

## برآورد توزیع دما در اطراف پهنه‌های استخراجی در روش گازکردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG)

مهدی نجفی<sup>۱</sup>؛ سید محمد اسماعیل جلالی<sup>۲</sup>؛ رضا خالوکاکی<sup>۳</sup>

۱- استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد، mehdinajafi@yazd.ac.ir

۲- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، Jalalisme@shahroodut.ac.ir

۳- استاد دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، r-kakaie@shahroodut.ac.ir

(دریافت ۲۷ مهر ۱۳۹۲، پذیرش ۳۱ مرداد ۱۳۹۳)

### چکیده

روش گازکردن زیرزمینی زغالسنگ (UCG) یکی از روش‌هایی است که امروزه برای استخراج لایه‌های زغال سنگ مورد توجه جدی قرار گرفته است. در روش UCG، لایه‌های زغال سنگ با ضخامت‌های مختلف و در اعماق متفاوت بدون نیاز به عملیات معدن کاری سنتی به صورت برج در زیرزمین به گاز سنتزی تبدیل می‌شود. فرآیند گازکردن زغالسنگ در پهنه‌های استخراجی سبب ایجاد دمایی بیشتر از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌شود که به شدت روی خصوصیات سنگ‌های مجاور پهنه‌های استخراجی اثر می‌گذارد. با برآورد میدان‌های دمایی در اطراف پهنه‌های می‌توان رفتار لایه‌های اطراف کارگاه استخراج که گرادیان دمایی مختلف دارند، را با دقت بیشتری بررسی کرد و میزان نفوذ حرارت در جهت‌های مختلف در اطراف کارگاه استخراج را پیش‌بینی کرد. در این تحقیق نتایج مدل‌سازی عددی سه بعدی کارگاه استخراج UCG با استفاده از نرم افزار المان محدود COMSOL ارایه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد، در مدت گازکردن زغالسنگ پهنه استخراجی، دما در سنگ‌های طبقات سقف، کف و پایه‌ی بین دو پهنه به ترتیب ۱/۷، ۱/۴ و ۱/۲ متر نفوذ می‌کند.

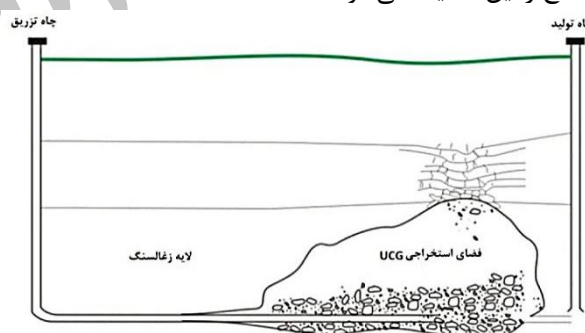
### کلمات کلیدی

گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG)، توزیع دما، پهنه استخراجی، نرم‌افزار COMSOL

## ۱- مقدمه

امروزه روش گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ<sup>۱</sup> (UCG) به دلیل توجه به افزایش بازیابی لایه‌های زغال سنگ با ضخامت‌های متغیر و در اعماق زیاد، مورد توجه بسیاری از معدن کاران قرار گرفته است. با روش UCG می‌توان ذخایر بالقوه زغال سنگ را به معادن قابل بهره‌برداری زغال سنگ تبدیل کرد [۱].

در فرآیند UCG لایه‌های زغال سنگ با ضخامت‌های مختلف و در اعماق متفاوت بدون نیاز به عملیات معدن کاری سنتی به صورت برج (در زیرزمین) به گاز سنتزی تبدیل می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، در فرآیند UCG، ابتدا، چاه‌های تزریق<sup>۲</sup> و تولید<sup>۳</sup> تا رسیدن به سطح لایه‌ی زغال سنگ حفاری و به یکدیگر متصل می‌شوند. سپس اکسیدان (شامل ترکیبی از هوا، اکسیژن و بخار آب) به داخل چاه تزریق ارسال می‌شود تا باعث سوختن زغال سنگ و تبدیل آن به گاز شود. بر اثر احتراق، منواکسیدکربن و بعضی گازهای ترکیبی تولید می‌شود. گازهای ترکیبی از فضای استخراجی<sup>۴</sup> ایجاد شده در لایه زغال سنگ به داخل چاه تولید منتقل شده و سپس به سطح زمین هدایت می‌شوند [۲، ۳].



شکل ۱: فرآیند کلی UCG [۴]

می‌کند و میدان‌های دمایی در اطراف کارگاه استخراج تغییر می‌کنند تا به یک وضعیت ثابت که همان دمای اولیه محیط است، برسند. از این رو تاریخچه زمانی که در کارگاه استخراج عملیات گاز کردن انجام می‌شود تاثیر بالایی بر توزیع دما در اطراف کارگاه استخراج دارد.

دمای ایجاد شده در کارگاه استخراج UCG نقش بسیار مهمی بر توزیع تنش‌ها و تشکیل مناطق حرارتی در سینه کار و فضای اطراف کارگاه استخراج دارد. بنابراین با برآورد میدان‌های دما می‌توان رفتار لایه‌های اطراف کارگاه استخراج که دارای گرادین دمایی مختلف می‌باشند، با دقت بیشتری بررسی کرد و از نتایج توزیع دما برای مطالعه میدان‌های تنش و جابه‌جایی در مدل‌سازی ترمومکانیکی استفاده کرد.

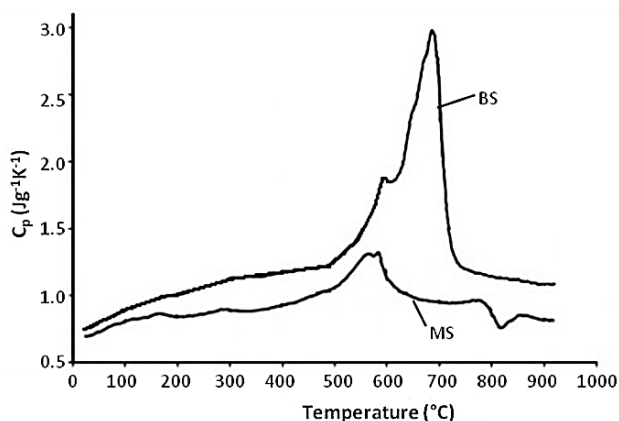
لیو<sup>۵</sup> و همکاران تغییرات میدان‌های دما در اطراف کارگاه استخراج UCG را در فضای دو بعدی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند دما حداکثر تا ۲۰ متری طبقات سقف نفوذ می‌کند [۶]. لازم به ذکر است که در این تحقیق اشاره‌ای به مدت زمان گاز کردن نشده است و درجه حرارت کارگاه استخراج را یکسان در نظر گرفته است.

در ایران تاکنون مطالعاتی بر روی مدل‌سازی عددی توزیع دما در داخل سنگ‌های مجاور یک فضای استخراجی صورت نگرفته است. در این تحقیق برای اولین بار به بررسی توزیع دما در سنگ‌های مجاور یک فضای استخراجی UCG با استفاده از مدل‌سازی عددی سه بعدی پرداخته شده است. نکته قابل توجه این است که در این تحقیق تاثیر تغییرات دما در طول فضای استخراجی تا مرحله تخریب سقف در نظر گرفته شده است.

