در عمق ۲۰۰ متری سطح زمین قرار گرفته است. مدل هندسی ایجاد شده در نرم‌افزار در شکل ۱ نشان داده شده است.

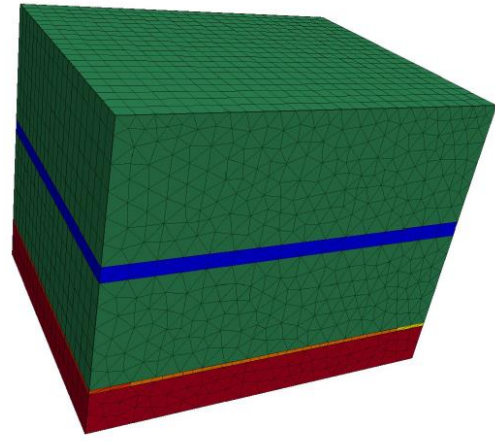
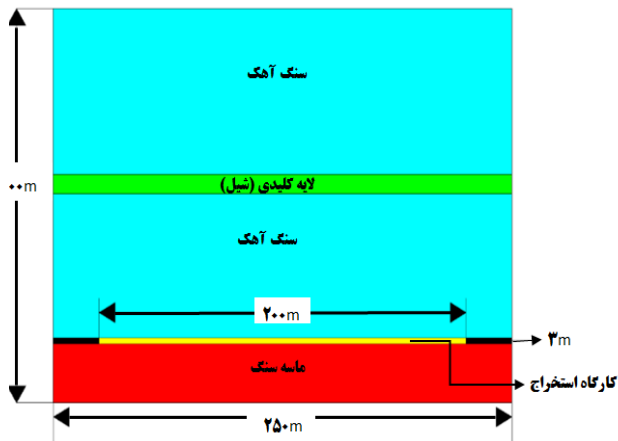
ملازم‌تر خواهند بود و در نهایت نشست تاخیری بیشتر خواهد شد. در مورد طبقات نرم و ضعیف، وضعیت نشست و جابه‌جایی‌ها بر عکس خواهد بود [۲]. روشن است که خصوصیات سنگ و ساختار زمین‌شناسی به صورت گسترده بر روی حرکت لایه‌های پوشاننده تاثیر می‌گذارد. برای درک آسان حرکات لایه‌های پوشاننده در اثر معدن کاری تئوری لایه‌ی کلیدی توسط کی‌یان (*Qian*) و همکاران در سال ۱۹۹۶ میلادی ارائه شده است [۱۰]. لایه‌ای که حرکت بخشی یا تمام روباره را کنترل می‌کند لایه‌ی کلیدی (*Key Stratum*) (لایه‌ی اصلی) نامیده می‌شود. در هر معدن یک لایه کلیدی داریم و سایر لایه‌های بعدی لایه کلیدی فرعی محسوب می‌شوند. در حین عملیات معدن کاری ناپایداری لایه کلیدی عامل اصلی نشست سطح زمین است و با شکست این لایه سایر لایه‌ها می‌شکنند و جابه‌جایی به سطح زمین منتقل می‌شود. از این رو شناسایی لایه کلیدی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. موقعیت (شناخت) لایه کلیدی در سه مرحله می‌توان تعیین نمود [۱۱]:

مرحله اول: اعمال کردن قوانین سختی: توان مقاومتی لایه کلیدی در مقابل خمش بیشتر از لایه‌های زیرین است که به این معنا است که تغییر شکل لایه کلیدی هماهنگ با لایه‌های زیرین نبوده و بار اعمالی پوشاننده توسط لایه‌های زیرین نگهداری نمی‌شود.

مرحله دوم: اعمال قوانین تنش: فواصل شکسته شده لایه کلیدی بزرگ‌تر از لایه‌های سخت زیرین است. فواصل شکست هر لایه‌ی سخت می‌تواند با استفاده از مدل تیر دو سرگیردار محاسبه شود.

مرحله سوم: تعیین موقعیت لایه کلیدی با مقایسه فواصل شکسته شده برای هر لایه سخت.

همان‌طور که بیان شد روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی میزان نشست ارائه شده است. از میان روش‌های بیان‌شده، روش‌های عددی به دلیل امکان در نظر گرفتن کلیه عوامل تاثیرگذار بر میزان نشست بیشتر مورد استفاده محققان قرار گرفته‌اند و مدل‌های عددی زیادی در زمینه‌ی جبهه کار طولانی به منظور بررسی میزان نشست انجام شده است [۱۸، ۱۳، ۱۲-۶]. در زمینه موضوع مورد تحقیق، تحقیقات بر روی مدل‌سازی فیزیکی نشست متمرکز شده است. یوو (*Yu*) با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و تجزیه و تحلیل‌های نظری به بررسی اثر لایه کلیدی بر تخریب سقف در روش استخراج جبهه کار طولانی با تخریب زغال سنگ بالایی (*Top coal caving*) پرداخته



شکل ۱: مدل عددی ایجاد شده در نرم افزار FLAC3D

مدل، استخراج کارگاه (۱۵۰ متر استخراج شده است) و مدل سازی تخریب است. خصوصیات ماده شبیه سازی تخریب به نحوی در نظر گرفته شده است که با مواد تخریب شده از سقف یکسان باشد. پس از استخراج پهنه ها به منظور مدل سازی تخریب و شرایط به تعادل رساندن مدل، از خاکی با مدول و چسبندگی پایین بر اساس جدول ۱ استفاده شده تا فضای خالی ناشی از استخراج پهنه ها را پر نماید. برای به حداکثر رساندن جابجایی در این نوع خاک مدل رفتاری موهر کلمب بر آن اعمال شده است. بر اساس نظریه سالامون، تخریب هنگامی کامل شده است که فشرده شدن مواد تخریب شده به اندازه نصف ضخامت لایه برسد [۱۷]. لازم به ذکر است پس از شبیه سازی تخریب مدل عددی ایجاد شده به تعادل می رسد.

۳- تحلیل نتایج

پس از حل هر کدام از مدل های عددی، جهت بررسی تأثیر پارامترهای مختلف هندسی و مقاومتی بر پروفیل نشست، میزان جابجایی قائم (نشست) به صورت عرضی (در جهت محور X) و طولی (در جهت محور Y) اندازه گیری و منحنی نشست برای هر حالت ترسیم شده است. لازم به ذکر است منحنی های ارایه شده برای تمام مدل ها برای یک نقطه خاص است ($Y=75\text{ m}$) است. از این رو نشست های بیان شده حداکثر نیست و مقدار نشست حداکثر در پروفیل طولی آورده شده است.

