

## انتخاب لایه امیدبخش برای استخراج به روش گازکردن زیرزمینی زغال سنگ

### (UCG)، مطالعه موردی: منطقه زغالی مزیونی طبس

مهدی نجفی<sup>۱</sup>، سید محمد اسماعیل جلالی<sup>۲</sup>، رضا خالوکاکایی<sup>۳</sup>، علی اصغر لطفی آزاد<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود،

mehdinajafi1362@gmail.com

۲- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود

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

۴- دانش آموخته کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۲/۱ تاریخ تصویب: ۱۳۹۲/۹/۲۱

### چکیده

در روش تبدیل به گازکردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG: Underground Coal Gasification)، لایه‌های زغال سنگ با ضخامت‌های مختلف و در اعماق متفاوت بدون نیاز به عملیات معدن‌کاری سنتی با یک فرآیند پیشرفته ترمومکانیکی و شیمیایی به صورت برجا در زیرزمین به گاز سنتزی تبدیل می‌شود و گاز حاصله طی فرآیندهای نسبتاً ساده‌ای به انواع محصولات حامل انرژی تبدیل می‌گردد. پارامترهای زیادی از جمله ضخامت، عمق، شیب لایه، نوع زغال سنگ، شرایط گسل‌ها و درزه‌های منطقه، ذخیره زغالی، شرایط سقف و کف لایه و شرایط آبشناسی در انتخاب محل اجرای UCG تاثیر می‌گذارند. در این تحقیق با مطالعه بر روی منطقه زغالی مزیونی طبس و با در نظر گرفتن معیارهای محل اجرای UCG، لایه زغالی مستعد برای UCG به روش منبع احتراق قابل کنترل پسرو (CRIP: Controlled Retraction Injection Point) انتخاب شد. انتخاب لایه زغالی مستعد طی دو مرحله، مرحله اول بدون در نظر گرفتن نوع روش گازکردن و در مرحله دوم با انتخاب روش گازکردن CRIP انجام شده است. نتایج حاصله بیانگر این است که لایه زغالی M2 به دلیل ضخامت بالا و ذخیره زیاد نسبت به سایر لایه‌های بررسی شده، دارای برتری قابل ملاحظه‌ای است. علاوه بر این لایه‌های زغالی M1، M5، M4 و M2-1 به ترتیب در اولویت‌های بعدی برای گازکردن به روش CRIP هستند.

واژگان کلیدی: گازکردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG)، حوضه زغالی مزیونی طبس، گاز سنتزی

### مقدمه

دنیا گسترش یافته است [6 و 7]. بطور کلی در فرآیند UCG در ابتدا چاه‌های تزریق (Injection Well) و تولید (Production Well) تا رسیدن به سطح لایه زغال سنگ حفاری و به یکدیگر متصل می‌شوند. بعد از حفاری چاه‌های تزریق و تولید و ایجاد ارتباط بین آن‌ها اکسیدان (مشمول بر ترکیبی از هوا، اکسیژن و بخار آب)

تبدیل زغال سنگ برجا به محصولات گازی را گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG: Underground Coal Gasification) می‌نامند. ایده گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ، برای اولین بار توسط دانشمند آلمانی ویلیام زیمنس (Willia Siemens) در سال ۱۸۶۸ میلادی ارائه شده است و هم‌اکنون روش UCG در کشورهای تولیدکننده زغال سنگ در

روش UCG برای آن دسته از منابع زغالسنگ کشور که مصرف صنعتی ندارند و فقط ارزش حرارتی دارند از جهات بسیاری قابل توجه است.

بر این اساس استفاده از روش UCG موجب توسعه روزافزون انرژی در کشور خواهد شد. تاکنون مطالعاتی در کشور بر روی UCG انجام شده است [۱ و ۲].

در این تحقیق برای نخستین بار در کشور انتخاب لایه امیدبخش در روش گازکردن زیرزمینی زغالسنگ به روش احتراق قابل کنترل پرسو (CRIP: Controlled Retraction Injection Point) در منطقه زغالی مزیونی طبس مورد بررسی قرار گرفته است. برای دستیابی به این هدف با در نظر گرفتن معیارهای انتخاب محل اجرای UCG (شرایط زمین شناسی) و نیز شرایط اختصاصی مربوط به روش (CRIP)، مستعدترین لایه زغالسنگ برای استخراج به روش UCG در مقیاس تجاری مستعد انتخاب شده است.

### معرفی 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 دارا هستند. از بین چهار حوضه زغالی مذکور، زغالسنگ‌های حوضه مزینو از نوع حرارتی بوده و قابلیت بهتری برای روش UCG دارند. از این رو در این تحقیق، ناحیه زغالدار مزینو از حوضه زغالدار طبس به منظور استخراج با روش UCG انتخاب شده است. ناحیه مزینو ۸,۸۰۰ کیلومتر مربع از حوضه زغالدار طبس را شامل می‌شود. این ناحیه در ۸۵ کیلومتری غرب شهرستان طبس قرار

به داخل چاه تزریق ارسال می‌شوند تا باعث سوختن زغالسنگ و تبدیل آن به گاز شود. بر اثر احتراق، گرما منو اکسیدکربن و بعضی گازهای ترکیبی تولید می‌شود.