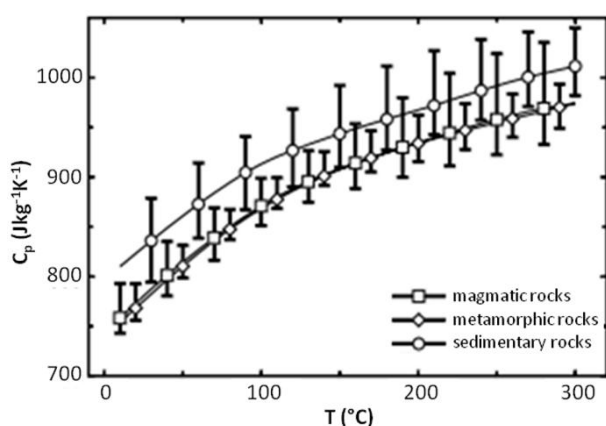
## ۲- اثر دما بر خصوصیات سنگ‌ها

بررسی اثر دما بر روی خصوصیات فیزیکی (چگالی، نفوذپذیری و تخلخل)، مکانیکی (مقاومت فشاری تک محوری، مدول یانگ، نسبت پواسون، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت کششی) و حرارتی (گرمای ویژه، ضریب هدایت گرمایی و ضریب انبساط گرمایی) سنگ‌ها از موضوعات ضروری مطالعات مکانیک سنگی به حساب می‌آید. گرمایی که سنگ دریافت می‌کند علاوه بر افزایش دمای آن ممکن است موجب پدیده‌های دیگری از جمله تجزیه ساختار آن، انجام فعل و انفعالات شیمیایی و سرانجام ذوب سنگ شود. علاوه بر این، بخشی از گرما به کار مکانیکی تبدیل می‌شود و به دلیل انبساط اجزای سنگ تنش‌های حرارتی را ایجاد می‌کند [۷]. مطالعات آزمایشگاهی و تحقیقات فراوانی در دنیا روی تغییرات

داخل فضای استخراجی UCG پدیده‌های مختلفی به طور همزمان اتفاق می‌افتد که شامل تغییرات مشخصات ژئومکانیکی سنگ‌های اطراف، واکنش‌های شیمیایی، تغییر شرایط آب‌های زیرزمینی و تغییرات شدید است. تغییرات دما در داخل پهنه استخراجی در اثر سوختن زغال سنگ و تبدیل آن به گاز ایجاد می‌شود. دما اغلب به بیشتر از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد و گاهی به ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز می‌رسد [۲، ۵]. بر این اساس درجه حرارت پهنه‌ی استخراجی گاز کردن حداقل ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد است. بنابراین در حین عملیات گاز کردن و بعد از آن شرایطی به وجود می‌آید که سنگ‌ها و لایه‌ی زغال سنگ واقع در مجاورت پهنه در معرض دمای بالا قرار می‌گیرند. با شروع عملیات گاز کردن یک کارگاه استخراج UCG، حرارت به داخل سنگ‌های مجاور نفوذ



شکل ۲: تغییرات گرمای ویژه دو نوع ماسه‌سنگ در اثر افزایش دما [۱۵]



شکل ۳: مقادیر میانگین و واریانس تغییرات گرمای ویژه سنگ‌های رسوبی در اثر افزایش دما [۱۶]

در مورد تغییرات گرمای ویژه زغال‌سنگ با دما اطلاعات کمی در دسترس است و در مواردی بیان شده است که گرمای ویژه زغال‌سنگ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد ولی تحقیقات روبرتسون<sup>۱۲</sup> نشان داده است که  $C_p$  زغال‌سنگ با افزایش دما، افزایش می‌یابد [۱۷].

با توجه به موارد بیان شده می‌توان بیان نمود که گرمای ویژه سنگ‌های رسوبی با افزایش دما، روند صعودی با شیب ملایم دارد [۱۱].

#### ۲-۱-۲- اثر دما بر هدایت گرمایی سنگ‌های رسوبی

هدایت گرمایی یا رسانندگی گرمایی خاصیتی از جسم است که بیانگر توانایی آن جسم در انتقال گرما است.

وستن و چلشمیدت هدایت گرمایی چند نمونه سنگ رسوبی از قبیل ماسه‌سنگ، سنگ آهک و دولومیت را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش دما از صفر تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، هدایت گرمایی کاهش می‌یابد (شکل ۴) [۱۶].

کلایسر و هیونگ<sup>۱۳</sup> با مطالعه بر روی سنگ‌های کربناته و رسوبی اعلام کردند که هدایت گرمایی سنگ‌های رسوبی با

خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و حرارتی سنگ‌ها هنگامی که تحت تأثیر دمای بالا قرار می‌گیرند انجام شده است. نتایج این تحقیقات بیان کننده آن است که خصوصیات سنگ‌ها به دما و تاریخچه زمانی که در مجاورت دما قرار می‌گیرند، وابسته است. علاوه بر این اثر دما بر روی خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و حرارتی متفاوت از یکدیگر است، یعنی ممکن است در مواردی افزایش دما سبب بهبود خصوصیات حرارتی شود در حالی که خصوصیات فیزیکی کاهش یابد [۶، ۱۳ - ۸]. در این تحقیق بررسی توزیع دما در اطراف کارگاه استخراج UCG فقط خصوصیات حرارتی سنگ‌ها مدنظر قرار گرفته است و چون هدف اصلی این تحقیق بررسی توزیع دما است، تنها به تشریح تغییر خصوصیات حرارتی سنگ‌های رسوبی با دما پرداخته شده است.

#### ۲-۱-۲- بررسی اثر دما بر خصوصیات حرارتی سنگ‌های رسوبی

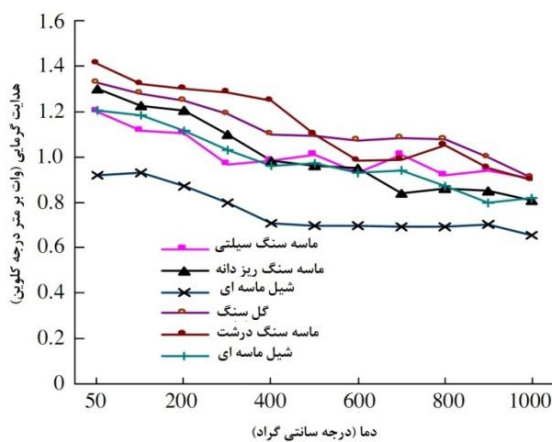
خوشبختانه تاکنون تحقیقات زیادی برای برآورد خصوصیات حرارتی سنگ‌ها به‌ویژه گرمای ویژه<sup>۶</sup> ( $C_p$ )، هدایت گرمایی<sup>۷</sup> ( $\lambda$ ) و ضریب انبساط گرمایی<sup>۸</sup> ( $\alpha$ ) انجام شده است که در این بخش به آن‌ها اشاره می‌شود.

#### ۲-۱-۲- اثر دما بر گرمای ویژه سنگ‌های رسوبی

گرمای ویژه عبارت از میزان گرمای لازم برای افزایش دمای واحد جرم یک ماده به اندازه یک درجه سانتی‌گراد است. نتایج تحقیقات و آزمایشات انجام شده توسط سومرتون<sup>۹</sup> نشان داده است که گرمای ویژه ماسه‌سنگ، رس‌سنگ و شیل به آرامی (کمتر از ۱۰ درصد) از ۲۵ درجه سانتی‌گراد تا ۵۲۷ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد [۱۴]. نتایج آزمایشات هاجپال و توروک<sup>۱۰</sup> در سال ۱۹۹۸ بر روی دو نوع مختلف ماسه‌سنگ (Maulbronner و Balatonrendes) نشان داده است که  $C_p$  ماسه سنگ با افزایش دما افزایش یافته و در دمای ۵۵۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به حداکثر می‌رسد و بعد از آن کاهش می‌یابد. به هر حال این تغییرات به‌صورتی است که کمترین مقدار  $C_p$  در بیشترین دما بزرگ‌تر از نمونه گرما ندیده است [۱۵] (شکل ۲). نتایج آزمایشات وستن و چلشمیدت<sup>۱۱</sup> روی گرمای ویژه سه نوع سنگ رسوبی شامل ماسه‌سنگ، سنگ آهک و دولومیت در یک فشار ثابت نشان داده است که گرمای ویژه با افزایش دما (صفر تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد)، افزایش می‌یابد (شکل ۳) [۱۶].

افزایش دما، کاهش می‌یابد (شکل ۵) [۱۸].

دما کاهش یافته است.