۳-۱- تأثیر فاصله لایه کلیدی از کارگاه استخراج

یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار لایه کلیدی بر منحنی نشست، پارامتر فاصله لایه نسبت به کارگاه استخراجی است. برای این منظور ۵ گروه مدل عددی که در آن فاصله لایه کلیدی از کارگاه استخراج به ترتیب ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ متر است ایجاد شده است. شکل ۲ فواصل مختلف لایه کلیدی در نظر گرفته شده را نشان می دهد.

در شکل ۳ نمودارهای نشست مربوط به فاصله لایه کلیدی از کارگاه استخراج نشان داده شده است.

در نرم افزار *FLAC3D* پس از ساخت مدل هندسی باید خواص مواد و مصالح به مدل اعمال گردد. برای این منظور ۴ زون مختلف با خواص متفاوت شامل سنگ آهک، شیل، زغال سنگ و ماسه سنگ در نظر گرفته شده است. در جدول ۱ پارامترهای ژئومکانیکی اعمال شده به لایه های مختلف نشان داده شده است. لازم به ذکر است جنس لایه کلیدی از شیل و مدل رفتاری در نظر گرفته شده برای تمامی لایه ها از نوع موهر کولمب است.

پس از تخصیص خواص به قسمت های مختلف مدل هندسی ایجاد شده، مرزهای جانبی مدل در دو جهت طولی و عرضی ثابت و فقط در جهت ارتفاع اجازه ی جابجایی به مدل داده شده است. شایان ذکر است که برای پایداری مدل کف مدل باید در سه جهت طول، عرض و ارتفاع ثابت بماند.

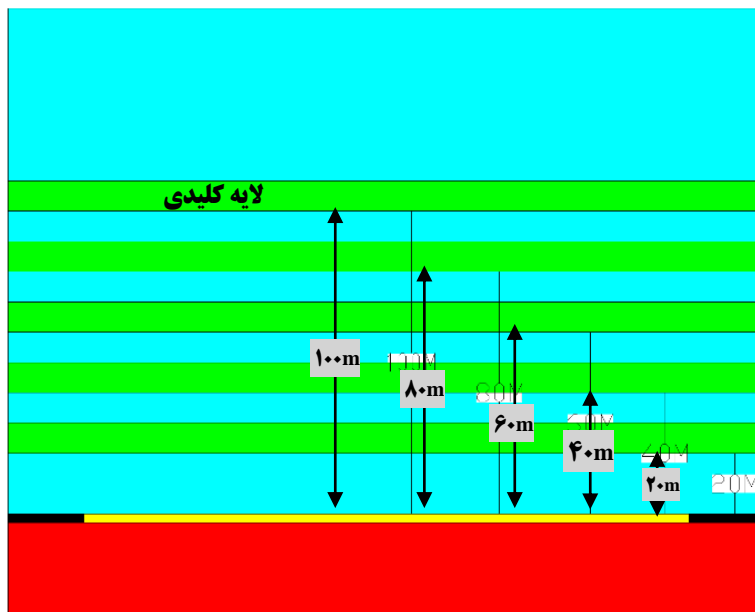
جدول ۱: پارامترهای ژئومکانیکی اعمال شده به لایه های

مختلف سنگ

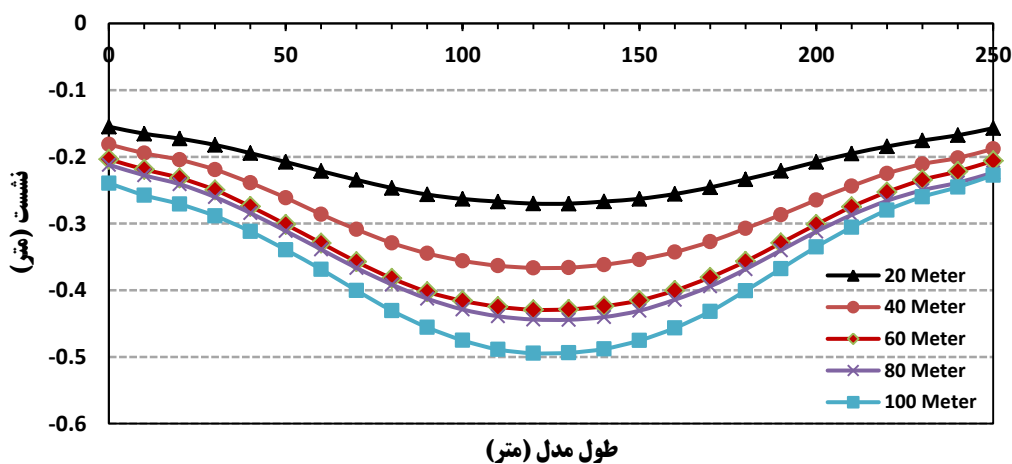
نام لایه	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	مدول برشی (GPa)	مدول حجمی (GPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (MPa)
سنگ آهک	۲۶۰۰	۱/۲۹	۲/۶۵	۳۶	۰/۷
شیل	۲۷۰۰	۱/۰۷	۱/۵۶	۳۲/۱	۳/۴
زغال سنگ	۱۶۰۰	۰/۲۷	۰/۵۱	۲۰	۰/۵
ماسه سنگ	۲۷۲۰	۲/۴۸	۶/۱۵	۲۷/۸	۱/۲
خصوصیات شبیه سازی تخریب	۱۵۰۰	۰/۷	۱	۱۸	۰/۵

پس از تخصیص خواص به قسمت های مختلف مدل هندسی ایجاد شده، مرزهای جانبی مدل در دو جهت طولی و عرضی ثابت و فقط در جهت ارتفاع اجازه ی جابجایی به مدل داده شده است. شایان ذکر است که برای پایداری مدل کف مدل باید در سه جهت طول، عرض و ارتفاع ثابت بماند.