گاز ترکیبی از فضای استخراجی (Cavity) ایجاد شده در لایه زغالسنگ به داخل چاه تولید و سپس به سطح زمین منتقل می‌شود.

روش استخراج یک لایه زغالسنگ با توجه به عوامل متعددی نظیر شرایط زمین‌ساختی و هندسی لایه زغالسنگ، ضخامت روباره، وضعیت توپوگرافی محل معدن و امکانات فنی انتخاب می‌شود.

به دلیل وقوع فرآیندهای همزمان در UCG در اعماق زمین، مشخصات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی محیط بیشترین تأثیر را بر بازدهی فرآیند UCG، ملاحظات زیست‌محیطی و اقتصادی بودن طرح دارند [9].

از این رو مهم‌ترین عامل در موفقیت روش UCG، در یک منطقه انتخاب محل اجرای مناسب و انتخاب لایه امید بخش متناسب با شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی منطقه است. به منظور کاربرد روش UCG در یک منطقه زغالسنگی، همانند سایر روش‌های استخراج زغالسنگ پارامترهای متعددی باید در نظر گرفته شود.

بر این اساس کشورهای فعال در زمینه UCG یکسری معیارها شامل نوع زغالسنگ (Coal Rank)، شیب لایه زغالسنگ، ذخیره لایه زغالسنگ، ضخامت لایه زغالسنگ، نفوذپذیری لایه زغالسنگ، درصد خاکستر لایه زغالسنگ، ضخامت روباره و وجود گسل‌ها ناپیوستگی‌های موجود در منطقه برای پیاده‌سازی UCG در یک منطقه ارایه نموده‌اند.

مشخصات کلی منطقه مزینوی و لایه‌های زغالی این منطقه به شرح زیر است [۵]:

الف- جنس رسوبات بین لایه‌های زغالی عمدتاً شیل و ماسه‌سنگ است.

ب- حداکثر عمق محاسبه ذخیره برای لایه M1 حدود ۶۵۰ متر از سطح زمین است.

ج- درجه زغال‌سنگ‌های منطقه مزینو از نوع آنتراسیت و نیمه آنتراسیت است. این زغال‌سنگ‌ها دارای ارزش دارای ارزش حرارتی بالایی هستند.

د- منطقه مزینو از توپوگرافی مناسب و پوشش گیاهی کم برخوردار بوده و دور از مناطق پرجمعیت، پارک‌های ملی، زیست‌گاه حیات وحش، مزارع کشاورزی، چاه‌های آب، سفره‌های زیرزمینی با آب قابل شرب و میادین نفت و گاز واقع شده است. در جدول (۱) مشخصات هندسی و کیفی لایه‌های زغالی منطقه مزینو بیان شده است.

ه- ذخیره لایه‌های زغالی در منطقه مزینوی به بیش از ۱/۴ میلیارد تن می‌رسد.

### روش تحقیق

به منظور تعیین لایه امید بخش در منطقه زغالی مزینوی طبس به صورت کلی دو مرحله در نظر گرفته شد. مرحله اول انتخاب لایه‌های مناسب برای UCG بدون در نظر گرفتن روش گاز کردن و در مرحله دوم لایه امید بخش با در نظر گرفتن نوع روش گاز کردن (روش CRIP) بررسی شده است.

گرفته است. منطقه مزینو در تقسیمات زمین‌شناسی ایران در محدوده ایران مرکزی و طول جغرافیایی ۳۳° ۸' تا ۳۳° ۱۳' درجه و عرض جغرافیایی ۵۶° ۱۰' درجه در نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰/۰۰۰ طبس قرار گرفته است [۳].

ناحیه مزینو دارای ساختمان پیچیده‌ای است و دستخوش عوامل تکتونیکی شده است. فعالیت گسل‌ها در برخی نقاط شدید و در برخی نقاط ضعیف است [۳].

در منطقه زغالی طبس گسل‌های شمالی جنوبی، مانند کلمرد، طبس، نایبند و گسل‌های شرقی-غربی مانند چشمه رستم، زنوگان، قوری چای و انارکی-تخت نادر و قدیر از مهمترین گسل‌های ناحیه هستند [۴].

گسل بزرگ و قدیمی کلمرد در غرب ناحیه مزینو قرار دارد. با توجه به جهت اصلی (شرقی - غربی)، بیشتر گسل‌ها به صورت بین لایه‌ای عمل می‌کنند. همچنین عکس‌ها و پیمایش سطحی نشان دهنده‌ی این است که گسل‌های بزرگ در ناحیه کمتر است [۳].