شکل ۶: تغییرات ضریب هدایت گرمایی در دماهای مختلف [۶]

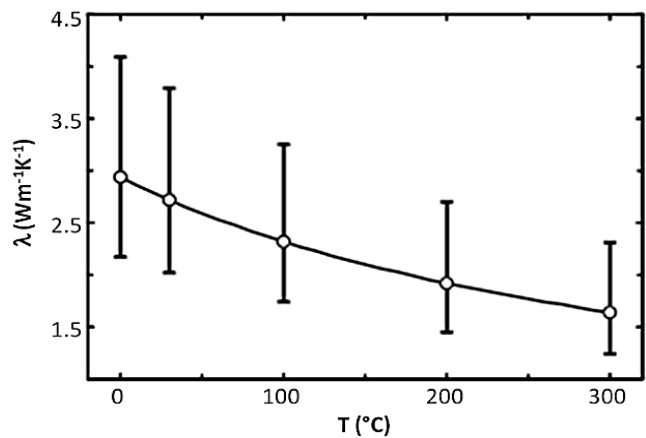
به‌طور کلی با توجه به شکل‌های ۴، ۵ و ۶ و مطالب بیان شده مشخص است که با افزایش دما، ضریب هدایت گرمایی ( $\lambda$ ) برای تمام انواع سنگ‌های رسوبی کاهش می‌یابد و می‌توان تغییرات ضریب هدایت گرمایی را بر حسب تابعی که با افزایش دما کاهش می‌یابد، برازش داد.

### ۲-۱-۳- اثر دما بر ضریب انبساط حرارتی سنگ‌های رسوبی

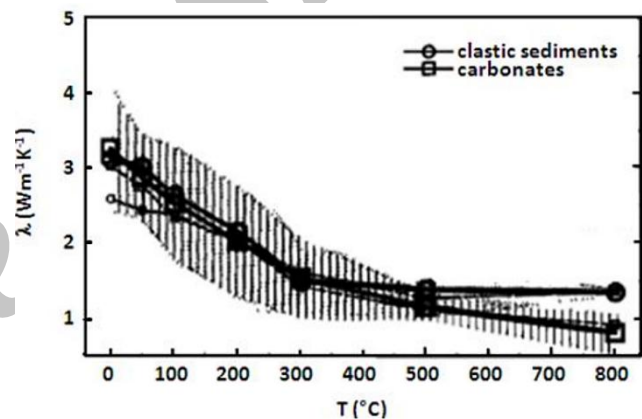
ضریب انبساط حرارتی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L \times \Delta T} \quad (1)$$

که در آن  $\alpha$  ضریب انبساط حرارتی خطی،  $\Delta L$  تغییرات طول،  $\Delta T$  تغییرات دما و  $L$  برابر با طول اولیه‌ی جسم است. به‌طور معمول بیشتر سنگ‌ها دارای ضریب انبساط حرارتی بین  $15 \times 10^{-6}$  تا  $33 \times 10^{-6}$  بر درجه سانتی‌گراد هستند [۱۱]. سنگ‌های حاوی کوارتز به دلیل بالابودن ضریب انبساط گرمایی کوارتز، مقادیر بالای ضریب انبساط حرارتی دارند. آزمایشات سومرتون بر روی تغییرات ضریب انبساط گرمایی با دما نشان داده است که به‌طور کلی، ضریب انبساط گرمایی سنگ‌های رسوبی با افزایش دما، افزایش می‌یابد (شکل ۷). این میزان افزایش تا دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد با شیب زیادی بوده و بعد از آن دارای تغییرات کمی است و به سمت روند ثابتی میل می‌کند [۱۴].



شکل ۴: مقادیر میانگین و واریانس هدایت گرمایی تعدادی از سنگ‌های رسوبی با افزایش دما



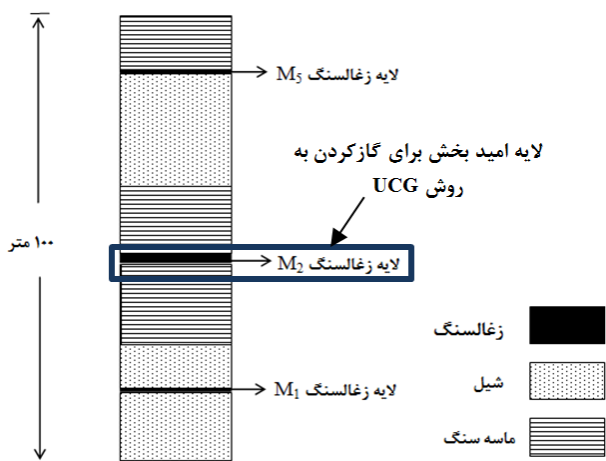
شکل ۵: تغییرات هدایت گرمایی سنگ‌های رسوبی با افزایش دما [۱۸]

لیو و همکاران آزمایشات گسترده‌ای روی ضریب هدایت گرمایی لای سنگ، ماسه سنگ، گل سنگ، گریستون و گل سنگ ماسه‌ای انجام داده‌اند و به این نتیجه رسیدند که ضریب هدایت گرمایی سنگ‌های رسوبی مذکور مطابق شکل ۶ با افزایش دما، کاهش می‌یابد [۶].

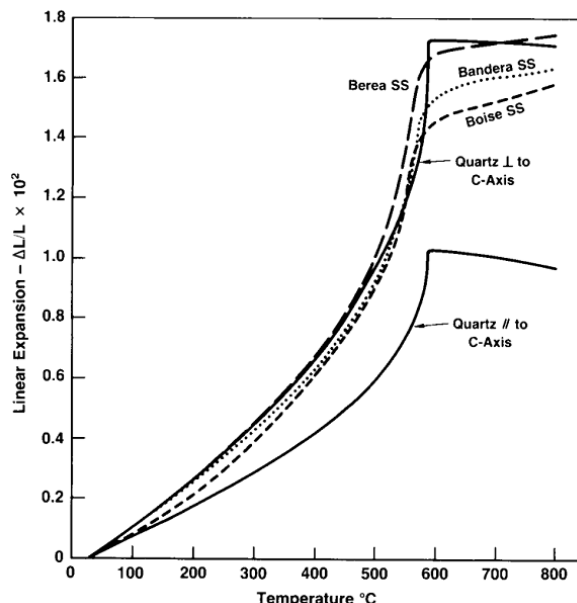
در مورد تغییرات ضریب هدایت گرمایی زغالسنگ با افزایش دما اطلاعات زیادی در دسترس نیست. به‌عنوان نمونه گلاس<sup>۱۴</sup> به این نتیجه رسیده است که ضریب هدایت گرمایی ( $\lambda$ ) زغال سنگ با افزایش دما، کاهش می‌یابد [۱۹]. به‌رحال ضریب هدایت گرمایی زغال سنگ‌های آنتراسیت از ۰/۳ تا ۰/۵ وات بر متر درجه کلون متغیر است [۱۷]. علاوه بر موارد بیان شده یک سری مدل‌های ریاضی تجربی و نیمه تجربی برای تخمین هدایت گرمایی سنگ‌های متخلخل ارائه شده است که در این مدل‌ها با ثابت بودن سایر پارامترها، هدایت گرمایی با افزایش

دارند. مطالعه ستون چینه‌شناسی منطقه مزینو نشان می‌دهد که جنس طبقات زمین بیشتر از ماسه‌سنگ، شیل به همراه لایه‌های زغالی است (شکل ۸) [۲۱]. درجه زغال‌سنگ‌های منطقه مزینو از نوع آنتراسیت و نیمه آنتراسیت است. این زغال‌سنگ‌ها دارای ارزش حرارتی بالایی هستند. در منطقه مزینو، ۷۵ لایه زغال‌دار شناسایی شده است. از میان لایه‌های زغالی منطقه مزینو، لایه M2 به دلیل ضخامت، ذخیره بالا و نیز سایر شرایط لازم برای اجرای UCG از پتانسیل بالایی برای گاز کردن به روش احتراق قابل کنترل پسرود (CRIP) [۲۲]. بر این اساس مقیاس تجاری برخوردار است (شکل ۸) [۲۲]. بر این اساس پیش بینی می‌شود بتوان پهنه‌های استخراجی با عرض ۹۰ متر همراه با یک پایه محافظ به عرض ۱۸ متر بین هر دو پهنه، به روش CRIP بر روی آن اجرا کرد (شکل ۹).