حل مدل عددی در این مقاله شامل ۳ بخش تعادل اولیهی



شکل ۲: فواصل مختلف لایه کلیدی نسبت به کارگاه استخراج (۲۰ و ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ متر)



شکل ۳: تاثیر فاصله لایه کلیدی از کارگاه استخراج بر میزان نشست زمین (پروفیل عرضی)

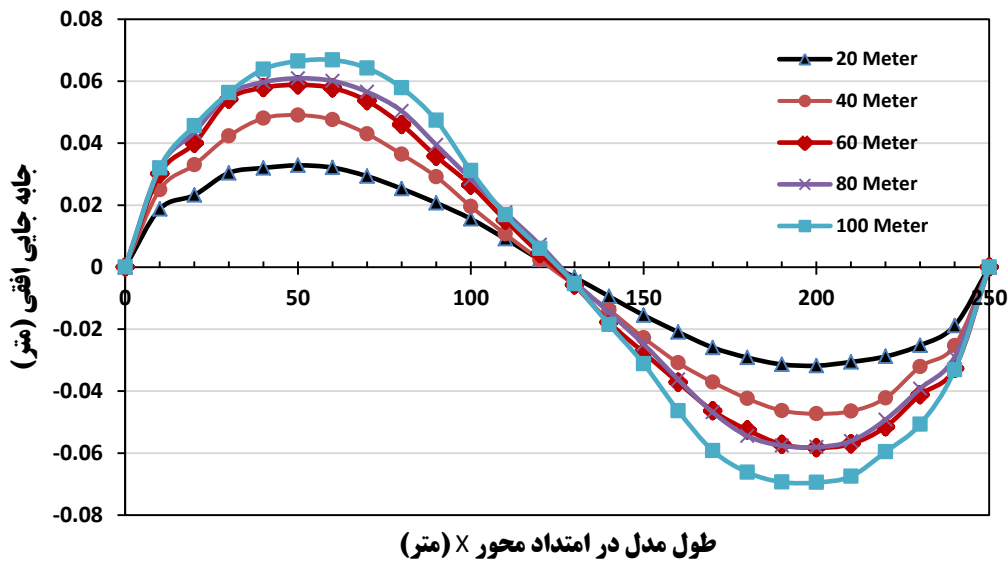
انتقال می‌یابند.

در شکل ۴ تاثیر افزایش فاصله لایه کلیدی از کارگاه استخراج بر پروفیل جابه‌جایی افقی نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است هرچه فاصله لایه کلیدی کمتر باشد منحنی پروفیل جابه‌جایی دارای انحنای یکنواخت‌تر می‌باشد. این موضوع با استفاده از بررسی اختلاف بین بیشترین مقدار و کمترین مقدار جابجایی طولی آورده شده در جدول ۲ نیز مشخص است. هرچه فاصله لایه کلیدی نسبت به کارگاه استخراج کمتر باشد این اختلاف کمتر است که این موضوع نشان می‌دهد که پروفیل نشست یکنواخت‌تر شده و نشست کمتری در سطح زمین رخ داده است.

با توجه به شکل ۳ روشن است با افزایش فاصله لایه کلیدی از کارگاه استخراج شده، میزان نشست افزایش یافته است. به عبارت دیگر فاصله لایه کلیدی نسبت به میزان نشست رابطه مستقیم دارد. زیرا هرچه لایه کلیدی در فاصله کمتری از جبهه کار قرار داشته باشد اجازه انتقال جابه‌جایی‌ها را به سطح زمین نمی‌دهد و بیشتر جابه‌جایی با رسیدن به لایه کلیدی متوقف می‌شوند (در صورتی که لایه کلیدی دچار شکست نگردد) از این رو میزان نشست زمین کاهش می‌یابد. از طرفی هر چه فاصله لایه کلیدی دورتر باشد، با استخراج کارگاه، سقف به راحتی دچار ریزش شده و فضای استخراجی را پر می‌کند و جابه‌جایی‌ها نیز به راحتی به سطح زمین

جدول ۲: بیشینه و کمینه مقدار جابجایی افقی و اختلاف آن برای فواصل مختلف لایه کلیدی نسبت به کارگاه استخراج

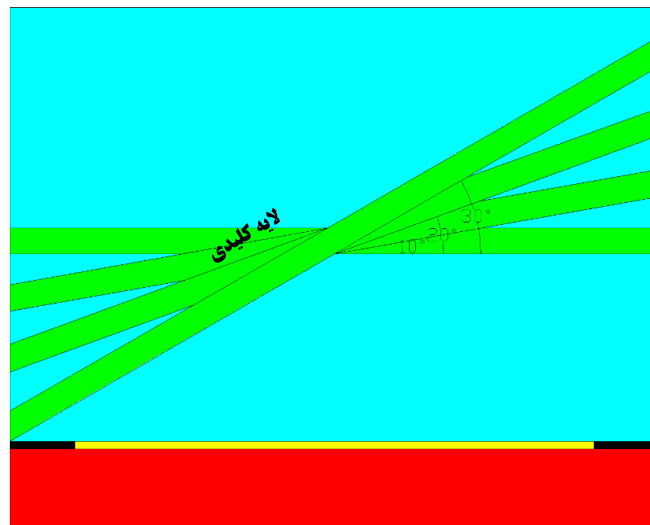
فاصله لایه کلیدی از کارگاه استخراج (متر)	بیشترین مقدار جابجایی افقی (متر)	کمترین مقدار جابجایی افقی (متر)	اختلاف جابجایی (متر)
۲۰	۰/۰۳۳	-۰/۰۳۲	۰/۰۶۴
۴۰	۰/۰۵	-۰/۰۴۷	۰/۰۹۶
۶۰	۰/۰۵۹	-۰/۰۵۸	۰/۱۱
۸۰	۰/۰۶	-۰/۰۵۸	۰/۱۲
۱۰۰	۰/۰۶۷	-۰/۰۶۹	۰/۱۳