حداکثر ضخامت بخش زغال‌دار مزینو ۱۰۰۰ متر برآورد شده است.

در این محدوده، ۷۵ لایه زغال‌دار شناسایی شده و به سه بخش تحتانی (۱۳۲ متر)، بخش میانی (۳۰۸ متر) و بخش فوقانی قابل تفکیک است. ۸ لایه زغال‌دار در بخش تحتانی و ۱۰ لایه زغالی در بخش میانی با ضخامت (۰/۲۲ تا ۶/۴۴ متر) مورد بررسی و شناسایی قرار گرفته است.

اگر چه بخش فوقانی در برگیرنده لایه‌های زغالی قابل توجهی است، ولی عملیات اکتشافی بر روی آن انجام نشده است [۳].

جدول ۱- مشخصات هندسی و کیفی لایه‌های زغالسنگ ناحیه مزیونی [۳]

ردیف	نام لایه	ضخامت لایه (متر)	فاصله تا لایه بعدی (متر)	حداکثر شیب لایه (درجه)	خاکستر (درصد)	مواد فرار (درصد)	رطوبت (درصد)	حداکثر ضخامت روپاره (متر)	ارزش حرارتی متوسط (کیلوکالری بر کیلوگرم)	ذخیره کل لایه (میلیون تن)
۱	M27	۰/۵۲	-	-	-	-	-	۸۰	۴۸۰۲	-
۲	M26	۱/۲۱	۲۱	۱۸	۳۹/۱	۱۲/۹۰	۰/۹	۱۰۰	۴۸۰۲	۱۵/۸
۳	M25	۱/۱	۶۰	۲۰	۳۸/۳	۱۳/۱۵	۰/۷	۱۶۰	۴۸۲۲	۲۵/۸
۴	M23-1	۰/۶۸	۱۱	-	۳۵/۷	-	۰/۶	۱۷۲	۵۱۶۴	۸/۵
۵	M23	۰/۶۴	۲۰	-	۲۸/۷	-	۰/۷	۱۹۲	۵۷۸۷	۳۸/۸
۶	M22-1	۰/۵۸	۹۱	۲۶	۲۱/۴	-	۰/۷	۲۸۰	۶۴۳۵	۷/۵
۷	M17	۰/۵۸	۲۶	۲۶	۳۸/۱	۱۲/۲۷	۰/۶	۳۱۰	۴۹۰۰	۱۲/۸
۸	M14-1	۰/۸۷	۳۵	-	۳۵/۴	-	۰/۹	۳۴۵	۵۱۷۱	۲۲/۴
۹	M10-2	۰/۶۷	۷	-	۳۲/۹	-	-	۳۵۰	۵۴۰۴	۱۴/۵
۱۰	M10-1	۰/۵۸	۱۱	-	۳۷/۹	-	-	۳۶۲	۴۹۵۱	۱۰/۶
۱۱	M10	۰/۵۲	۲۱	۲۵	۲۵/۲	۸/۶۸	۰/۹	۳۸۳	۶۱۲۴	۱۱/۵
۱۲	M9	۰/۸۵	۲۱	-	۳۴/۷	۹/۴۵	۰/۶	۴۰۵	۵۲۴۰	۲۶/۴
۱۳	M8	۰/۶۸	۴۷	-	۳۴/۸	۹/۹۰	۰/۶	۴۵۰	۵۲۱۴	۱۵/۳
۱۴	M6	۱	۳۳	۲۳	۳۸/۱	۱۰/۰۸	۰/۷	۴۸۵	۴۹۰۰	۲۶/۹
۱۵	M5	۱/۸۸	۲۱	۲۰	۳۶/۰	۹/۲۹	۰/۶	۵۰۵	۵۱۱۴	۸۰/۳
۱۶	M4	۱/۶۸	۳۶	۱۵	۳۳/۰	۸/۶۳	۰/۸	۵۴۱	۵۴۰۷	۶۰/۸
۱۷	M2-1	۱/۵۱	۳۰	-	۳۶/۲	-	۰/۸	۵۷۰	۵۰۸۷	۴۴/۴
۱۸	M2	۳/۵۷	۲۸	۱۵	۳۶/۴	۸/۳۳	-	۶۰۰	۵۰۶۶	۱۳۹/۶
۱۹	M1	۲/۵۰	-	۲۵	۳۵/۰	۹/۲۳	-	۶۵۰	۵۲۰۹	۱۰۰/۵

جدول ۲- مراحل انتخاب لایه‌های زغالی مستعد برای گازکردن زیرزمینی زغال‌سنگ در منطقه مزینوی طبس

