

## طراحی علمی پیلار موقت بر مبنای پروسه تسلیم شدن پیلارهای زغالی

سید کاظم اورعی<sup>۱</sup>، نوید حسینی<sup>۲</sup>

۱- استاد دانشگاه استرلینگ انگلستان

۲- دانشجوی دکترای مهندسی معدن، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات

### چکیده

روش معدنکاری جبهه کار طولانی یکی از بهترین انتخاب‌ها برای استخراج لایه‌های افقی تا کم شیب زیرزمینی زغال سنگ به حساب می‌آید. از ویژگی‌های بارز این روش می‌توان به تولید و ایمنی بالا اشاره کرد. ورودی‌های دو طرف پانل استخراجی، نقش مهمی را در میزان تولید و ایمنی بر عهده دارند. با افزایش عمق معدن، شرایط نگهداری این ورودی‌ها سخت می‌شود. یکی از راهکارهای اساسی برای پایداری این ورودی‌ها، به ویژه در معادن عمیق، استفاده از پیلارهای زنجیره‌ای موقت است. از آنجایی که رفتار پیلارهای زغالی پس از مقاومت حداکثر ناشناخته است، طراحی علمی پیلارهای زنجیره‌ای موقت به خوبی توسعه نیافته است. در این مقاله، دو مدل کرنش نرمی با مبنای عددی و تحلیلی آنالیز شده‌اند. این مدل‌ها برای ردیفی از پیلارهای زنجیره‌ای موقت در یک سیستم دو ورودی با عمق ۷۰۰ متر از سطح زمین مطالعه شده‌اند. در این مطالعه تنها فاز توسعه سیستم جبهه کار طولانی در نظر گرفته شده و تغییر شکل یافتن، تسلیم شدن و امکان گسیختگی در مرحله پیش از اجرای عملیات جبهه کار طولانی بررسی شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در معادن جبهه کار طولانی عمیق می‌توان از پیلار زنجیره‌ای موقت استفاده کرد. همچنین هر دو مدل کرنش نرمی آنالیز شده، از پتانسیل لازم برای درک بهتر فرآیند تسلیم شدن پیلار برخوردارند. بنابراین می‌توانند مبنای معقولانه‌ای برای طراحی پیلار موقت به وجود آورند. روند مطالعه نشان می‌دهد که این رویه طراحی پیلار موقت به رفتار پس از مقاومت حداکثر زغال سنگ حساس است، ولی به دلیل دو بعدی بودن، تاثیر بارهای تکیه گاهی جلویی را ارزیابی نمی‌کند.

**واژگان کلیدی:** جبهه کار طولانی، پیلار موقت، کرنش نرمی

### مقدمه

شده و ممکن است باعث گسیختگی ناگهانی دیواره و فرو ریختن سقف شود. همچنین، سیستم چند ورودی پر هزینه بوده و از استدلال عملیاتی ضعیفی برای استفاده در معادن با جبهه کار طولانی و عمیق برخوردار است. گزینه پیشنهاد شده، سیستمی با دو

پیلارهای زنجیره‌ای در ایمنی، تولید و اجرای سیستم معدنکاری جبهه کار طولانی نقش ویژه‌ای دارند. با عمیق‌تر شدن معدن وضعیت نگهداری سیستم ورودی دو طرف پانل مشکل می‌شود. استفاده از پیلارهای تکیه‌گاهی باعث افزایش سطح تنش در سیستم ورودی

باید تمام زغال سنگ تشکیل دهنده پیلار تسلیم شود، نه اینکه فقط گوشه‌های پیلار تسلیم شوند. زغال سنگ نیز مانند مواد ترد دیگر در اثر بارگذاری تغییر شکل کرنش نرمی را تجربه می‌نماید. در مواد دارای خاصیت کرنش نرمی افزایش تغییر شکل با کاهش توانایی باربری همراه است. ولی خوشبختانه تغییر شکل کرنش نرمی در وضعیت پایدار بوده و امکان شکست ناپایدار پیلار موقت وجود ندارد.

### مدل‌های کرنش نرمی

در علم مکانیک سنگ قوانین متعددی برای تشریح رفتار کرنش نرمی سنگ‌های ترد و خاک‌های سخت شده ارائه شده است. ولی تنها تعداد محدودی از این روابط با تجربه‌های فیزیکی در مورد زغال سنگ تطبیق دارند. بیشتر مدل‌های کرنش نرمی فرض می‌کنند که سنگ تا زمانی که به نقطه حداکثر تحمل بار (مقاومت) برسد دارای رفتار الاستیک خطی است؛ کرنش نرمی پس از مقاومت پیک به صورت خطی آغاز می‌شود و تا رسیدن به یک مقدار ثابت معین (که معمولاً به سطح تنش جانبی وابسته است) در مقاومت باقی مانده ادامه می‌یابد.