با توجه به توضیحات بیان شده در این تحقیق، مدل‌سازی عددی بر روی کارگاه استخراج UCG بر روی لایه M2 منطقه مزینو انجام شده است.



شکل ۸: ستون چینه‌شناسی منطقه مزینو



شکل ۷: تغییرات ضریب انبساط گرمایی با افزایش دما [۱۴]

در مورد تغییر رفتار زغال‌سنگ با دما اطلاعات کمی در دسترس است که توسط تعدادی از پژوهشگران بررسی شده است [۹،۱۲،۱۳]. به عنوان نمونه بانگهام و فراکلین<sup>۱۵</sup> به این نتیجه رسیده‌اند که ضریب انبساط گرمایی زغال‌سنگ‌های بیتومینه در بازه‌ی دمایی ۲۰ تا ۳۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش می‌یابد در حالی که ضریب انبساط گرمایی آنتراسیت با افزایش دما تقریباً بدون تغییر است [۲۰]. علاوه بر این نتایج آزمایشات گلاس بر روی ۴ نمونه زغال‌سنگ از Big Seam در نزدیکی واشنگتن، نشان داده است که  $\alpha$  در دمای ۱۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، کاهش می‌یابد. بر این اساس گلاس نتیجه گرفت که ضریب انبساط گرمایی زغال‌سنگ با افزایش دما، کاهش می‌یابد [۱۹].

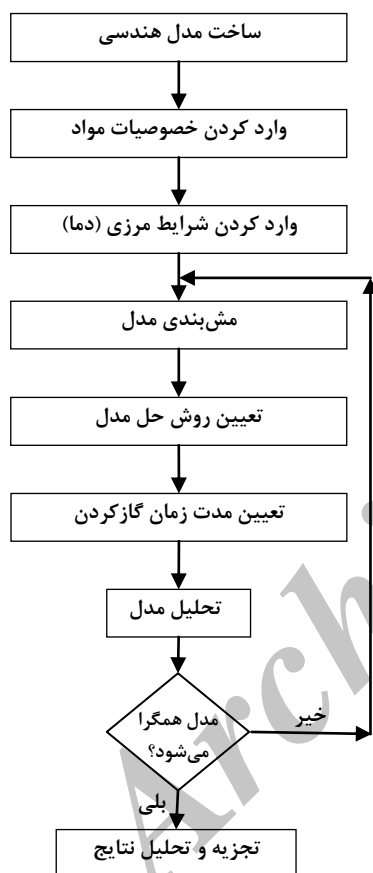
به‌طور کلی بر اساس پیشینه مطالعات بیان شده روی خصوصیات حرارتی سنگ‌های رسوبی می‌توان بیان کرد که با افزایش دما، ضریب انبساط گرمایی و گرمایی ویژه به طور معمول افزایش می‌یابد در حالی که هدایت گرمایی کاهش می‌یابد.

### ۳- منطقه مورد مطالعه

نواحی چهارگانه حوضه زغال‌دار طبس (پرونده، نایبند، مزینو و آبدوغی) با مساحت حدود ۳۰ هزار مترمربع و با داشتن انواع زغال‌سنگ کک‌شو و حرارتی از نظر وسعت و میزان ذخایر، جایگاه نخست را در کشور دارند.

از بین چهار حوضه زغالی بیان شده، زغال‌سنگ‌های حوضه مزینو از نوع حرارتی بوده و قابلیت بهتری برای روش UCG

روش‌های گوناگونی وجود دارد که می‌توان به روش‌های مستقیم<sup>۲۰</sup> و روش‌های تکراری<sup>۲۱</sup> اشاره کرد [۲۴]. در این تحقیق مدل‌سازی عددی کارگاه استخراج UCG در فضای سه بعدی توسط نرم افزار COMSOL انجام شده است. مراحل انجام مدل‌سازی عددی انتقال حرارت از کارگاه استخراج UCG در شکل ۱۰ بیان شده است. در مدل‌سازی انجام شده از انتقال حرارت به روش تابش در هنگام گاز کردن و نیز نشت گرما صرف نظر شده و فقط انتقال گرما از طریق هدایت در نظر گرفته شده است.

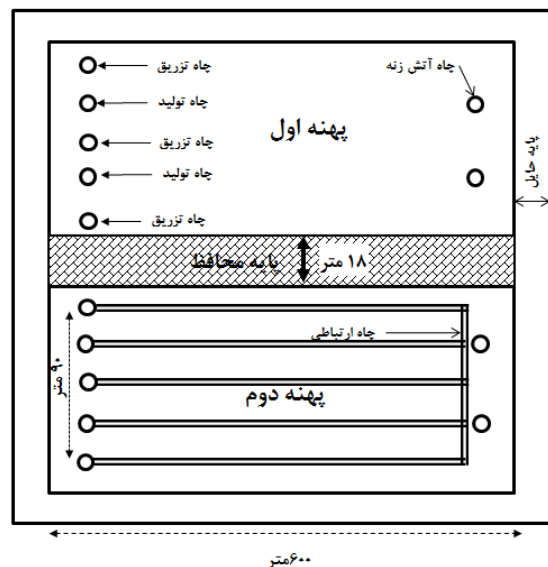


شکل ۱۰: مراحل انجام مدل‌سازی عددی انتقال حرارت در نرم افزار

شرح مراحل مختلف مدل‌سازی عددی در ادامه بیان شده است.

#### ۴-۱- ساخت مدل هندسی

در این تحقیق هندسه کارگاه استخراج (مدل) با توجه به طراحی هندسی مجموعه UCG در منطقه زغالی مزیونی طبس در نظر گرفته شده است. از این رو مدل‌سازی عددی توزیع دما با توجه به پارامترهای هندسی بیان شده انجام شده



شکل ۹: طراحی هندسی مجموعه UCG در مزیونی طبس

#### ۴-۲ مدل‌سازی عددی

چون در روش UCG امکان دستیابی به فضای داخلی و اطراف کارگاه استخراج امکان پذیر نیست و نیز جای گذاری وسیله اندازه گیری حرارت در بالای پهنه استخراجی هزینه زیادی دارد، استفاده از روش‌های عددی که قادر هستند هندسه پیچیده مدل و شرایط مرزی و نیز تغییر خصوصیات را با زمان در نظر بگیرند کمک زیادی به بررسی توزیع دما در اطراف کارگاه استخراج می‌کند. نرم افزار المان محدود COMSOL Multiphysics یکی از نرم افزارهایی است که قدرت بالایی در حل مسایل پیچیده جریان سیال، انتقال حرارت<sup>۱۷</sup>، انتقال جرم<sup>۱۸</sup>، راکتورهای شیمیایی و الکترومغناطیس دارد [۲۳].

به دلیل شرایط حاکم بر فرآیند UCG، انتقال گرما به روش هدایت<sup>۱۹</sup> انجام می‌شود. هدایت، موجب انتقال گرما در جامدات و یا محیط‌های سیال ساکن در اثر اختلاف دما می‌شود. به طور کلی فرض بر این است که در اثر جابه جایی بزرگ مقیاس محیط، گرما از یک نقطه به نقطه دیگر منتقل نمی‌شود بلکه انتقال گرما توسط عواملی مانند حرکت تصادفی مولکول‌های گازی و یا ارتعاش شبکه کریستالی جامد انجام می‌شود.


معادله حاکم بر انتقال حرارت به روش هدایت به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

که در آن؛ q برابر با شار گرمایی (وات بر متر درجه کلونین)، C ظرفیت گرمایی ویژه (ژول بر کیلوگرم درجه کلونین) و ρ چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب) است. برای حل معادله بالا

جدول ۱: مدل‌های مختلف عددی و وضعیت کارگاه استخراج

مدل	بخش کارگاه استخراج				
	۵	۴	۳	۲	۱
مدل ۱					بخش استخراج شده
مدل ۲				بخش استخراج شده	
مدل ۳			بخش استخراج شده		
مدل ۴		بخش استخراج شده			
مدل ۵	بخش استخراج شده				



#### ۴-۲- وارد کردن خصوصیات مواد

خصوصیات مواد به مدل بر اساس ستون چینه‌شناسی منطقه وارد شده است. نکته قابل توجه این است که هدایت گرمایی و گرمای ویژه ماسه سنگ و شیل با توجه به نتایجی که پژوهشگران مختلف به آن دست یافته‌اند، در مدل‌سازی به صورت تابعی از زمان در نظر گرفته شده است. در جدول ۲ خصوصیات حرارتی مواد به کار گرفته شده در مدل‌سازی انتقال حرارت نشان داده شده است.