منطقه مزینوی طبس			محدوده قابل کار برای UCG	مشخصه	مرحله	ردیف
لایه‌های زغالی مستعد	لایه‌های زغالی غیر مستعد	مشخصه				
تمام لایه‌های زغالی در جدول ۱ در این مرحله مستعد به شمار می‌روند.	---	درجه زغال‌سنگ لایه‌های زغالی منطقه مزینو از نوع آنتراسیت تا نیمه آنتراسیت است	تقریباً همه انواع زغال‌سنگ‌ها برای UCG مناسب هستند [7 و 10].	نوع زغال‌سنگ	اول	۱
.M5 .M6 .M25 .M26 M1 .M2 .M2-1.M4	.M23-1 .M27 .M22-1 .M23 .M14-1 .M17 .M10-2 .M10-1 M8 و M9 .M10	با توجه به اطلاعات بیان شده در جدول ۱، ضخامت لایه‌های زغالی این منطقه از ۰/۵ متر تا حدود ۴ متر متغیر است.	روش UCG در لایه‌های زغال‌سنگ با ضخامت ۱ تا ۳۰ متر داری صرفه اقتصادی بیشتری است [6 و 7].	ضخامت لایه	دوم	۲
.M5 .M6 .M25 .M26 M1 .M2 .M2-1.M4	-----	شیب لایه‌های زغالی منطقه مزینو کم است و حداکثر به ۲۸ درجه می‌رسد.	در روش UCG لایه‌های کم شیب دارای مزیت هستند. به طور کلی لایه‌های زغالی با شیب صفر تا ۷۰ درجه برای روش UCG مناسب هستند [7].	شیب لایه	سوم	۳
.M5 .M6 .M25 M1 .M2 .M2-1.M4	به دلیل ملاحظات نشست سطح زمین و نشست گاز از کارگاه استخراج لایه M26 مستعد به شمار نمی‌رود.	حداکثر ضخامت روباره لایه‌های زغالی از ۸۰ متر تا بیش از ۶۰۰ متر متغیر است.	عمق بهینه بیش از ۱۰۰ متر مناسب است.	ضخامت روباره	چهارم	۴
.M5 .M6 .M25 M1 .M2 .M2-1.M4	-----	عکس‌ها و پیمایش سطحی نشان دهنده این است که گسل‌های بزرگ در ناحیه کمتر است.	حتی‌الامکان گسل نباید در محدوده معدن‌کاری UCG وجود داشته باشند. در هر صورت تراکم گسل‌ها نباید بیش از یک گسل در هر ۳۰ متر باشد [9].	گسل	پنجم	۵
.M5 .M6 .M25 M1 .M2 .M2-1.M4	-----	درصد خاکستر لایه‌های زغالی منطقه مزینو زیر ۴۰ درصد است.	در روش UCG با افزایش میزان خاکستر ارزش حرارتی گازهای تولید شده به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد بطورکلی خاکستر زغال‌سنگ باید کمتر از ۶۰ درصد باشد [7].	درصد خاکستر زغال‌سنگ	ششم	۶

## مرحله اول

د- علت عدم انتخاب لایه زغالی غیر مستعد به این دلیل است که هر چند منطقه مزینو تحت تاثیر گسل‌ها قرار گرفته است ولی به دلیل فواصل زیاد آن‌ها از یکدیگر تاثیری بر عدم انتخاب یک لایه برای گازگردن به روش UCG ندارند. ه- با توجه به نتایج بیان شده در جدول ۲ ردیف ۶ مشخص است که لایه‌های زغالی M2، M2-1، M4، M5، M6، M25 و M1 امید بخش برای استخراج به روش UCG بدون در نظر گرفتن نوع روش گازکردن هستند. لازم به ذکر است که عدم انتخاب سایر لایه‌ها بدین معنا نیست که قابلیت گازکردن این لایه‌ها وجود ندارد بلکه بیشتر به دلیل نوع روش گازکردن و اعمال شرایط گازکردن در مقیاس تجاری از مراحل انتخاب‌ها حذف شده‌اند.

مرحله دوم: روش‌های مختلفی شامل روش اتاقی (Chamber Method)، روش گمانه‌ای (Borehole Method)، روش گالری شیب‌دار (Steeply Dipping)، روش چاه قائم (روسی) (Vertical Well Method)، روش UCG، روش تونل بلند دو مرحله‌ای (تونلی) (Long-Tunnel, Large-Section, Two-Stage) و روش CRIP برای اجرای UCG وجود دارد [7,11]. در حال حاضر در مسیر تجاری سازی UCG همه‌ی روش‌ها به جز روش‌های پسر و که مبتنی بر روش CRIP هستند به دلیل کوچک بودن کارگاه استخراج مطلوبیت زیادی ندارند ولی روش‌های مبتنی بر CRIP دو یا سه کاناله برای اجرای UCG در مقیاس تجاری بیشتر مورد توجه می‌باشند.