اولین مدل کرنش نرمی در سال ۱۹۶۳ توسط دیست<sup>۱</sup> ارائه گردید [۴]. این مدل در شکل (۱) نشان داده شده است [۳]. مدل کرنش نرمی دیست برای هر سطح فشار جانبی معین، رابطه تنش-کرنش را با استفاده از سه خط راست نشان می‌دهد. این خطوط در دو نقطه مهم، همانطور که در شکل (۲) دیده می‌شود یکدیگر را قطع می‌کنند.

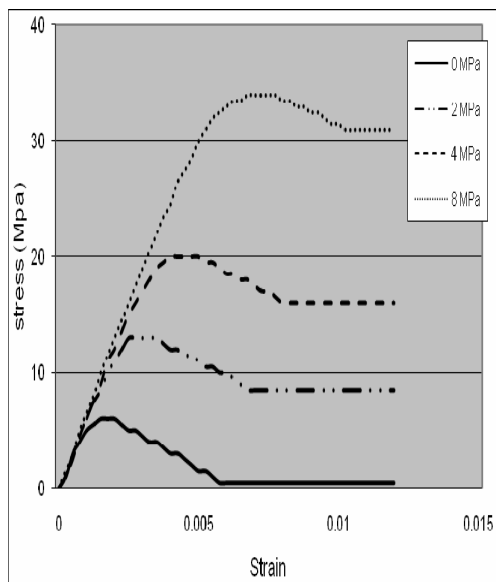
ورودی است که توسط ردیفی از پیلارهای موقت از یکدیگر جدا شده‌اند.

پیلار موقت به گونه‌ای طراحی می‌شود که در مدت فاز توسعه و با افزایش سطح بار اعمالی به بیش از حد مقاومت پیک زغال سنگ دچار تغییر شکل کرنش نرمی شود. بدین ترتیب، ریسک ناشی از شکست ناگهانی پیلارها و فروریختن سقف تحت بارهای تکیه‌گاهی کاهش می‌یابد. پیلارهای موقت در مدت فاز کرنش نرمی نیز از توانایی تحمل بار قابل توجهی برخوردارند. ولی اگر دچار گسیختگی ناگهانی شوند، امکان فروریختن کامل سیستم ورودی زیاد است [۱]. بنابراین، درک دقیق مکانیزم تسلیم شدن پیلار در کنار مطالعه پارامترهای موثر بر رفتار آن در طراحی مناسب پیلار موقت ضروری است. هر چند تجربه نشان داده است که روش‌های مرسوم طراحی پیلار زنجیره‌ای نسبتاً مناسب‌اند، ولی کاربرد این روش‌ها برای طراحی پیلار موقت جای سوال دارد [۲].

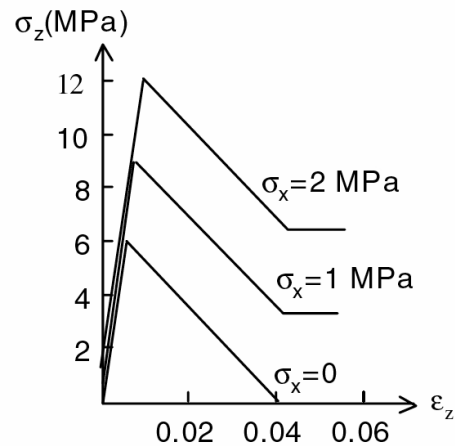
### پیلار موقت

به طور معمول، سطح تنش در اطراف پیلار موقت کاهش یافته و شرایط پایداری سیستم ورودی بهبود می‌یابد. بنابراین امکان تولید بیشتر فراهم آمده و ایمنی در سطح بالاتری برقرار می‌شود. ولی عدم درک مناسب از مکانیزم تسلیم شدن پیلار زغالی موقت شامل فرآیند بارگذاری و تغییر شکل باعث شده تا کاربرد عملی پیلار موقت گسترش چشمگیری نداشته باشد. مطالعات نشان داده است [۳] که تغییر شکل پیلار موقت در مدت پروسه تسلیم شدن کاملاً خطی نیست؛ اما افزایش معینی در سطح تنش می‌تواند منجر به افزایش کرنش شود. همچنین در فرآیند بارگذاری