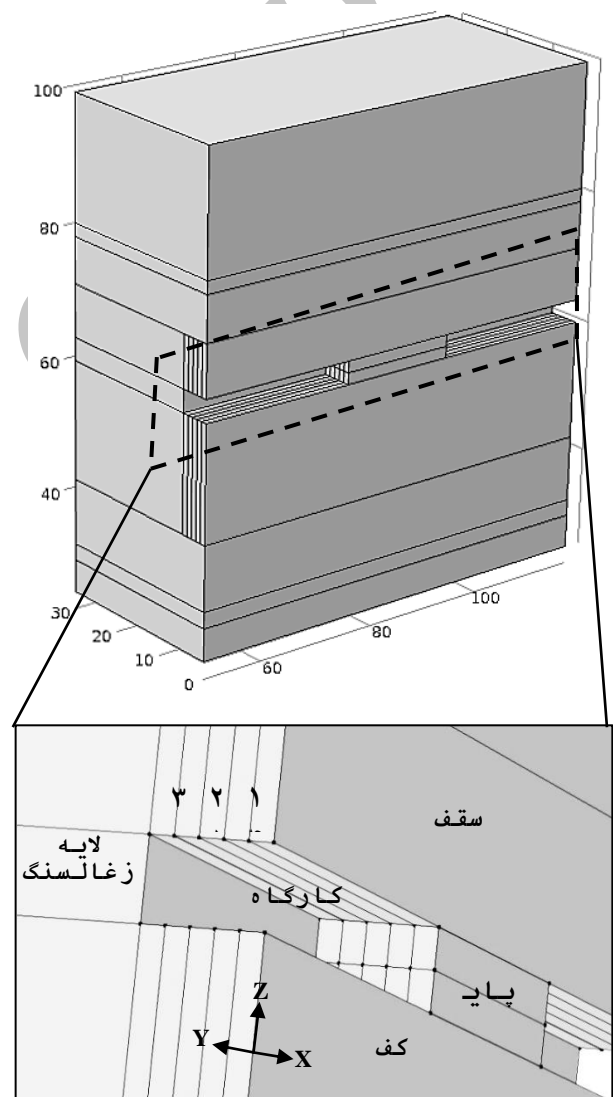
جدول ۲: خصوصیات مواد به کار گرفته شده در مدل‌سازی

نام ماده	خصوصیات		
	زغال‌سنگ	شیل	ماسه سنگ
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	۱۵۸۰	۲۳۰۰	۲۶۰۰
هدایت گرمایی (ولت بر متر بر درجه کلونین)	۰.۱۳	$1.32811 - 0.0004831 \times T$	$1.34053 - 0.00106 \times T + 5.48226 \times 10^{-7} \times T^2$
ضریب انبساط خطی ( $10^{-6}$ )	۳	۵	۱۰
گرمای ویژه (CP) (ژول بر کیلوگرم درجه کلونین)	۱۰۰۰		

#### ۴-۳ وارد کردن دما به مرزهای مدل

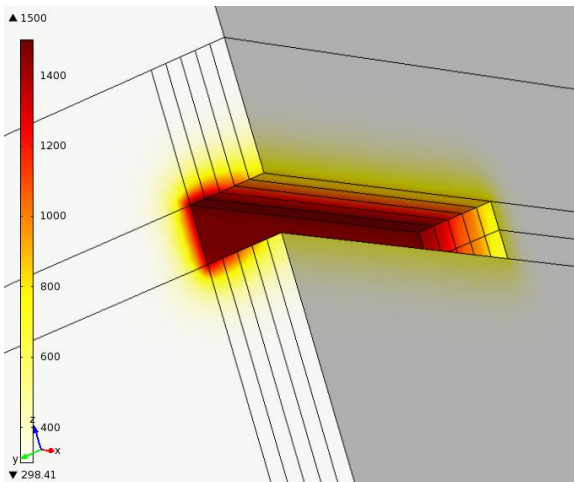
در این تحقیق حرارت ناشی از گاز کردن زغال‌سنگ به صورت دما به مرزهای مدل وارد شده است. دمای ایجاد شده در عملیات UCG در قسمت‌های مختلف فضای استخراجی متفاوت است. در قسمت بالایی فضای استخراجی دما بیشتر از قسمت پایینی آن است. اختلاف دما ممکن است به ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد برسد [۲۵]. میدان دما در داخل لایه

است. در مدل‌سازی عددی انجام شده به منظور کاهش زمان اجرای مدل فقط ۲۵ متر از عرض کارگاه و ۳۰ متر از طول آن مدل شده است. ارتفاع کلی مدل ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است. با توجه به میزان گسترش روزانه فضای استخراجی (۱ متر)، ۵ حالت مختلف مدل‌سازی انجام شده است. مدل‌سازی عددی ابتدا برای کارگاه استخراج با طول ۱ متر، سپس ۲ متر و در نهایت ۵ متر انجام شده است و فرض شده است که بعد از ۵ متر استخراج لایه، کارگاه استخراج تخریب می‌شود. به منظور فهم بهتر موضوع در جدول ۱ مراحل انجام مدل‌سازی بیان شده است. در شکل ۱۱ بخش‌های مختلف کارگاه استخراج در مدل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۱: نحوه‌ی مدل‌سازی عددی هندسه کارگاه استخراج UCG





شکل ۱۲: مناطق هم‌دما در اطراف کارگاه استخراج

#### ۵-۱- تغییرات دما در داخل طبقات سقف و کف

در شکل ۱۳ پروفیل تغییرات دما در داخل طبقات سقف و کف کارگاه استخراج UCG نشان داده شده است. با توجه به شکل مذکور نکات زیر قابل توجه است:

الف: با افزایش مدت زمان گازکردن، دما بیشتر به داخل طبقات سقف نفوذ می‌کند. نکته قابل توجه این است که در بازه زمانی ۲۰ روز تغییرات دما منحصر به لایه‌ی ماسه‌سنگ است و لایه‌های زغالی M1 و M5 و نیز لایه شیل دستخوش تغییرات دمایی نمی‌شوند و در دمای اولیه خود (۳۰۰ درجه کلوین) باقی می‌مانند.

ب: حداکثر عمق نفوذ حرارت مربوط به روز بیستم گازکردن است که تا ۴/۱ متری سقف نفوذ می‌کند و بعد از آن به دمای اولیه می‌رسد. روشن است که هر چه مدت زمان گازکردن افزایش یابد حرارت بیشتر به داخل طبقات سقف نفوذ خواهد نمود. حداکثر عمق نفوذ دما به داخل طبقات سقف در روز پنجم گازکردن برابر با ۱/۷ متر است.

د: در یک ارتفاع مشخص از سقف لایه زغال‌سنگ M2 (به عنوان نمونه ۱ متر (۴۰ متر در شکل ۱۳)) درصد اختلاف دما به نحوی است که هر چه تعداد روزهای گازکردن بیشتر باشد این اختلاف دما کمتر می‌شود به عنوان نمونه اختلاف دما بین روز پنجم و دهم چیزی حدود ۱۰۰ درجه کلوین است در حالی که اختلاف دما برای روز دهم و پانزدهم برابر با ۶۰ درجه کلوین است و برای سایر روزها مقدار کمتری است. لازم به ذکر است در همین ارتفاع اختلاف دما برای روز پنجم و بیستم حدود ۲۵۰ درجه کلوین است.