در روش CRIP موازی سه کاناله، سه چاه به طور موازی در کف لایه زغال‌سنگ به طول ۱۰۰ تا ۷۰۰ متر حفر می‌شود، سپس انتهای آن‌ها به هم وصل

در این مرحله از میان لایه‌های زغالی منطقه مزینو (جدول ۱)، لایه‌های زغالی که در یک نگاه اولیه مستعد برای گازکردن به روش UCG مستعد هستند انتخاب شده‌اند. انتخاب لایه‌های زغالی با بررسی عوامل موثر در انتخاب محل اجرای UCG که شامل نوع زغال‌سنگ، ضخامت لایه، شیب لایه، ضخامت روباره و ذخیره زغال‌سنگ است، انجام شد. مراحل عملیاتی انتخاب لایه زغالی مستعد در جدول ۲ بیان شده است. لازم به ذکر است که هر کدام از این مراحل به ترتیب انجام شده است و لایه‌ای که در مرحله قبل غیرمستعد انتخاب شده است از انتخاب‌ها حذف شده است.

با توجه به جدول ۲ نکات زیر قابل توجه است:

الف- از آنجا که همه نوع زغال‌سنگ‌ها از لیگنیت تا آنتراسیت مناسب برای گازکردن هستند و نیز به دلیل نوع لایه‌های زغالی منطقه مزینو، تمام لایه‌های در مرحله اول به عنوان لایه مستعد انتخاب شده‌اند.

ب- در مرحله دوم لایه‌های M23، M23-1، M27، M22-1، M17، M14-1، M10-1، M10-2، M10، M9 و M8 به دلیل این‌که ضخامت آن‌ها کمتر از ۱ متر است به عنوان لایه غیر مستعد انتخاب شده‌اند.

ج- علت اصلی انتخاب لایه M26 به عنوان لایه غیر مستعد این است که عمق روباره آن کمتر از ۱۰۰ متر است. هر چه عمق روباره کمتر باشد نشت گاز از داخل فضای استخراجی بیشتر شده و احتمال وارد شدن آن به سطح زمین وجود دارد. از این‌رو به دلیل رعایت مسایل زیست محیطی از انتخاب‌ها حذف شده است.

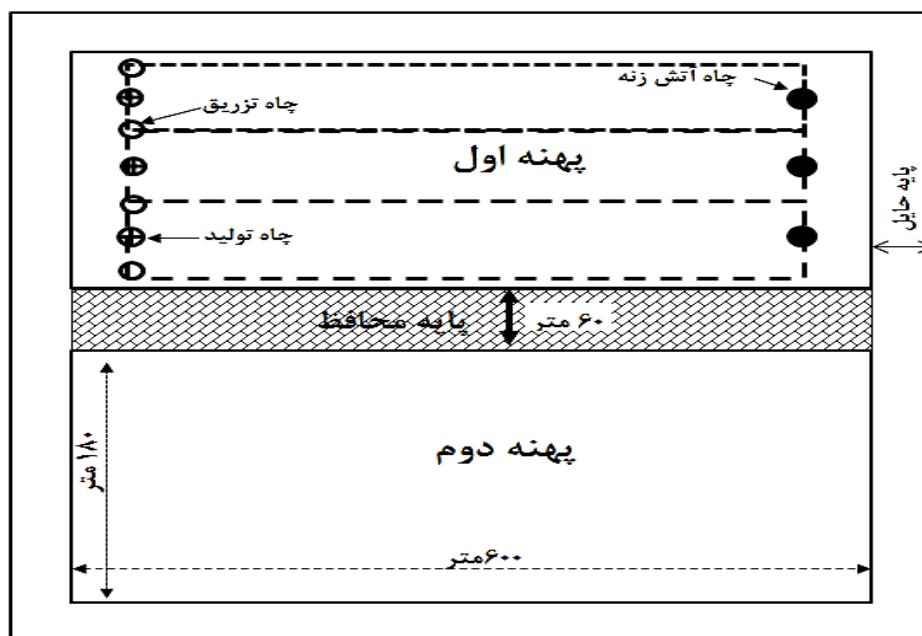
(Bloodwood Creek) استرالیا را نشان می‌دهد [10]. در این کارگاه نخست دو چاه عمود (چاه‌های تزریق و تولید) با فاصله ۳۰ متر حفر شده است. سپس این دو چاه در کف لایه زغال‌سنگ با استفاده از حفاری جهت‌دار به طول ۶۰۰ متر پیشروی کرده و انتهای آن‌ها با استفاده از یک چاه قائم به‌همدیگر وصل شده است.

با توجه به مطالب بیان شده، در مرحله دوم از بین لایه‌های زغالی مستعد انتخاب شده مرحله اول، لایه زغالی مستعد به روش CRIP انتخاب و مورد بررسی قرار می‌گیرد.

می‌شود. جایی که آن‌ها به هم متصل می‌شوند، یک چاه قائم برای تسهیل آغاز فرآیند UCG حفر می‌شود (چاه آتش‌زنه) [7].

یکی از چاه‌های افقی به عنوان چاه تزریق و دیگری به عنوان چاه تولید است. فاصله بین این دو چاه افقی به ضخامت لایه زغال‌سنگ بستگی دارد.