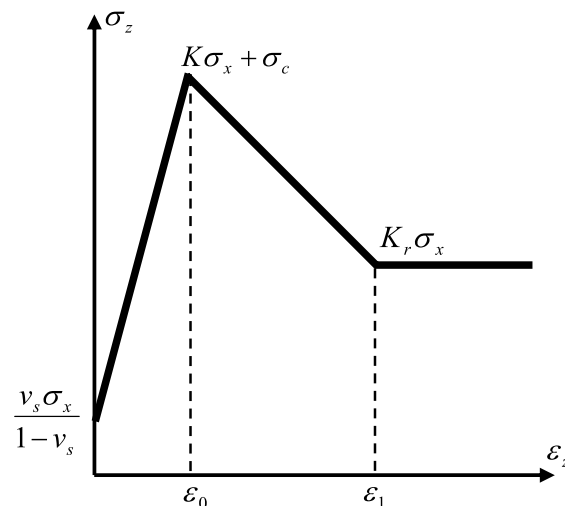
است، را نشان می‌دهد. این نقطه بر اساس رفتار کرنش نرمی مدل هوک<sup>۳</sup> - براون<sup>۴</sup> تعریف شده است. نرم افزار FLAC از مدل کرنش نرمی ورمر<sup>۵</sup> استفاده می‌کند. این مدل نیز مشابه مدل دیست بوده و بر اساس معیار موهر - کلمب عمل می‌نماید. تفاوت اصلی این دو مدل در ترکیب چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و اتساع است. مدل ورمر اجازه می‌دهد که این پارامترها به طور پیوسته تغییر نمایند، در حالی که مدل دیست از پارامتر اتساع استفاده نکرده و دو پارامتر دیگر را نیز ثابت در نظر می‌گیرد. ویژگی تغییر پیوسته پارامترها در مدل ورمر نرم افزار FLAC باعث شده که نتایج نرم افزار با نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی تنش کرنش همخوانی بیشتری داشته باشد.



شکل ۳- شبیه‌سازی آزمایش سه محوری با استفاده از مدل کرنش نرمی ورمر در سطوح گوناگون تنش جانبی



شکل ۱- مدل کرنش نرمی دیست برای یک سنگ شکننده نمونه در تنش‌های جانبی گوناگون [۳]



شکل ۲- منحنی تنش کرنش بر اساس مدل کرنش نرمی دیست برای زغال سنگ [۳]

نقطه اول،  $\epsilon_0$ ، نشان دهنده حداکثر توانایی تحمل بار سنگ است که بر اساس معیار گسیختگی موهر<sup>۱</sup> - کلمب<sup>۲</sup> تعریف شده است. نقطه دوم،  $\epsilon_1$ ، محل برخورد خط نزولی یعنی شاخه کرنش نرمی با یک خط افقی که معرف رفتار تسلیم پلاستیک زغال سنگ

3 . Hoek  
4 . Brown  
5 . Vermeer

1 . Mohr  
2 . Coulomb

غیرمغشوش عبارت است از  $q = \gamma.H$ ، بنابراین مقدار بار روباره در این مطالعه برای لحظه تسلیم  $q = 17MPa$  است.

برخی از خصوصیات سنگ دربرگیرنده و زغال سنگ برای هر دو مدل کرنش نرمی یکسان در نظر گرفته شده است. این خصوصیات شامل: مدول یانگ توده سنگ  $E$ ، و لایه زغال سنگ  $E_s$ ، نسبت پواسون سنگ‌های روباره  $\nu$ ، و درون لایه زغال سنگ  $\nu_s$ ، زاویه اصطکاک داخلی زغال سنگ  $\rho$  و مقاومت فشاری تک محوری بر جای زغال سنگ  $\sigma_c$  هستند که عبارتند از:

$$E = 20GPa, E_s = 3GPa, \nu = \nu_s = 0.25, \rho = 30^\circ, \sigma_c = 5.0MPa, \sigma_c = 7.0MPa \quad (2)$$

### مدل کرنش نرمی دیست

در این مرحله از مطالعه قابلیت مدل کرنش نرمی دیست بر اساس شرایط عملیات جبهه کار طولانی ارزیابی شده است. معمولاً لایه زغال سنگ بین چینه‌های سقف و کف قرار گرفته و لایه‌ها دارای خاصیت الاستیک هستند. بنابراین می‌توانند به طور آزادانه بر روی یکدیگر لغزش نمایند. حرکت نسبی بین لایه زغال سنگ و توده سنگ احاطه‌کننده در محل سطح مشترک به وسیله اصطکاک و بر اساس ضریب اصطکاک  $\mu$  محدود می‌شود. در این مدل‌سازی دو بعدی، ابتدا یک تک ورودی و سپس دو ورودی که به وسیله ردیفی از پیلارهای زنجیره ای از هم جدا شده‌اند، آنالیز شده است.