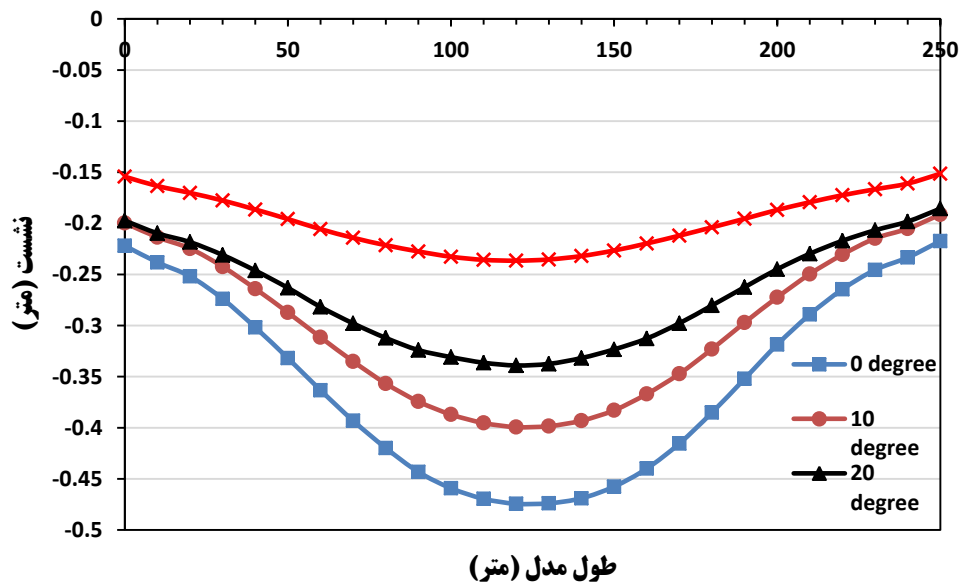
شکل ۴: تأثیر فاصله لایه کلیدی نسبت به کارگاه استخراج بر پروفیل طولی جابجایی افقی

۳-۲- تأثیر زاویه لایه کلیدی نسبت به کارگاه استخراج
 برای بررسی تاثیر شیب لایه کلیدی بر مقدار نشست سطح زمین، زاویه‌های صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه برای لایه کلیدی در نظر گرفته شده و مدل‌های عددی آن ایجاد شده است. شکل ۵ چگونگی در نظر گرفتن لایه‌های کلیدی نسبت به کارگاه استخراج را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است به دلیل این‌که نتایج بدست آمده تحت

تأثیر اغتشاشات ناشی از برخورد لایه کلیدی با کارگاه استخراج و سطح زمین قرار نگیرد، زاویه‌های در نظر گرفته شده به گونه‌ای انتخاب شده است که سطح زمین و لایه زغال سنگ استخراج شده را قطع نکند. نتایج تاثیر زاویه لایه کلیدی بر میزان نشست در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵: زوایای مختلف لایه کلیدی در نظر گرفته شده در مدل سازی عددی (زاویه صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه)

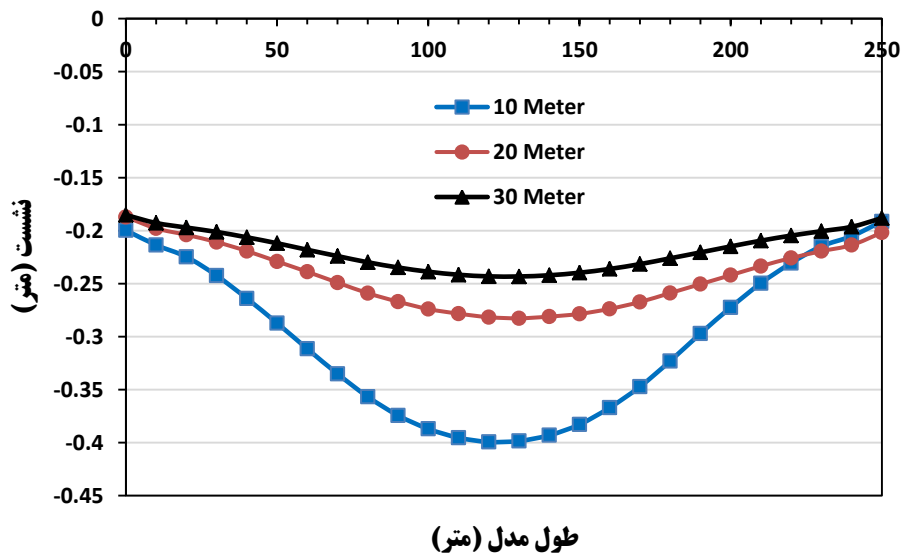


شکل ۶: تاثیر زاویه لایه کلیدی بر میزان نشست زمین

۳-۳- تاثیر ضخامت لایه کلیدی

یکی دیگر از پارامترهای مهم و تاثیرگذار لایه کلیدی بر پروفیل نشست، ضخامت لایه کلیدی است. برای این منظور، ۳ ضخامت برای لایه کلیدی با ضخامت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متر مدل سازی شده و سپس پروفیل نشست آن ترسیم شده است. در شکل ۷ منحنی های نشست مربوط به ضخامت های مختلف لایه کلیدی نشان داده شده است.

همان طور که از شکل ۶ مشخص است با افزایش زاویه لایه کلیدی نسبت به کارگاه استخراج شده، میزان نشست کاهش یافته است. علت اصلی این موضوع این است که با افزایش زاویه لایه کلیدی، گودی پروفیل نشست غیرمتمایل شده و به سمت پایه های زغالی متمایل می شود که این علت باعث کاهش میزان نشست حداکثر می شود.



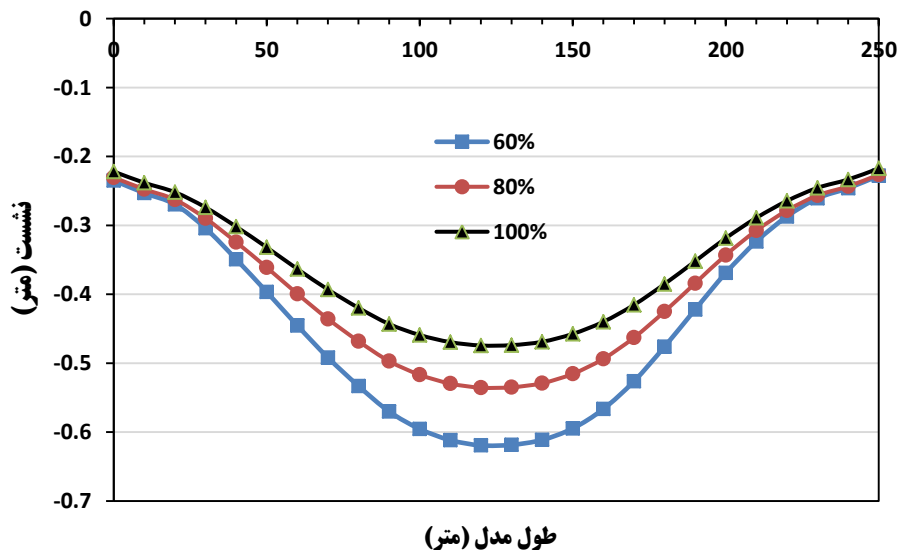
شکل ۷: تاثیر ضخامت لایه کلیدی بر میزان نشست زمین