در روش CRIP موازی، مشعل به صورت پسر و حرکت کرده و اکسیدان به صورت پیوسته و یکنواخت تزریق می‌شود [10]. شکل ۱ شمایی از طرح تجاری پیشرفته‌ترین مجموعه‌های UCG به روش CRIP موازی سه کاناله در بلاوود کریک



شکل ۱- شمایی از طرح تجاری روش UCG از نوع CRIP موازی در مجموعه بلاوود کریک استرالی

## انتخاب لایه امید بخش برای روش CRIP

### موازی در منطقه مزینو

در مرحله اول با یک نگاه کلی لایه‌های زغالی مستعد برای UCG شناسایی گردید. همانطور که قبلاً بیان شد لایه‌های زغالی M2, M2-1, M4, M5, M6, M25 و M1 برای روش UCG در منطقه مزینو مستعد هستند. به منظور انتخاب لایه مناسب برای استخراج به روش CRIP، پارامترهای مهم ضخامت لایه (ضخامت برای روش CRIP بهتر است که بیش از ۲ متر باشد [13]) و میزان ذخیره لایه زغالسنگ است. بر این اساس در مرحله دوم انتخاب لایه امیدبخش و اولویت بندی برای استخراج سایر لایه‌ها بر اساس این دو فاکتور مهم انجام شده است که در جدول ۳ مراحل آن بیان شده است.

با توجه به جدول ۳ نکات زیر قابل توجه است:

الف- مقدار ذخیره زغالسنگ یک پارامتر مهم برای اجرای روش CRIP است. با توجه به بررسی‌های Shafirovich و Arvind در سال ۲۰۰۹ میزان ذخیره مورد نیاز برای یک نیروگاه ۲۰۰ مگاواتی در مدت بیست سال در شرایطی که ارزش حرارتی برجای زغالسنگ در حدود ۵۰۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم فرض شود برابر با ۲۴ میلیون تن است [15]. بنابراین می‌توان پیش‌بینی نمود که یک نیروگاه ۲۰۰ مگاواتی سیکل ترکیبی UCG-IGCC (IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle) با بازدهی ۵۰ درصد و استفاده از هوا در تزریق، سالانه به ۱/۲ میلیون تن زغالسنگ نیاز دارد. با توجه به مشحصات بیان شده در مورد لایه‌های زغالی منطقه مزینو، همگی داری ذخیره بالایی هستند

و قادرند برای سالیان متمادی خوراک یک نیروگاه برق را تامین نمایند بنابراین در مرحله اول تمام لایه مستعد برای CRIP به حساب می‌آیند.

ب- مهم‌ترین پارامتر برای انتخاب یک لایه زغالسنگ به روش CRIP ضخامت لایه زغالسنگ است. در این مرحله از میان لایه‌های باقیمانده، لایه M25 به دلیل قرارگیری نزدیک به سطح زمین و ضخامت نه چندان مناسب (کمتر از ۲ متر) و لایه‌ی زغالی M6 به دلیل ضخامت کم برای استخراج به روش CRIP مناسب نیستند و بهتر است از انتخاب حذف شوند.

بر این اساس از میان لایه‌های باقیمانده، لایه M2 در دو فاکتور مهم یعنی ضخامت و ذخیره لایه از برتری قابل ملاحظه‌ای نسبت به سایر لایه‌ها برخوردار است از این رو این لایه نسبت به سایر لایه‌ها دارای برتری است هر چند که بعد از استخراج لایه M2، لایه‌های M1، M5، M4 و M2-1 به ترتیب برای گازکردن به روش CRIP در اولویت‌های بعدی قرار دارند. پیش‌بینی می‌شود بتوان مجموعه UCG بر روی حوضه زغالی مزیونی طبس را با مجموعه چینچایلا (Chinchilla) در استرالیا مقایسه نمود. در مجموعه چینچایلا نوع زغالسنگ از نوع ساب بیتومینه با درصد خاکستر بالای ۲۸ درصد بوده است. در مجموعه مذکور از هوا به عنوان اکسیدان استفاده شده است و در طی مدت دو سال بیش از ۳۵ هزار تن زغالسنگ به گاز تبدیل شده است که در نتیجه آن ۸۰ میلیون مترمکعب گاز سنتزی به ارزش حرارتی ۴/۵ تا ۵/۷ مگاژول بر مترمکعب حاصل شده است. بنابراین در جدول ۴ خلاصه نتایج حاصله از انتخاب لایه‌ی قابل کار UCG به روش CRIP بیان شده است.



