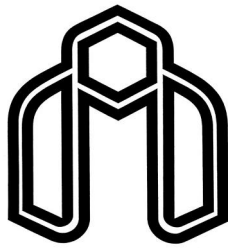


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج معدن

مدل سازی و تحلیل نشت گاز از کارگاه های استخراج

زیرزمینی تبدیل زغال سنگ به گاز (UCG)،

مطالعه موردی: معادن زغال سنگ طبس

علی اصغر لطفی آزاد

استادان راهنما:

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

دکتر احمد رمضان زاده

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد به منظور اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۱



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره :

تاریخ :

ویرایش :

فرم صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای علی اصغر لطفی آزاد رشته مهندسی معدن گرایش استخراج تحت عنوان مدل سازی و تحلیل نشت گاز از کارگاه های استخراج زیرزمینی تبدیل زغال سنگ به گاز (UCG)، مطالعه موردی: معادن زغال سنگ طبس، که در تاریخ ۱۳۹۱/۶/۲۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه : بسیار خوب امتیاز ۱۸۸) ☐ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۱- عالی (۲۰ - ۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶) ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	سید محمد اسماعیل جلالی	دانشیار	
۲- استاد راهنما	احمد رمضان زاده	استادیار	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	حسین میرزایی نصیرآباد	استادیار	
۴- استاد ممتحن	محمد حسن کیهانی	دانشیار	
۵- استاد ممتحن	فرهنگ سرشکی	دانشیار	

رئیس دانشکده
دانشگاه صنعتی شاهرود

تقدیم بہ

پرومادر مہربانم کہ در تمام مراحل زندگی ام دعایشان بدرقہ می مسیرم بودہ است؛
و برادران عزیزم حشمت الہ، داود و فرشا کہ موفقیت آنہارا آرزو مندم؛

سپاسگزاری

شایسته است که اکنون که به فضل الهی این پژوهش به پایان رسیده است، از زحمات استادان گرانقدر آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و آقای دکتر احمد رمضان زاده که بار، بنمودهای ارزنده‌ی خود، مراد انجام هر چه بهتر این پایان نامه یاری فرمودند صمیمانه سپاسگزاری نمایم.

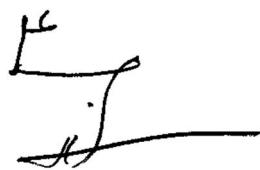
از شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران و شرکت زغال سنگ پروده طبس و آقایان مهندسین کریتی ثانی، جلالی، لطفی فاطمی و محمودی کمال تشکر و قدردانی را دارم.

همچنین از آقایان مهندسین مهدی بخشی، امیرسلطان علنیراده، حمید کر و محمد زمانی احمد محمودی که در مراحل مختلف انجام این تحقیق یاریم نمودند، قدردانی می‌نمایم.

تعهدنامه

اینجانب علی اصغر لطفی آزاد دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی استخراج معدن، دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده‌ی پایان‌نامه‌ی مدل‌سازی و تحلیل نشت گاز از کارگاه‌های استخراج زیرزمینی تبدیل زغال‌سنگ به گاز (UCG)، مطالعه موردی: معادن زغال‌سنگ طبس، تحت راهنمایی دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و دکتر احمد رمضان‌زاده متعهد می‌شوم:

- تحقیقات این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند، در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌شود.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه‌ی اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.



علی اصغر لطفی آزاد

۱۳۹۱/۶/۲۷

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نیست.

چکیده

در فرآیند گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG: Underground Coal Gasification)، لایه‌های زغال سنگ با ضخامت و شیب‌های گوناگون و در اعماق متفاوت بدون نیاز به عملیات معدن کاری سنتی با کمک فرآیند پیشرفته‌ی ترمودینامیکی و شیمیایی به صورت برجا در زیرزمین با تزریق اکسیدان‌ها (هوا یا مخلوط اکسیژن و بخار آب) به مخلوطی از گازهای قابل احتراق (CH_4 ، H_2 و CO) و غیرقابل احتراق (CO_2 ، H_2O و N_2) تبدیل می‌شود. گاز سنتزی خام پس از پمپاژ به سطح زمین، پالایش شده و برای تولید برق یا به عنوان خوراک صنایع شیمیایی استفاده می‌شود. ناحیه‌ی مزینو از حوزه‌ی زغال دار طبس دارای ۱۴۰۰ میلیون تن ذخیره‌ی احتمالی زغال سنگ حرارتی است که قابلیت کک‌شوندگی برای کاربرد در صنایع فولاد کشور را ندارد. در این تحقیق، به بررسی ضرورت و امکان‌سنجی گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ در این ناحیه پرداخته شده است. از بین لایه‌های زغال سنگ منطقه‌ی مذکور، لایه‌ی M26 با استفاده از معیارهای انتخاب کارگاه استخراج UCG، به عنوان لایه‌ی امیدبخش انتخاب شده است. از آن جا که یکی از چالش‌های مهم در فرآیند UCG، نشت گاز از راکتور زیرزمینی است که باعث اختلال در عملیات گاز کردن و کاهش بازدهی فرآیند می‌شود؛ لذا در این تحقیق نشت گاز از راکتور به صورت عددی مدل‌سازی شده است. سپس تأثیر عوامل قابل کنترل فرآیند UCG مانند درجه حرارت و فشار گاز درون راکتور و عوامل غیرقابل کنترل مانند عمق راکتور و نفوذپذیری سنگ‌های پوشان راکتور بر نشت گاز بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که درجه حرارت و عمق راکتور تأثیر ناچیز، فشار تأثیر نسبتاً زیاد و نفوذپذیری سنگ‌های اطراف راکتور تأثیر زیادی بر نشت گاز دارد.