از پارامترهای مهم این مدل می‌توان به مقاومت فشاری تک محوری  $\sigma_c$ ، زاویه اصطکاک داخلی  $\rho$  و پارامتر کرنش نرمی  $\delta$  اشاره نمود. دو پارامتر اول بسیار شبیه

### مدلسازی پیلارهای زنجیره‌ای موقت

اعمال بار بر پیلار زنجیره‌ای شرایط پیچیده‌ای دارد. نخست در اثر توسعه ورودی‌ها و میانبرها، بار ابتدایی بر روی ردیف پیلارهای زنجیره‌ای اعمال می‌شود. بار ابتدایی ممکن است بتواند یا نتواند برخی از پیلارها و دیواره‌ها را به مرحله تسلیم شدن برساند. سپس، استخراج یکی از پانل‌های جبهه کار طولانی در مجاورت منطقه توسعه یافته آغاز می‌شود. بدین ترتیب بر پیلارهای زنجیره‌ای مجاور، بار انتقالی ناشی از استخراج زغال سنگ درون پانل القا می‌شود. این بار القایی، اصطلاحاً بار تکیه‌گاهی کناری نامیده شده و به طور حتم می‌تواند باعث تسلیم شدن برخی از پیلارها شود. پیلارها باید از مقاومت و توانایی باربری کافی برخوردار باشند تا بتوانند در برابر افزایش بار پوشان سنگ مقاومت نمایند. به نحوی که پایداری ورودی بین ردیف پیلارها و پانل دوم را حفظ کنند. سومین فاز اعمال بار مربوط به استخراج پانل دوم است. پیلارهای زنجیره‌ای باید به گونه ای طراحی شوند که بتوانند پایداری ورودی را به طور معقولانه‌ای در برابر بارهای تکیه‌گاهی جلویی و سینه کار حفظ نمایند.

هدف اصلی این مقاله مطالعه امکان‌پذیری استفاده از مدل‌های کرنش نرمی دیست و ورمر برای تشریح رفتار تسلیم شدن پیلارهای زغالی است. بدین منظور از ابعاد عملیات معدنکاری جبهه کار طولانی نمونه‌ای به شرح زیر استفاده شده است:

$$H = 680m, M = 3m, W = 8m, B = 6.5m, \gamma = 25kN/m^3 \quad (1)$$

در اینجا  $H$  عمق معدن از سطح زمین،  $M$  ارتفاع پیلار یا ارتفاع کار،  $W$  عرض پیلار،  $B$  عرض اتاق و  $\gamma$  وزن مخصوص سنگ‌های روباره است. فشار سنگ‌های روباره بر روی لایه در یک ناحیه

نفوذ کرده است. اما در رابطه با پیلار ضعیف‌تر ثابت هستند. ولی پارامتر سوم کاملاً جدید بوده و بر اساس میزان تندى شیب شاخه نزولى منحنى تنش- کرنش تعريف مى‌شود. شیب این شاخه نزولى عبارت است از:

معيار گسيختگى موهر- کلمب بوده و دارای مقادير ثابت هستند. ولی پارامتر سوم کاملاً جدید بوده و بر اساس میزان تندى شیب شاخه نزولى منحنى تنش- کرنش تعريف مى‌شود. شیب این شاخه نزولى عبارت است از:

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} = -\frac{4\hat{\delta}G_s}{\eta(1-\hat{\delta})} \quad (3)$$

در این رابطه  $\sigma_1$  و  $\varepsilon_1$  به ترتیب تنش و کرنش اصلی و  $G_s$  مدول برشى است. بر اساس این معادله اگر  $\hat{\delta} = 0$  باشد، شیب صفر شده و اگر  $\hat{\delta} = 1$  باشد شیب بینهایت یا خط عمود می‌شود. بنابراین محدوده پارامتر کرنش نرمی  $0 \leq \hat{\delta} \leq 1$  است. پارامترهای دیگر معادله عبارتند از:

$$\eta = 1 - 2\nu_s + \sin \rho, \quad G_s = \frac{E_s}{2(1+\nu_s)} \quad (4)$$

محاسبات بر اساس دو مقدار متفاوت مقاومت فشاری تک محوری زغال سنگ،  $\sigma_c = 6MPa$ ,  $\sigma_c = 5MPa$ ، انجام شده است. در این مقادیر مقاومت و در عمق ۶۸۰ متری از سطح زمین گسیختگی زغال سنگ در دیواره‌های کناری ورودی‌های بدون نگهداری اجتناب‌ناپذیر است. در یک سیستم تک ورودی، بر اساس مقاومت زغال سنگ  $\sigma_c = 6MPa$ ,  $\sigma_c = 5MPa$  عمق نفوذ زون تسلیم شده به درون دیواره به ترتیب معادل  $1.49m$ ,  $2.3m$  به دست آمده است.

مطالعه سیستم دو ورودی و پیلارهای زنجیره‌ای آن نشان می‌دهد که پیلار مقاوم‌تر ( $\sigma_c = 6MPa$ ) پیش از رسیدن به حداکثر توانایی باربری، به نقطه تعادل می‌رسد. نقطه تعادل توده سنگ - پیلار بر اساس مدل چینه‌ای با استفاده از قانون اصلی کرنش نرمی دیست بدست می‌آید [5]. این اتفاق در حالی رخ می‌دهد که زون تسلیم به اندازه  $2.82m$  به درون گوشه‌های پیلار

جدول ۱ - خلاصه ای از نتایج مدل تحلیلی

مقاومت زغال سنگ (MPa)	نرخ کاهش تنش (GPa)	مقاومت پیلار (MPa)	تراکم پیلار (mm)
۵	۱,۴۵	۱۷,۳	۲۰
۶	۱,۵۳	۲۰,۷	۲۷

### مدلسازی عددی با استفاده از نرم افزار FLAC

در این مرحله از مطالعه توانایی مدل کرنش نرمی و رمر نرم‌افزار FLAC برای مدلسازی پیلار موقت آنالیز شده است. ژئومتری معدن مدلسازی شده مطابق شکل (۴) بوده و برای مدلسازی از مش بندی مربعی استفاده شده است.

عرض ورودی = ۶,۵ متر	نسبت تنش افقی به عمودی = ۱
عرض پیلار = ۸ متر	تنش میدانی = ۱۷ مگا پاسکال
ارتفاع پیلار = ۳ متر	مدول یانگ زغال سنگ = ۳ گیگا پاسکال
عرض مدل = ۱۲۰ متر	مدول یانگ سقف و کف = ۲۰ گیگا پاسکال
ارتفاع مدل = ۸۰ متر	نسبت پواسون سقف، کف و زغال = ۰,۲۵
	چسبندگی سطح مشترک = ۰,۵ مگا پاسکال
سطح مشترک پیلار و سقف	پیلار
ورودی	ورودی
ورودی	لایه زغال سنگ

شکل ۴ - ژئومتری و خصوصیات مواد استفاده شده در مدلسازی با نرم افزار FLAC

مقادیر چسبندگی و اصطکاک استفاده شده مطابق نمونه مکعبی زغال سنگی با مقاومت برجای  $K = 6.2MPa$  و پارامتر مقاومتی موهر - کلمب

و مقدار مقاومت تاثیر زیادی بر مقاومت باقی مانده پیلار، عمق زون دچار شکستگی شده و تراکم کلی پیلار دارد.

دو شبیه‌سازی اضافی نیز در نرم افزار FLAC انجام شده است تا حداکثر تراکم ممکن پیلار را تعیین نماید. حداکثر همگرایی ممکن بر روی یک پیلار الاستیک به طور متوسط  $8mm$  است. در شبیه سازی دوم پیلار حذف شده و به دیواره اجازه داده شده است تا دچار شکست شود. حداکثر همگرایی برای منطقه اطراف پیلار در این مدل  $60mm$  به دست آمده است.

مقایسه نتایج این شش مدل شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که تراکم در مدل‌های ۱، ۲ و ۳ نزدیک به مقدار حداکثر همگرایی است. در حالی که مقاومت فشاری پیلار در مدل‌های ۴، ۵ و ۶ بیشتر است. وضعیت گسیختگی درون لایه زغال سنگ و پلات‌های تنش - کرنش مدل‌های کرنش نرمی ۳ و ۴ به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است.

در منحنی تنش - کرنش کلی پیلارها، تغییر هسته بکر پیلار به هسته کاملاً شکسته شده در طول پروسه بارگذاری دیده نمی‌شود.