جدول ۳- مراحل انتخاب لایه‌های زغالی امیدبخش برای روش CRIP موازی در منطقه

منطقه مزینوی طبس			محدوده قابل کار برای UCG	مشخصه	مرحله	ردیف
لایه‌های زغالی مستعد	لایه‌های زغالی غیر مستعد	مشخصه				
M5, M6, M25 M2, M2-1, M4 M1	-----	تمام لایه‌های مستعد شناسایی شده تا این مرحله از ذخیره بالایی برخوردار هستند	حداقل ذخیره زغال سنگ قابل بهره‌برداری به روش UCG در یک دوره ۱۵ ساله در انگلستان ۵ میلیون تن و در ایالات متحده ۳/۵ میلیون تن برآورد شده است [14].	ذخیره لایه زغال سنگ	اول	۱
M2-1, M4, M5 M1, M2	M25 و M6	اکثر لایه‌ها از ضخامت مناسبی برخوردار هستند.	برای روش CRIP موازی بهتر است لایه‌های زغالی دارای ضخامت بیشتر از ۲ متر باشند	ضخامت لایه زغال سنگ	دوم	۲

جدول ۴- خلاصه نتایج حاصله از انتخاب لایه‌ی قابل کار (M2) به روش CRIP

مقدار	واحد	شرح	ردیف
M2	-	لایه انتخاب شده	۱
-	آنتراسیت و نیمه آنتراسیت	نوع زغال سنگ	۲
۳/۵	متر	متوسط ضخامت لایه	۳
۱/۵۷	تن بر متر مکعب	چگالی لایه	۴
۴۰	کیلومتر مربع	گسترش لایه	۵
۱۳۹	میلیون تن	ذخیره لایه	۶
۸/۳۳	درصد	مواد فرار	۷
۳۶	درصد	خاکستر	۸
۵۰۶۶	کیلوکالری بر کیلوگرم	ارزش حرارتی متوسط	۹
۶۰۰	متر	عمق لایه (متوسط)	۱۰

## بحث

با انجام مراحل اول و دوم انتخاب لایه امیدبخش، لایه M2 از نظر فنی برای گازکردن زیرزمینی زغالسنگ به روش CRIP مناسب تشخیص داده شد. روشن است که برای بررسی امکان پیاده‌سازی این روش در منطقه مزیونی نیازمند بررسی فنی و اقتصادی پیاده‌سازی روش است. برای بررسی فنی و اقتصادی در ابتدا باید طراحی روش CRIP با هدف تامین گازسنتری یک نیروگاه برق چند مگاواتی (به عنوان نمونه ۲۰۰ مگاواتی) صورت پذیرد. انتخاب نوع نیروگاه کمک می‌نماید تا بتوان مقدار زغالسنگی که باید سالیانه به گازتبدیل گردد، محاسبه شود. با مشخص شدن مقدار زغالسنگ و ابعاد پهنه‌های طراحی شده، تعداد چاه‌های تزریق و تولید و مترای حفاری سالیانه مشخص می‌شود. به طور کلی در بررسی فنی و اقتصادی روش UCG به منظور تعیین هزینه تمام شده گازسنتری استحصال شده، هزینه‌های کلی فرآیند شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه جاری سالانه و سرمایه در گردش است. هزینه سرمایه‌گذاری شامل هزینه حفاری و لوله‌گذاری در شروع پروژه، هزینه خرید کمپرسورهای هوا، هزینه لوله‌گذاری به داخل چاه‌های تزریق و تولید (شیرآلات، اتصالات، ابزارهای ایمنی و غیره)، هزینه تجهیزات و تاسیسات سنگین مورد نیاز در سایت UCG (شامل ساختمان‌ها، چاه‌های پایش و ابزارهای الکتریکی)، حقوق و دستمزد حین ساخت است. با محاسبه هزینه‌های فوق و تشکیل جدول جریان نقدینگی پارامترهای اقتصادی NPV و IRR قابل محاسبه است و بر اساس آن می‌توان برای پیاده‌سازی روش بر روی لایه M2 تصمیم‌گیری نمود. بر این

اساس پیشنهاد می‌شود که بررسی فنی و اقتصادی روش CRIP بر روی لایه M2 طبس با هدف تامین گازسنتری یک نیروگاه برق ۲۰۰ مگاواتی انجام شود.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق به ارایه روشی برای انتخاب لایه زغالسنگ مستعد به روش UCG در یک منطقه زغالی پرداخته شد. با توجه بررسی‌های انجام شده مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است.

۱- با انجام مراحل اول و دوم در انتخاب لایه امیدبخش، لایه‌های M5، M4، M2-1، M2 و M1 مستعدترین لایه‌ها برای اجرای UCG در منطقه مزیونی تشخیص داده شد. از بین لایه‌های زغالی مذکور، لایه M2 مستعدترین لایه برای اجرای UCG به روش CRIP به لحاظ فنی است. بر این اساس با توجه به ضخامت لایه‌ها اولویت بندی استخراج لایه‌ها به شرح زیر است:

M2>M1>M5>M4>M2-1

۲- با توجه به این‌که نوع زغالسنگ M2 از نوع آنتراسیت و نیمه آنتراسیت است و این نوع زغالسنگ حاوی گاز و مواد فرار بالاتری هستند، انتظار می‌رود ارزش حرارتی گاز سنتری حاصل از فرآیند UCG در مجموعه مزیونی در مقایسه با گاز سنتری خارج شده از سایت چینچیلای استرالیا بیش از ۶ مگاژول بر مترمکعب باشد.