ه- روند نفوذ دما به داخل طبقات کف تقریباً مشابه طبقات سقف است. علت اصلی این است که در مجاورت کارگاه جنس

زغال‌سنگ بستگی به شکل فضای استخراجی و دمای داخل آن دارد [۱۳]. بررسی‌های انجام شده در مجموعه UCG در Swan Hill کانادا نشان داده است که دمای داخل کارگاه استخراج به بیش از ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد [۲۶].

با توجه به پیشینه مطالعات بیان شده در مورد دمای داخل کارگاه استخراج، نحوه‌ی وارد کردن دما به داخل کارگاه استخراج در مدل‌های مختلف عددی (جدول ۱)، متفاوت در نظر گرفته شده است. میزان دمای وارد شده به بخش‌های اول تا پنجم کارگاه استخراج به توجه به موقعیت سینه‌کار (بخش استخراج شده) به شرح جدول ۳ است. بر این اساس در حالت اول مدل‌سازی (کارگاه استخراج با طول یک متر) فقط دمای بخش ۵، در حالت دوم (کارگاه استخراج با طول دو متر) دمای بخش‌های ۴ و ۵، در حالت سوم دمای بخش‌های ۳، ۴ و ۵، در حالت چهارم دمای بخش‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ و در حالت پنجم دمای کلیه بخش‌ها به مرزهای داخلی کارگاه استخراج وارد شده است.

لازم به ذکر است در تمام مدل‌ها، دمای اولیه مدل ۳۰۰ درجه کلوین و دمای سینه‌کار ۱۴۰۰ درجه کلوین در نظر گرفته شده است.

جدول ۳: نحوه‌ی وارد کردن مرزهای دما در داخل کارگاه استخراج

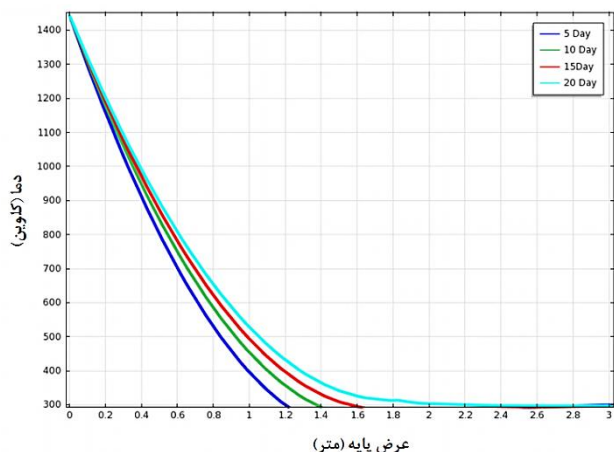
مناطق دمایی (درجه کلوین)					هندسه
۵	۴	۳	۲	۱	
۱۵۰۰	۱۴۰۰	۱۲۰۰	۱۱۵۰	۸۵۰	سقف
۱۲۰۰	۱۱۰۰	۹۵۰	۸۰۰	۶۰۰	کف
۱۴۰۰	۱۳۰۰	۱۱۰۰	۱۰۰۰	۷۷۵	بخش بالایی
۱۳۰۰	۱۲۰۰	۱۰۵۰	۹۵۰	۷۰۰	بخش پایینی

در ادامه تحلیل نتایج فقط برابر حالت پنجم (طول کارگاه استخراج برابر با ۵ متر) آورده شده است و نتایج سایر مدل‌ها در بخش نتیجه‌گیری بیان شده است

#### ۵- تحلیل نتایج

بعد از وارد کردن مرزهای دمایی و نیز مش‌بندی مدل، با حل مساله برای یک مدت مشخص (بر حسب روز)، امکان بررسی توزیع دما در اطراف کارگاه استخراج وجود دارد. در این تحقیق توزیع دما در سقف، کف و پایه محافظ بین دو پهنه برای مدت زمان‌های مختلف گازکردن تا ۲۰ روز بررسی شده است. به عنوان نمونه مناطق هم‌دما در اطراف کارگاه استخراج برای مدت زمان ۲۰ روز در شکل ۱۲ نشان داده شده است و سایر نتایج در ادامه بیان شده است.





شکل ۱۴: پروفیل تغییرات دما در داخل پایه بر حسب روز

### ۵-۳- تغییرات دما در امتداد سینه‌کار استخراجی

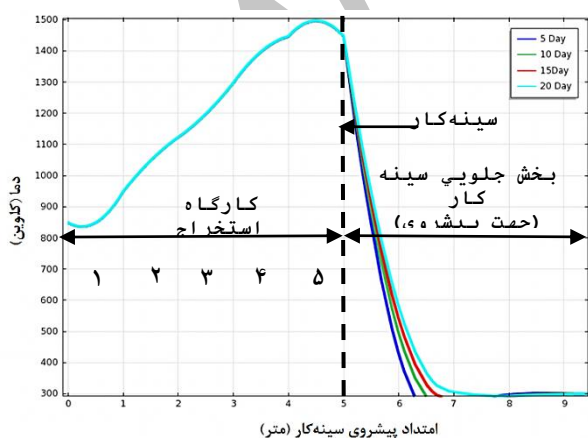
تغییرات دما در امتداد سینه‌کار استخراجی (در ۱ سانتی‌متری سقف در امتداد محور Y) در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

با توجه به شکل مذکور نکات زیر قابل توجه است:

- در روز پنجم حداکثر دما در بالای سینه‌کار در فاصله تقریباً ۱/۳ متری آن قرار دارد. میزان نفوذ دما برای روز بیستم برابر با ۲/۵ متر است.

- از دمای ۶۰۰ تا ۳۰۰ درجه کلونین، نرخ نفوذ دما چشم‌گیر است به عبارتی دیگر به عنوان نمونه در دمای ۳۰۰ درجه کلونین اختلاف میزان نفوذ دما بین روز پنجم و بیستم برابر با ۱/۲ متر است در حالی‌که در دمای ۶۰۰ درجه کلونین این اختلاف به ۰/۴ متر می‌رسد.

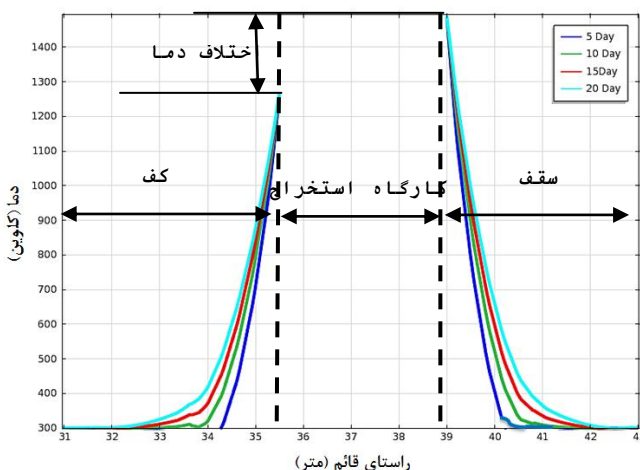
- نکته قابل توجه دیگر این است که روند نمودار تغییرات دما در جلو سینه‌کار شباهت زیادی به تنش‌های جلویی در روش جبهه‌کار بلند مکانیزه دارد.



شکل ۱۵: پروفیل تغییرات دما در امتداد سینه‌کار استخراجی (در ۱

سانتی‌متری سقف در امتداد محور Y) بر حسب روز

سقف و کف از ماسه سنگ است. مقدار نفوذ دما برای مدت ۵ روز گاز کردن برابر با ۱/۴ متر و برای ۲۰ روز تقریباً ۳/۵ متر است. با توجه به نتایج بیان شده در بخش ب، مشخص می‌شود اختلاف نفوذ دما به داخل سقف و کف برای ۲۰ روز چیزی در حدود ۰/۶ متر است. در حالی‌که این اختلاف نفوذ دما برای روزهای کمتر مقدار ناچیزی است و تقریباً با هم برابر است.