کلیدی میزان نشست کاهش یافته به عبارت دیگر میزان نشست با مقاومت لایه کلیدی نسبت عکس دارد. لایه کلیدی در معدن- کاری زیرزمینی مانند یک تیر دو سر گیردار عمل می کند که هرچه مقاومت آن بیشتر باشد مانع از رسیدن نشست به سطح زمین می شود. علاوه بر این در شکل ۹ تاثیر افزایش مقاومت لایه کلیدی بر جابه جایی افقی برای مقاومت های مختلف لایه کلیدی نشان داده شده است. بر اساس نمودارهای شکل مذکور، بیشینه و کمینه مقدار جابه جایی افقی در جدول ۳ نشان داده شده است. بر اساس نتایج بیان شده روشن است که با کاهش مقاومت لایه کلیدی، جابه جایی افقی افزایش می یابد و هرچه مقاومت لایه کلیدی بیشتر شود منحنی جابه جایی دارای انحنای یکنواخت تر است. نکته قابل توجه دیگر که از جدول ۳ می توان دریافت این است که منحنی جابه جایی حالت تقارن ندارد و بیشینه مقادیر جابه جایی با هم تفاوت دارند که نشان از تاثیر زاویه لایه کلیدی بر مقادیر جابه جایی دارد.

همان طور که از شکل ۷ مشخص است با افزایش ضخامت لایه کلیدی، میزان نشست کاهش یافته است. به عبارت دیگر هرچه ضخامت لایه بیشتر می شود، به دلیل مقاومت بیشتر توانایی آن در جذب جابجایی های ایجاد شده در سطح زمین بیشتر شده و مانع از رسیدن جابجایی زیاد به سطح زمین می گردد.

۳-۴- تاثیر مقاومت لایه کلیدی

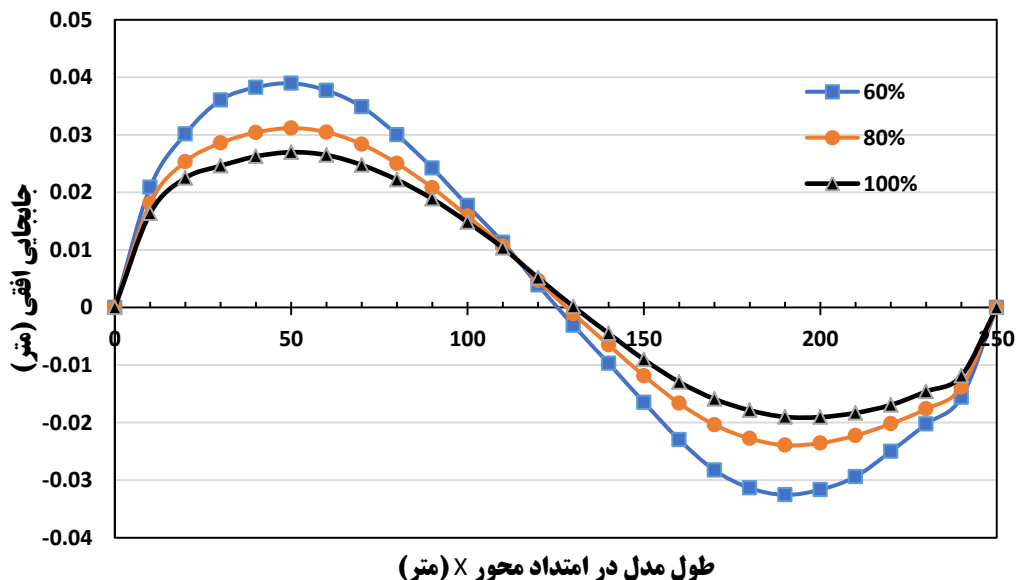
پارامتر مهم دیگری که پروفیل نشست را تحت تاثیر قرار می دهد، جنس لایه کلیدی و به عبارتی دیگر مقاومت لایه کلیدی است. برای این منظور در این تحقیق مقاومت لایه کلیدی به ترتیب ۸۰ و ۶۰ درصد مقاومت نهایی آن در نظر گرفته و تأثیرات آن بر روی پروفیل نشست و جابه جایی افقی ایجاد شده، مورد بررسی قرار گرفته شده است. شکل ۸ منحنی های نشست مربوط به مقاومت های مختلف لایه کلیدی را نشان می دهد. با توجه به شکل ۸ مشخص است با افزایش مقاومت لایه کلیدی



شکل ۸: تاثیر مقاومت لایه کلیدی بر میزان نشست (۶۰ درصد مقاومت، ۸۰ درصد مقاومت و ۱۰۰ درصد مقاومت)

جدول ۳: بیشینه و کمینه مقدار جابجایی افقی و اختلاف آن‌ها در مقاومت‌های مختلف لایه کلیدی در زاویه ۳۰ درجه

مقدار مقاومت لایه کلیدی نسبت به حالت اولیه (درصد)	بیشترین مقدار جابجایی افقی (متر)	کمترین مقدار جابجایی افقی (متر)	اختلاف جابه‌جایی (متر)
۶۰	۰/۰۳۸۹۹۵	-۰/۰۳۲۵۶	۰/۰۷۱۵۱۶
۸۰	۰/۰۳۱۱۶۷	-۰/۰۲۳۹۴	۰/۰۵۵۱۰۲
۱۰۰	-۰/۰۲۶۹۷۳	-۰/۰۱۹۰۵	۰/۰۴۶۰۲۴



شکل ۹: تاثیر افزایش مقاومت لایه کلیدی بر جابجایی افقی (طولی) سطح زمین برای زاویه ۳۰ درجه

پروفیل طولی نشست برای نقاطی که در موقعیت $X=125\text{ m}$ واقع شده‌اند صورت پذیرفت که نمودارهای مربوط به آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰ می‌توان بیان نمود با افزایش