۳- با توجه به ذخیره ۱۳۹ میلیون تنی لایه M2 و با در نظر گرفتن این‌که برای راه اندازی یک نیروگاه

برق سیکل ترکیبی گازی سالیانه به ۱/۲ میلیون تن زغالسنگ نیاز است می‌توان نتیجه گرفت که لایه

۵- اخوان صفار، م.ح.، (۱۳۷۷). خلاصه گزارشات عملیات اکتشاف پی جوئی ناحیه مزینو (مناطق مزینو، کمر مهدی، کوچکعلی شمالی و جنوبی)، انتشارات وزارت معادن و فلزات، ۶۲ ص.

6- Burton, E., Friedmann, J., & Upadhye, R., (2006). Best Practices in Underground coal gasification. Draft. US DOE contract no W-7405-Eng-48. Livermore, CA, USA, Lawrence Livermore National Laboratory, 119p.

7- Couch, G. R., (2009). Underground Coal Gasification. IEA Clean Coal Centre. ISBN 978-92-9029-471-9, London, 129p.

8- Bowen, B., & Irwin, M., (2008). Underground Coal Gasification (UCG). The Energy Center at Discovery Park, Purdue University, 3-4 pp.

9- Robert, L., & James, R., (1989). Handbook for Selection and Characterization of Potential UCG Sites. For U.S. Department of Energy, Morgentown Energy Technology Center, Laramie Project Office, Laramie, Wyoming, 47p.

10- Białecka, B., (2009). Analysis of criteria for UCG siting and operation. Central Mining Institute, 40-166 KATOWICE, Plac Gwarków 1, Poland, 298-305 pp.

13- Pearce, S., (2008). Maximising the potential for εUCG by leveraging core mining Houston, TX, USA, Zeus Development, 42 pp.

مذکور می تواند برای مدت بیش از ۱۰۰ سال خوراک نیروگاه برق مذکور را تامین نماید.

۴- با توجه به ضخامت لایه M2 و گسترش مناسب آن می توان نتیجه گرفت بتوان پهنه های استخراجی مشابه با مجموعه بلاوود کریک (برای یک نیروگاه ۲۰۰ مگاواتی برق) با طولی حدود ۲۶۰ متر و عرض ۶۰ متر البته به روش CRIP موازی سه کاناله اجرا نمود. بنابراین با در نظر گرفتن ابعاد پهنه های استخراجی و میزان زغال سنگ مورد نیاز برای گاز کردن (۱/۲ میلیون تن) چیزی در حدود ۱۳ پهنه استخراجی باید سالیانه به گاز تبدیل گردد.

## منابع

۱- نجفی، م.، جلالی، س.ا.، کاکایی، ر.، (۱۳۹۱). بررسی پارامترهای موثر بر رشد کاواک ایجاد شده در اثر فرآیند گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG). چهارمین کنفرانس مهندسی معدن، دانشگاه تهران، ص ۳۱-۲۴.

۲- لطفی آزاد، ع.ا.، جلالی، س.ا.، رمضان زاده، ا.، (۱۳۹۱). مطالعه امکان سنجی مقدماتی استفاده از فرآیند گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ در ناحیه زغال دار مزینوی طبس، اولین کنگره ملی زغال سنگ، دانشگاه صنعتی شاهرود، ص ۳۸-۲۷.

۳- اخوان صفار، م.ح.، (۱۳۷۹). خلاصه نتایج گزارش عملیات اکتشاف مقدماتی منطقه ۱ (مزینو)، انتشارات وزارت معادن و فلزات، ۵۵ ص.

۴- ادیب، ا.، (۱۳۸۸). زمین ساخت فعال و پتانسیل خطر زمین لرزه در ناحیه طبس، فصلنامه علمی پژوهشی زمین شناسی و محیط زیست، سال سوم شماره ۳، ص ۲۹-۱۱.

- 
- انتخاب لایه امیدبخش برای استخراج به روش گازکردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG)، مطالعه موردی: منطقه زغالی مریئوی طیس
- 12- Acheick, M., Frances, S.B., et al., (2011). Viability of Underground Coal Gasification with Carbon Capture and Storage in Indiana. Indiana University-Bloomington School of Public and Environmental Affairs, 205p.
- 14- Irwin, W.M., Brian, H., Barbara J., (2009). "Indiana Coal Report 2009", Indiana Center for Coal Technology Research, Purdue University, 189p.
- 15- Shafirovich, E., & Arvind, V., (2009). Underground Coal Gasification: A Brief Review of Current Status. Indiana: Purdue University, 2 – 9 pp.

11- Fergusson, K.J., (2009). A Cleaner, Cheaper, Indigenous Fuel for Combined Cycle Plants. UCG Partnership, Woking, UK, 25P.