شکل ۱۳: پروفیل تغییرات دما در طبقات سقف بر حسب روز

### ۵-۲- تغییرات دما در پایه زغالی بین دو پهنه

پایه‌ی برجای گذاشته بین دو پهنه در روش UCG با هدف جداسازی دو پهنه گاز کردن از یکدیگر، جلوگیری از نشست سطح زمین و نیز کمک به سرد شدن پهنه‌های بعدی، پس از عملیات گاز کردن طراحی و جانمایی می‌شود [۲۷]. در شکل ۱۴ پروفیل تغییرات دما در داخل پایه بین دو پهنه نشان شده است. با توجه به شکل مذکور روشن است که هر چه از مدت زمان عملیات گاز کردن بگذرد، حرارت بیشتر به داخل لایه زغال‌سنگ نفوذ می‌کند. در روز پنجم میزان نفوذ حرارت در داخل پایه برابر ۱/۲ متر است و این میزان نفوذ در روز بیستم به ۲/۲ متر می‌رسد. با توجه به عرض پایه ۱۸ متری می‌توان به این نتیجه رسید که بیشتر عرض پایه بدون تغییرات دمایی است.

#### ۵-۴- شار گرمایی ۲۲

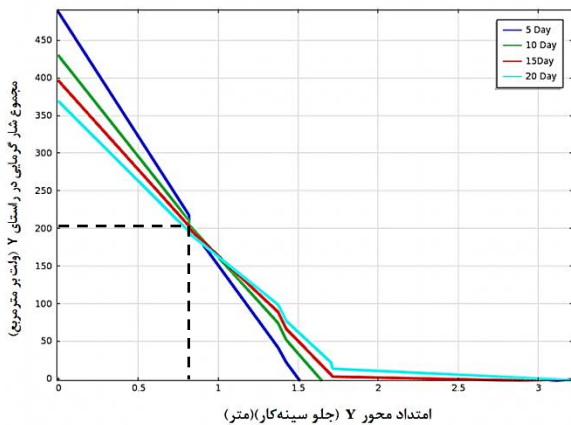
میزان انرژی گرمایی عبوری از یک سطح، شار گرمایی نامیده می‌شود. واحد شار گرمایی در سیستم SI برابر با وات بر مترمربع است [۲۸]. نتایج مجموع شار گرمایی در طبقات سقف، کف و پایه محافظ در شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ ترسیم شده است. با توجه به شکل‌های مذکور نکات زیر قابل توجه است.

- شار گرمایی در طبقات سقف بزرگ‌تر از طبقات کف و پایه است و علت اصلی آن هم بزرگ‌تر بودن گرادیان دما در قسمت سقف است. با توجه به شکل ۱۶ می‌توان دریافت که در راستای محور X شار گرمایی بعد از ۱/۷ متر به صفر رسیده است. علاوه بر این با توجه به شکل ۱۷ در راستای محور Y شار گرمایی بعد از ۱/۵ متر به صفر رسیده است. این فواصل منطبق بر فاصله‌ای است که دما به شرایط اولیه خود رسیده است.

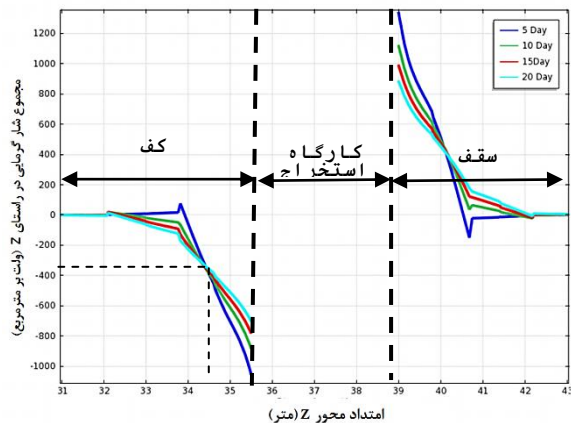
- حداکثر شار گرمایی در راستای محور X و Y برابر با ۵۰۰ وات بر مترمربع و در راستای محور Z برابر با ۱۳۰۰ وات بر مترمربع است.

- در شار ۱۶۰ وات بر مترمربع (محل تلاقی نمودارهای شار)، شار گرمایی در راستای محور X و Y در روزهای مختلف گاز کردن با هم برابر است. این در حالی است که در راستای محور Z در طبقات سقف در شار ۴۵۰ وات بر مترمربع اتفاق می‌افتد.

- هر چه زمان گاز کردن در کارگاه استخراج کمتر باشد، شار گرمایی ایجاد شده در مناطق مجاور کارگاه استخراج بیشتر بوده و در منطقه‌ای نزدیک‌تر به صفر می‌رسد.



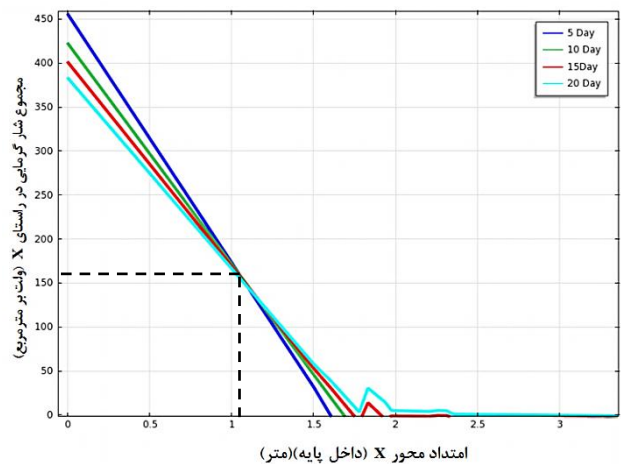
شکل ۱۷: مجموع شار گرمایی در امتداد محور Y (جلو سینه‌کار)



شکل ۱۸: مجموع شار گرمایی در امتداد محور Z (در داخل طبقات سقف و کف)

#### ۶- بررسی اعتبار مدل

به منظور بررسی اعتبار مدل، از نتایج نصب ابزارهای دمایی در مجموعه Bloodwood Creek استفاده شده است. نتایج ابزاربندی در این مجموعه نشان داده است که سنسورهای نصب شده در بالای لایه زغالسنگ نصب شده‌اند، از ۱۰ روز قبل از این که سینه‌کار گاز کردن به موازات آن نقطه برسد شروع به گرم شدن کرده‌اند. نتایج تجزیه و تحلیل دماها نشان داده است که در بالای سقف فضای استخراجی انتشار گرما بیشتر است. همچنین نتایج این اندازه‌گیری‌ها نشان داد که دما در هیچ زمانی به ۶۰ متری بالای فضای استخراجی نرسیده است [۲۹]. با توجه به موارد بیان شده روشن است که نتایج مدل ارائه شده با نتایج مجموعه Bloodwood Creek مطابقت بالایی دارد زیرا سرعت پیشروی سینه‌کار در مجموعه Bloodwood Creek برابر با ۰/۳ متر بر روز بوده است، بنابراین با توجه به این که ۱۰ روز قبل سنسورهای دمایی دچار تغییرات شده‌اند نشان دهنده آن است که حرارت در مدت



شکل ۱۶: مجموع شار گرمایی در امتداد محور X (داخل پایه)

- در فواصل بیشتر از ۱/۱ متر از کارگاه استخراج در پایه و فواصل بیشتر از ۰/۷۵ متر در سینه‌کار، میزان شار گرمایی در مدت زمان طولانی بیشتر از روزهای مدت زمان‌های کوتاه است. این فاصله برای طبقات سقف و کف تقریباً ۱ متر است.