در انتهای پروسه بارگذاری نیز مقدار تنش بسیار بالای باقی مانده در منحنی تنش - کرنش مدل ۴ نشان دهنده آن است که پیلار همچنان هسته بکر خود را حفظ نموده است.

دو مدل پلاستیک موهر - کلمب (مدل‌های ۵ و ۶) و مدل کرنش نرمی با زغال سنگ نسبتاً مقاوم (مدل ۴)، وجود یک زون جانبی گسیختگی را در اطراف هسته بکر پیلار پیش‌گویی می‌نمایند. همچنین، پیلارهای ضعیف‌تر (مدل‌های ۱، ۲ و ۳) در پایان پروسه بارگذاری گسیختگی کامل را تجربه می‌کنند.

$k=3$  است. مقاومت فشاری تک محوری بر جای زغال سنگ با استفاده از رابطه (۵) تعیین می‌گردد:

$$\sigma_{cis} = K(0.64 + 0.36 \frac{w}{h}) \quad (5)$$

در این رابطه  $w/h$  نسبت عرض به ارتفاع پیلار بوده و به طور مثال معادل 0.5 در نظر گرفته شده است. برای این شبیه‌سازی مطابق جدول (۲) باتوجه به دو مقدار مقاومت مکعبی  $K=6.2, K=9.3$ ، مقدار  $\sigma_{cis} = 5.1MPa, \sigma_{cis} = 7.6MPa$  است. همچنین برای داده‌های ورودی نرم افزار FLAC مقدار چسبندگی به ترتیب  $1.5MPa, 2.2MPa$  و زاویه اصطکاک داخلی برای تمام مدل‌ها  $\rho = 30^\circ$  در نظر گرفته شده است.

جدول ۲ - مقاومت، تنش و فاکتور ایمنی

فاکتور ایمنی	تنش ناحیه تاثیر (MPa)	مقاومت مکعبی (MPa)
۰,۳۱	۳۱	۶,۲
۰,۴۸	۳۱	۹,۳

در مجموع شش مدل‌سازی انجام و از گسیختگی برشی نیز در تمام مدل‌ها جلوگیری شده است. جدول (۳) مقاومت و خصوصیات پس از پیک بکار رفته در شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد. در مدل‌های ۱ و ۳، مقدار  $K$  به ترتیب معادل  $6.2MPa$  و  $9.3MPa$  و شیب پس از پیک در حدود  $1GPa$  - در نظر گرفته شده است. مدل‌های ۲ و ۴ نیز با شیب پس از پیک  $2GPa$  - اجرا شده‌اند. همچنین مدل‌های ۵ و ۶، دو مدل تجربی موهر - کلمب بوده که با هدف مقایسه نتایج، اجرا شده و به ترتیب دارای مقاومت  $6.2MPa$  و  $9.3MPa$  هستند.

نتایج این شش مدل اجرا شده در نرم افزار FLAC به طور خلاصه در جدول (۳) ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، پارامتر شیب پس از مقاومت حداکثر