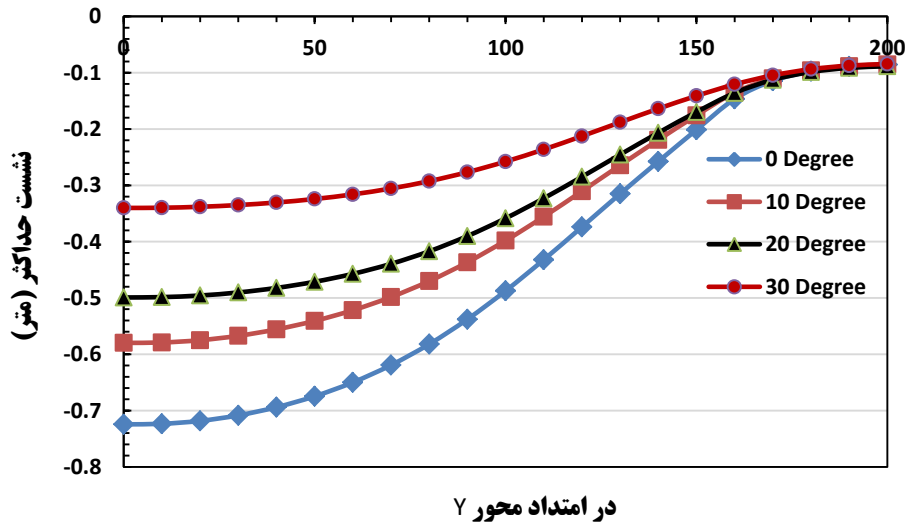
۴- بررسی پروفیل طولی نشست

به منظور بررسی تاثیر لایه کلیدی بر پروفیل طولی نشست (در جهت محور Y)، در این تحقیق فقط به بررسی تاثیر زاویه لایه کلیدی بر

زاویه لایه

است که با افزایش زاویه لایه کلیدی منطقه با نشست حداکثر افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه منطقه با حداکثر نشست برای زاویه صفر درجه حدود ۱۰ متر و برای زاویه ۳۰ درجه در حدود ۳۰ متر است.

کلیدی سطح بحرانی کاهش می‌یابد و مقدار نشست بر روی منطقه استخراج‌نشده کاهش می‌یابد. علاوه بر این نکته قابل توجه دیگر این



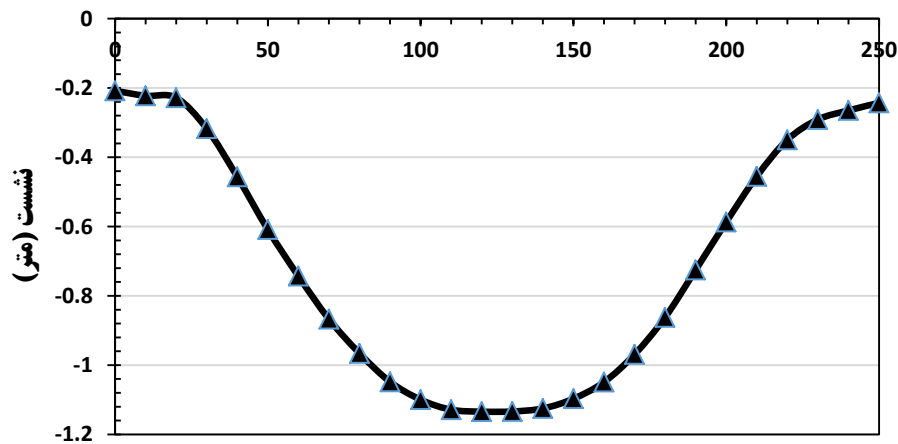
شکل ۱۰: بررسی تاثیر زاویه لایه کلیدی بر پروفیل طولی نشست در امتداد محور Y

کلیدی باعث شده است تا نشست افزایش چشم‌گیری پیدا نماید (بیشتر از ۲ برابر) و به مقدار ۱/۱۳ متر برسد. علت اصلی این موضوع این است که دیگر لایه کلیدی وجود ندارد تا مانع از گسترش جابه‌جایی‌ها به سطح زمین شود و براحتی نشست به سطح زمین منتقل می‌شود.

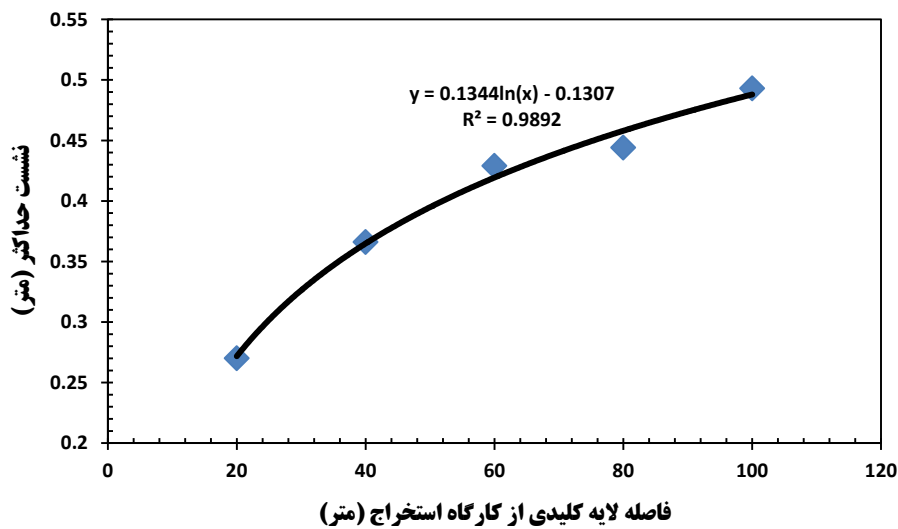
نمودارهای مربوطه به ارتباط بین هر کدام از پارامترهای لایه کلیدی و نیز نشست حداکثر در شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ ترسیم شده است.