### مراجع

- [۱]. Bowen, B., & Irwin, M. (2008), *Underground Coal Gasification (UCG)*. The Energy Center at Discovery Park, Purdue University.
- [۲]. Burton, E., Friedmann, J., & Upadhye, R. (2006), *Best Practices in Underground coal gasification*. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA.
- [۳] Couch, G. R. (2009). *Underground Coal Gasification*. IEA Clean Coal Centre.
- [۴]. www.cleancoaltechnologiesinc.com
- [۵]. Youngberg, A.D., McClurg, J.E., Schmitt, J.G. (1982): Depositional environments, subsidence stratigraphy, and postburn characterization of the Paleocene-Eocene Hanna Formation at the Hanna, Wyoming underground coal gasification site: Hanna 3 experiment Laramie Energy Technology Center, Laramie, Wyoming.
- [۶]. Luo, J., Wang, L., Tang, F., He, Y., Zheng, L., 2011. Variation in the temperature field of rocks overlying a high-temperature cavity during underground coal gasification, *Mining Science and Technology (China)* 21 (2011) 709-713.
- [۷]. وفائیان، م. (۱۳۷۶). خواص مهندسی سنگ‌ها. نشر ارکان اصفهان. ۴۲۵ صفحه.
- [۸]. Wu, G., Liu, S. (2008): Research on ultrasonic characteristics of sandstone after heating to high temperature. *Boundaries of rock mechanics*. Cai and Wang, Taylor & Francis Group, London, S. 207-211.
- [۹]. Tan, Q., Luo, X., & Li, S. (2008). Numerical modeling of thermal stress in a layered rock mass. In *American Rock Mechanic Association (ARMA)*. 42<sup>nd</sup> US Rock Mechanics Symposium.
- [۱۰]. Wolf, K.H.A.A., Hettema, M.H.H., 1995. *Petrophysical and Mineralogical Properties of Overburden Rock and Coal: Part 1*. NOVEM- Delft University, technical report, 22.1.40/13.11.
- [۱۱]. Tian, H., 2013. Development of a Thermo-Mechanical Model for Rocks Exposed to High Temperatures during Underground Coal Gasification. PhD Thesis in RWTH Aachen University, Germany.
- [۱۲]. Wolf, K.H.A.A., 2007. *The Interaction between Underground Coal Fires and Their Roof Rocks*, PhD Thesis in Delft University of Technology, Netherlands.
- [۱۳]. Mortazavi, H. (1989). Rubbling and structural stability of underground coal gasification reactors. PhD Dissertation, University of Washington.
- [۱۴]. Somerton, W.H. (1992): Thermal properties and temperature-related behavior of rock/fluid systems. Amsterdam, Elsevier.

زمان ۱۰ روز، ۳ متر به داخل روباره نفوذ کرده است.

### ۷- نتیجه‌گیری

حرارت ایجاد شده در روش UCG تاثیر بسیاری بر خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و حرارتی سنگ‌های مجاور کارگاه استخراج دارد. دمای ایجاد شده درون کارگاه استخراج تا فاصله مشخصی که به خصوصیات حرارتی سنگ‌های اطراف بستگی دارد نفوذ می‌کند و سپس به مقدار دمای اولیه محیط می‌رسد. مهم‌ترین نتایج بدست آمده در این تحقیق از توزیع دما در اطراف کارگاه استخراج UCG به شرح زیر است:

- سنگ‌های سقف کارگاه استخراج تحت تاثیر بیشتری از دما قرار دارند و این امر خود عاملی است که موجب می‌شود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی این سنگ‌ها به شدت تغییر نماید.

- از نتایج بدست آمده از این تحقیق می‌توان برای مدل‌سازی ترمومکانیکی کارگاه استخراج UCG استفاده نمود. زیرا با توجه به مناطق حرارتی ایجاد شده می‌توان خصوصیات مکانیکی مواد را به درستی وارد مدل ترمومکانیکی نمود. بنابراین برآورد میدان‌های دما سبب می‌شود رفتار لایه‌های اطراف کارگاه استخراج که دارای گرادیان دمایی مختلف می‌باشند، را با دقت بیشتری مورد بررسی قرار داد.

- نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که با متغیر در نظر گرفتن توزیع دما در داخل کارگاه استخراج، میزان نفوذ به داخل سنگ‌های دربرگیرنده در روزهای ابتدایی تفاوت چندانی با هم ندارند ولی هر چه زمان بیشتر شود این اختلاف بیشتر می‌شود.

- روند تغییرات نفوذ دما به داخل سنگ‌های دربرگیرنده در مدل‌های مختلف عددی در جدول ۴ بیان شده است. با توجه به نتایج بیان شده می‌توان دریافت که تاریخچه زمانی گاز کردن در داخل کارگاه استخراج تاثیر بسزایی در میزان نفوذ دما دارد.

جدول ۴: نرخ تغییرات نفوذ دما به داخل سنگ‌های اطراف در

مدل‌های عددی

حالات مدل‌سازی	زمان (روز)	میزان نفوذ (متر)		
		پایه	سقف	کف
اول	۱	۰/۸	۰/۹۱	۰/۷
دوم	۲	۰/۹	۱	۰/۷۵
سوم	۳	۰/۹۵	۱/۱	۰/۸۱
چهارم	۴	۱/۰۵	۱/۲۵	۰/۹
پنجم	۵	۱/۲	۱/۷	۱/۲

- 4 Cavity
- 5 Luo
- 6 Specific Heat
- 7 Thermal Conductivity
- 8 Thermal Expansion Coefficient
- 9 Somerton
- 10 Hajpál and Török
- 11 Vosteen and Schellschmidt
- 12 Robertson
- 13 Clauser and Huenges
- 14 Glass
- 15 Bangham and Franklin
- 16 CRIP: Controlle Retraction Injection Point
- 17 Heat Transfer
- 18 Mass Transport
- 19 Conduction
- 20 Direct Method
- 21 Iterative Methods
- 22 Heat Flux

[۱۵]. Hajpál, M., Török, Á. (1998): Petrophysical and mineralogical studies of burnt sandstones. 2nd Int. PhD symposium in civil engineering, Budapest. S. 1-9.

[۱۶]. Vosteen, H.D., Schellschmidt, R. (2003): Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock. physics and chemistry of the earth, Vol. 28, S. 499-509.

[۱۷]. Robertson, E.C., 1988. Thermal Properties Of Rocks. U.S. Department Of The Interior Geological Survey.

[۱۸]. Clauser, C., Huenges, E., Eds. (1995): Thermal conductivity of rocks and minerals. Thermal conductivity of rocks and minerals Rock physics and phase relations: a handbook of physical constants.

[۱۹]. Glass, R.E. (1983): The effect of thermal and structural properties on the growth of an underground coal gasification cavity. Proceedings of the ninth annual underground coal gasification symposium, S. 304-313.

[۲۰]. Bangham, D.H., Franklin, R.E. (1946): Thermal expansion of coals and carbonised coals. Trans. Faraday Soc., Vol. 42, S. 289-294.

[۲۱]. خلاصه گزارشات، (۱۳۷۹)، خلاصه نتایج گزارشات عملیات اکتشاف مقدماتی منطقه ۱ مزیو، شرکت زغال سنگ پروده طیس.

[۲۲]. نجفی، مهدی؛ جلالی، سید محمد اسماعیل؛ کاکایی، رضا؛ سرشکی فرهنگ؛ رمضان زاده، احمد؛ ۱۳۹۱، امکان سنجی استحصال انرژی از منابع زغال سنگ با استفاده از فناوری پیشرفته گازکردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG)، مطالعه موردی: منطقه زغالی مزیوی طیس، دومین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی، دانشگاه تهران.

[۲۳]. [www.comsol.com](http://www.comsol.com)

[۲۴]. Comsol Multi Physice, 2012, Heat transfer mouldre user Guide. VERSION 4.2.

[۲۵]. Daggupati, S; Mandapati, RN; Mahajani, MS. (2010). Laboratory studies on combustion cavity growth in lignite coal blocks in the context of underground coal gasification. *Energy Journal*, 35(6).

[۲۶]. EES, 2012. Swan Hills In-Situ Coal Gasification Technology Development. Final Outcomes Report, Alberta Innovates – Energy and Environment Solutions.

[۲۷]. GasTech, Inc report. (2007), Viability of Underground Coal Gasification in the Deep Coals of the Powder River Basin, Wyoming. (pp. 9-12). Casper: GasTech, Inc.

[۲۸]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Heat\\_flux](http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_flux).

[۲۹]. Mallett, C., Burl, D. (2010). Bloodwood Creek UCG Pilot, 2008 - 2010. International Pittsburgh coal conference, Istanbul, Turkey.

پی نوشت

<sup>1</sup>Underground Coal Gasification

<sup>2</sup> Injection Well

<sup>3</sup> Production Well