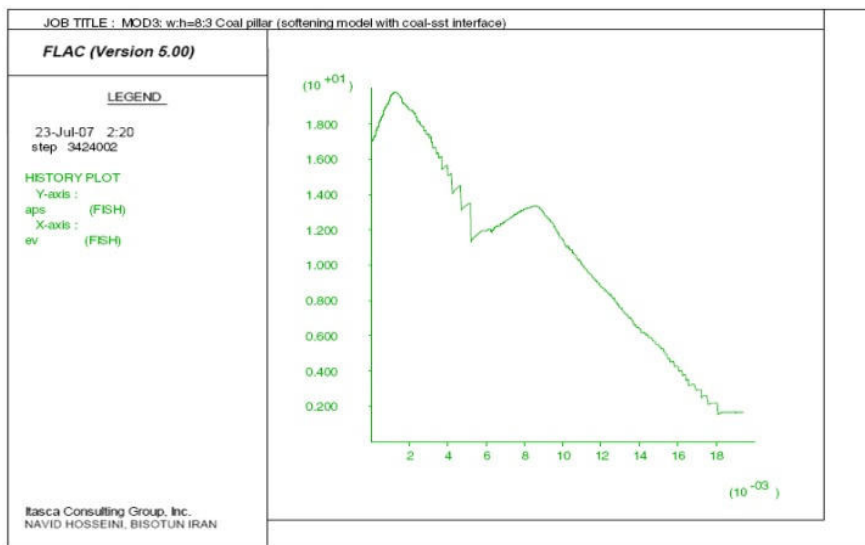
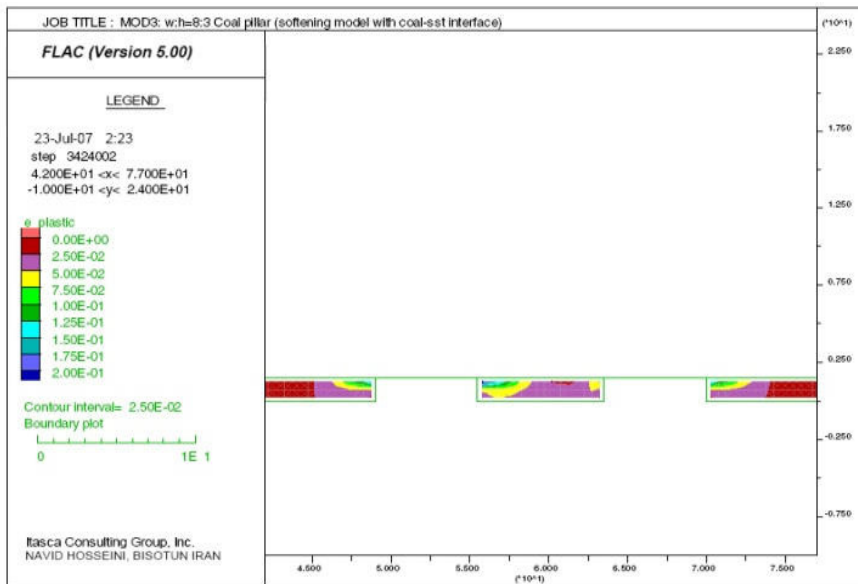
همان طور که در مدل ۴ دیده می شود، افزایش شیب پس از مقاومت پیک و همچنین افزایش مقاومت، وضعیت پیلار را تحت تاثیر قرار می دهند. بنابراین لازم است تا این دو پارامتر در طراحی پیلارهای موقت مورد توجه قرار گیرند.

همان طور که انتظار می رود، مقاومت باقی مانده در پیلارهای ضعیف (مدل های ۱، ۲ و ۳) به مراتب از مقاومت باقی مانده پیلارهای مقاوم (مدل های ۴، ۵ و ۶) کمتر است. ولی مقاومت باقی مانده  $2MPa$  به ازای هر پیلار نیز می تواند یک نیروی نگهداری در حدود  $320$  تن را انتقال دهد و بنابراین توانایی باربری قابل توجهی برای حفظ پایداری سقف ورودی به حساب می آید

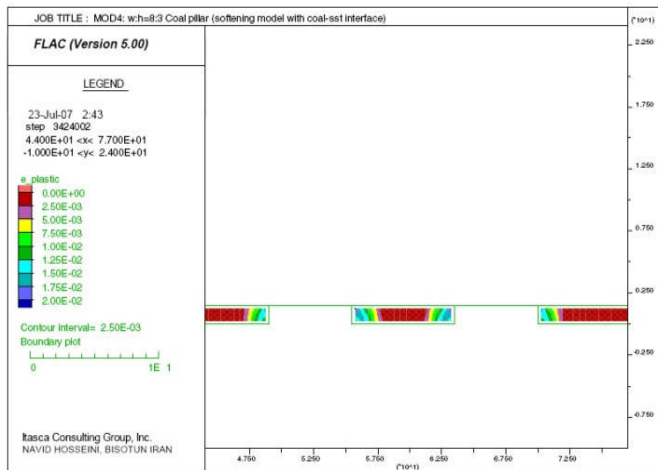
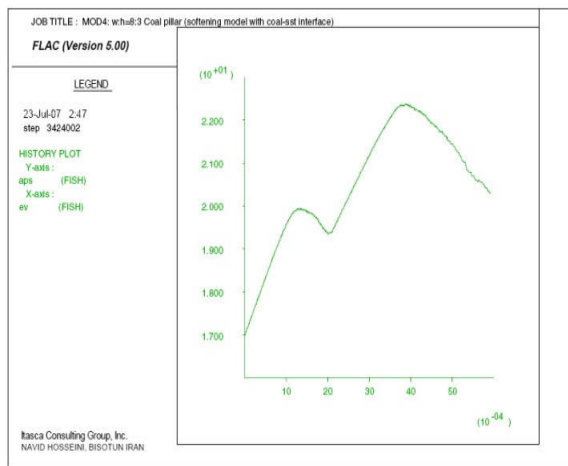
در این مدل های کرنش نرمی، افزایش مقدار مقاومت تنها می تواند اختلاف کوچکی در وضعیت پیلار به وجود آورد. این موضوع در نتایج مدل های ۱ و ۲ در جدول (۳) دیده می شود. این حقیقت به طور آشکارا نشان می دهد که فاکتور ایمنی یک شاخص ضروری خسارت یا پایداری پیلار موقت به حساب نیامده و حتی می تواند پارامتر گمراه کننده ای در طراحی باشد. وضعیت پیلار در مدل های ۱ و ۳ مشابه است؛ در حالی که مقدار فاکتور ایمنی آنها  $0.31$  و  $0.48$  است. ولی عملکرد پیلار در مدل ۴ تفاوت قابل ملاحظه ای با مدل ۳ دارد، در حالی که فاکتور ایمنی هر دو مدل  $0.48$  است.