۴- بحث

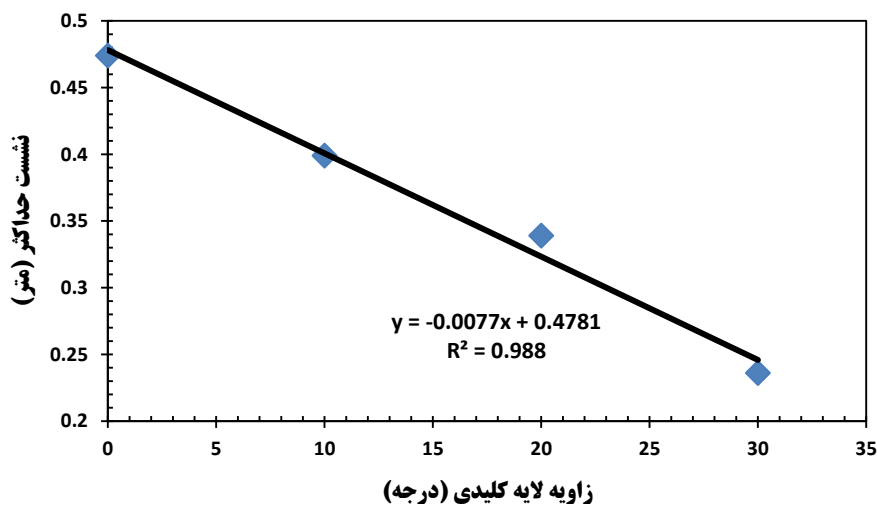
در این بخش به بررسی میزان نشست بدون لایه کلیدی و نیز ارتباط و میزان تاثیر بین هر کدام از پارامترهای لایه کلیدی و نشست حداکثر پرداخته شده است. به منظور بررسی نقش لایه کلیدی در میزان نشست، نمودار نشست بدون در نظر گرفتن لایه کلیدی در شکل ۱۱ ترسیم شده است. با توجه به شکل مذکور روشن است که حذف لایه



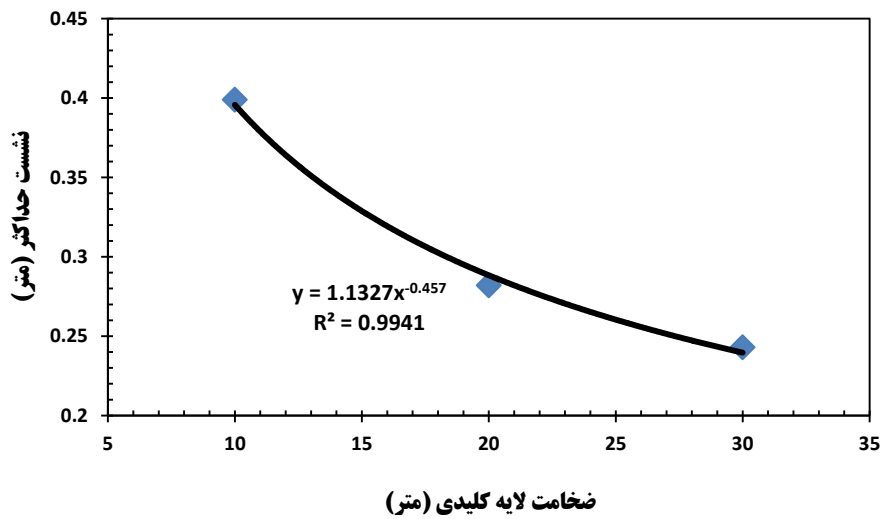
شکل ۱۱: بررسی میزان نشست بدون لایه کلیدی
طول مدل در امتداد محور X (متر)



شکل ۱۲: ارتباط بین فاصله لایه کلیدی از کارگاه استخراج و نشست حداکثر



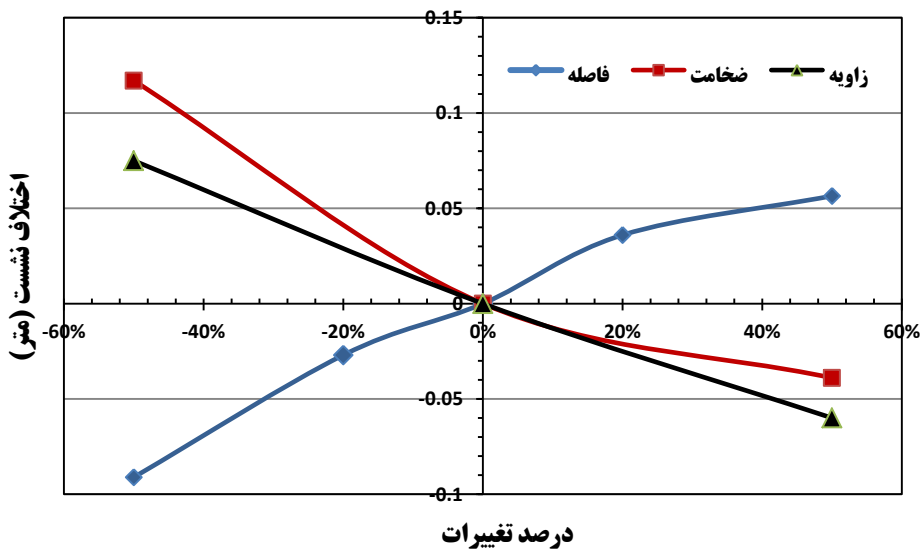
شکل ۱۳: ارتباط بین زاویه لایه کلیدی و نشست حداکثر



شکل ۱۴: ارتباط بین زاویه لایه کلیدی و نشست حداکثر

به دلیل آگاهی از با اهمیت ترین پارامتر لایه کلیدی، در شکل ۱۵ به بررسی میزان تاثیر پارامترهای لایه کلیدی بر میزان نشست پرداخته است. با توجه به شکل ۱۵ می توان بیان نمود که افزایش زاویه لایه کلیدی اثر بیشتری نسبت به افزایش سایر پارامترها بر میزان نشست دارد. همچنین کاهش ضخامت لایه تاثیر بیشتری بر میزان نشست نسبت به کاهش دو پارامتر دیگر دارد.

با توجه به شکل های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ می توان دریافت که ارتباط بین فاصله لایه کلیدی از کارگاه استخراج، زاویه لایه کلیدی و ضخامت آن با نشست حداکثر به ترتیب به صورت لگاریتمی، خطی و توانی است و به صورتی است که R^2 از ۹۸ درصد بالاتر است. همچنین می توان بیان نمود که نشست حداکثر با فاصله لایه کلیدی از کارگاه استخراج نسبت مستقیم و با زاویه و ضخامت لایه کلیدی نسبت عکس دارد.