جدول ۳ - نتایج مدلسازی انجام شده در نرم افزار FLAC

عمق نفوذ شکستگی (m)	تراکم پیلار متوسط mm	کرنش پیلار متوسط mm	تنش باقی مانده پیلار MPa	نرخ کاهش تنش GPa	مقاومت زغال MPa	شماره مدل
۶,۲۵	سراسر	۵۸,۱	۰,۰۱۹۳۷	۱,۶	۶,۲	۱
۶,۲۵	سراسر	۵۵,۹	۰,۰۱۸۶۲	۲,۱	۶,۲	۲
۶,۲۵	سراسر	۵۸,۱	۰,۰۱۹۳۷	۱,۶	۹,۳	۳
۱,۷۵	۲,۵۰	۱۷,۶	۰,۰۰۵۸۸	۲۰,۲	۹,۳	۴
۲,۵۰	۳,۰۰	۱۷,۴	۰,۰۰۵۸۱	۲۰,۵	۶,۲	۵
۲,۰۰	۲,۰۰	۱۴,۰	۰,۰۰۴۶۵	۲۲,۳	۹,۳	۶



شکل ۵ - کنتورهای کرنش برشی پلاستیک (بالا) و منحنی تنش - کرنش پیلار (پایین) به دست آمده از مدل ۳



شکل ۶ - کنتورهای کرنش برشی پلاستیک و منحنی تنش - کرنش پیلار به دست آمده از مدل ۴



## نتیجه گیری

مطالعه صورت گرفته نشان می دهد که مدل کرنش نرمی ورم نرم افزار FLAC به خوبی می تواند رفتار کرنش نرمی زغال سنگ را شبیه سازی نماید. همچنین نتایج به دست آمده از مدل کرنش نرمی دیست نیز امید بخش است. این سطح اطمینان در استفاده از مدل های کرنش نرمی می تواند نتایج مطالعات آنالیز برگشتی بر پایه مدلسازی سه بعدی در تعیین خصوصیات مواد و شرایط بارگذاری بر پیلار را تایید نماید. با توجه به دو بعدی بودن مطالعه بارهای تکیه گاهی جلویی ارزیابی نشده اند و لازم است با توسعه سه بعدی مطالعه تاثیر این بارها نیز بر عملکرد پیلار تحت اعمال بار ارزیابی شود.

## منابع

۱- اورعی، ک. حسینی، ن. (۱۳۸۶). برآورد مقاومت پیلار زغالی با استفاده از مدل المان محدود، مجموعه مقالات اولین

همایش بین المللی معدن و دستاوردهای معدنی، مشهد، ۹۸-۹۰ ص .

۲- اورعی، ک. حسینی، ن. (۱۳۸۶). امکان سنجی طراحی پیلار موقت با استفاده از روش های مرسوم طراحی پیلار زنجیره ای، مجله صنعت مادر، دانشگاه صنعتی اصفهان، شماره ۴، ۱۱ ص .  
۳- حسینی، ن. (۱۳۸۶). مدلسازی پیلارها در روش جبهه کار طولانی با استفاده از تکنیک های پیشرفته عددی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب، دانشکده تحصیلات تکمیلی، ۱۹۸ ص .

4-Deist, F.H, (1965). A non-linear continuum approach to the problem of fracture zone sand rock bursts, Jl. S. Afr. Inst. Min. Metall., v. 65.  
5- Salamon, M.D.G, (1992). Strength and stability of coal pillars, Proc. of the Workshop on Coal Pillar Mechanics and Design. Ed.: A.T. Iannacchione et al., U.B. Bureau of Mines, Information Circular, IC94-121.

---

/ -

---