شکل ۱۵: بررسی درصد تاثیر پارامترهای لایه کلیدی بر میزان نشست

پارامترهای مقاومتی بر میزان نشست زمین مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس مدل های عددی انجام شده مهم ترین نتایج به شرح زیر است: - نتایج مدل های عددی با در نظر گرفتن لایه کلیدی و بدون آن نشان داد که حذف لایه کلیدی باعث می شود مقدار نشست حداکثر

۶- نتیجه گیری

شناسایی لایه کلیدی در هر منطقه از اهمیت بسزایی برخوردار است و تاثیر زیادی بر میزان نشست در آن منطقه دارد. در این تحقیق تاثیر پارامترهای مختلف لایه کلیدی از جمله پارامترهای هندسی و

با افزایش ضخامت لایه کلیدی نسبت به کارگاه استخراج شده، میزان نشست کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر هرچه ضخامت لایه بیشتر می‌شود، توانایی آن در جذب جابجایی‌های ایجاد شده در سطح زمین بیشتر شده و مانع از رسیدن جابجایی زیاد به سطح زمین می‌گردد.

با افزایش مقاومت لایه کلیدی میزان نشست کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر میزان نشست با مقاومت لایه کلیدی نسبت عکس دارد. لایه کلیدی در معدن کاری زیرزمینی مانند یک تیر دو سر گیردار عمل می‌کند که هرچه مقاومت آن بیشتر باشد مانع از رسیدن نشست به سطح زمین می‌شود.

از بین پارامترهای لایه کلیدی بررسی شده، افزایش زاویه لایه کلیدی اثر بیشتری نسبت به افزایش ضخامت و فاصله لایه کلیدی از کارگاه استخراج دارد. علاوه بر این کاهش ضخامت لایه تاثیر بیشتری بر میزان نشست نسبت به کاهش دو پارامتر دیگر دارد.

به بیش از ۲ برابر مقدار آن (با در نظر گرفتن لایه کلیدی) یعنی به میزان ۱/۱۳ متر برسد.

با افزایش فاصله لایه کلیدی از کارگاه استخراج شده، میزان نشست افزایش یافته، به عبارت دیگر فاصله لایه کلیدی نسبت به میزان نشست رابطه مستقیم دارد. زیرا هرچه لایه کلیدی در فاصله کمتری از جبهه کار قرار داشته باشد اجازه انتقال جابه‌جایی‌ها را به سطح زمین نمی‌دهد و بیشتر جابه‌جایی با رسیدن به لایه کلیدی متوقف می‌شوند از این رو میزان نشست زمین کاهش می‌یابد.

با افزایش زاویه لایه کلیدی نسبت به کارگاه استخراج شده، میزان نشست حداکثر کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر هرچه زاویه لایه کلیدی نسبت به کارگاه استخراج بیشتر شود، گودی نشست غیر متقارن شده و به سمت پایه‌های زغالی متمایل می‌شود که این علت باعث کاهش میزان نشست شده است.

۷- منابع‌ها

- [1] Salmi, E. F., Nazem, M., & Karakus, M. (2017). Numerical analysis of a large landslide induced by coal mining subsidence. *Engineering Geology*, 217, 141-152.
- [2] Peng, S. S., Ma, W. M., & Zhong, W. L. (1992). *Surface subsidence engineering*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- [3] Kratzsch, H. (2012). *Mining subsidence engineering*. Springer Science & Business Media.
- [4] Shahriar, K., Amoushahi, S., & Arabzadeh, M. (2009). Prediction of surface subsidence due to inclined very shallow coal seam mining using FDM.
- [5] Asadi, A., Shakhriar, K., & Goshtasbi, K. (2004). Profiling function for surface subsidence prediction in mining inclined coal seams. *Journal of mining science*, 40(2), 142-146.
- [6] Huang, G., Kulatilake, P. H., Shreedharan, S., Cai, S., & Song, H. (2017). 3-D discontinuum numerical modeling of subsidence incorporating ore extraction and backfilling operations in an underground iron mine in China. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(2), 191-201.
- [7] Tomás, R., Herrera, G., Delgado, J., Lopez-Sanchez, J. M., Mallorquí, J. J., & Mulas, J. (2010). A ground subsidence study based on DInSAR data: Calibration of soil parameters and subsidence prediction in Murcia City (Spain). *Engineering Geology*, 111(1), 19-30.
- [8] Li, W. X., Liu, L., & Dai, L. F. (2010). Fuzzy probability measures (FPM) based non-symmetric membership function: Engineering examples of ground subsidence due to underground mining. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(3), 420-431.
- [9] Lee, S., & Park, I. (2013). Application of decision tree model for the ground subsidence hazard mapping near abandoned underground coal mines. *Journal of environmental management*, 127, 166-176.
- [10] Qian, M. G., Miao, X. X., & Xu, J. L. (1996). Theoretical study of key stratum in ground control. *J China Coal Soc*, 21(3), 225-230.
- [11] Ju, J., & Xu, J. (2015). Surface stepped subsidence related to top-coal caving longwall mining of extremely thick coal seam under shallow cover. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 78, 27-35.
- [12] Iwanec, A. S., Carter, J. P., & Hambleton, J. P. (2016). Geomechanics of subsidence above single and multi-seam coal mining. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(3), 304-313.
- [13] Ye, S., Luo, Y., Wu, J., Yan, X., Wang, H., Jiao, X., & Teatini, P. (2016). Three-dimensional numerical modeling of land subsidence in Shanghai, China. *Hydrogeology Journal*, 24(3), 695-709.
- [14] Yu, B. (2016). Behaviors of overlying strata in extra-thick coal seams using top-coal caving method. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(2), 238-247.
- [15] Xu, T., Yang, T. H., Chen, C. F., Liu, H. L., & Yu, Q. L. (2015). Mining induced strata movement and roof behavior in underground coal mine. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 1(3-4), 79-89.
- [16] Xie, J. L., & Xu, J. L. (2017). Effect of key stratum on the mining abutment pressure of a coal seam. *Geosciences Journal*, 21(2), 267-276.
- [17] Salamon M. D. G.; 1990; *Mechanism of caving in longwall mining*, Rock mechanics contributions and challenges: Proceedings of the 31st US Symposium, Golden. pp. 161-168.
- [18] Mirsalari, S. E., Fatehi Marji, M., Gholamnejad, J., & Najafi, M. (2017). A boundary element/finite difference analysis of subsidence phenomenon due to underground structures. *Journal of Mining and Environment*, 8(2), 237-253.