واژگان کلیدی: گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ، معادن زغال سنگ طبس، ناحیه‌ی زغال دار مزینو، راکتور UCG، نشت گاز، دینامیک سیالات محاسباتی.

لیست مقالات استخراج شده از پایان نامه

- لطفی آزاد، علی اصغر، جلالی، سید محمد اسماعیل. و رمضانزاده، احمد. (۱۳۹۱). "تدوین پارامترهای طراحی روش گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG)". *اولین کنگره زغال سنگ ایران*.
- لطفی آزاد، علی اصغر، جلالی، سید محمد اسماعیل. و رمضانزاده، احمد. (۱۳۹۱). "مطالعه امکان سنجی مقدماتی استفاده از فرآیند گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG) در ناحیهی زغال دار مزینوی طبس". *اولین کنگره زغال سنگ ایران*.
- لطفی آزاد، علی اصغر، جلالی، سید محمد اسماعیل. و رمضانزاده، احمد. (۱۳۹۱). "بررسی جایگاه اقتصادی فرآیند گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG) در معدن کاری زغال سنگ". *اولین کنگره زغال سنگ ایران*.
- لطفی آزاد، علی اصغر، جلالی، سید محمد اسماعیل. و رمضانزاده، احمد. (۱۳۹۱). "مقایسهی نشت گاز از کارگاههای استخراج گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ در اعماق مختلف با استفاده از روش CFD، مطالعه موردی: لایهی زغال سنگ M26 ناحیهی مزینو". *چهارمین کنفرانس مهندسی معدن ایران*.

فصل نخست: معرفی روش استخراج گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ

۲	۱-۱- مقدمه.....
۴	۲-۱- فرآیند گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG).....
۵	۳-۱- پیشینه‌ی روش استخراج UCG.....
۱۱	۴-۱- منابع و ذخایر زغال سنگ در جهان.....
۱۳	۵-۱- بررسی اقتصادی روش استخراج UCG.....
۱۶	۶-۱- مزایای روش استخراج UCG.....
۱۷	۷-۱- محدودیت‌های روش استخراج UCG.....
۱۸	۸-۱- ضرورت انجام تحقیق.....
۱۹	۹-۱- هدف از تحقیق.....
۲۱	۱۰-۱- مروری بر کارهای پیشین.....
۲۲	۱۱-۱- روش انجام تحقیق.....
۲۳	۱۲-۱- سازمان‌دهی پایان‌نامه.....

فصل دوم: انتخاب کارگاه استخراج UCG و انواع روش‌های استخراج آن

۲۵	۱-۲- مقدمه.....
۲۶	۲-۲- مطالعات اولیه برای مشخص کردن کارگاه‌های استخراج.....
۲۷	۳-۲- مراحل انتخاب کارگاه‌های استخراج UCG.....
۲۸	۳-۲-۱- تعیین معیارهای انتخاب کارگاه استخراج.....
۳۳	۳-۲-۲- عوامل مؤثر در انتخاب کارگاه‌های استخراج UCG.....
۳۳	۳-۲-۳-۱- نوع زغال سنگ.....
۳۵	۳-۲-۳-۲- ضخامت لایه.....
۳۷	۳-۲-۳-۳- عمق لایه.....
۳۹	۳-۲-۳-۴- شیب لایه.....
۳۹	۳-۲-۳-۵- خاکستر زغال سنگ.....
۴۰	۳-۲-۳-۶- وجود لیچه در لایه‌ی زغال سنگ.....

۴۱	۷-۲-۳-۲- نفوذپذیری زغال سنگ
۴۱	۸-۲-۳-۲- گسل، درزه و شکاف
۴۲	۹-۲-۳-۲- آب های زیرزمینی
۴۳	۱۰-۲-۳-۲- ضخامت روباره ی تحکیم نیافته
۴۳	۱۱-۲-۳-۲- مقدار ذخیره ی زغال سنگ
۴۴	۱۲-۲-۳-۲- محدودیت های منطقه ای و اقتصادی
۴۵	۳-۳-۲- انتخاب کارگاه استخراج
۴۶	۴-۳-۲- طراحی کارگاه استخراج
۴۷	۵-۳-۲- آزمایش پیلوت و تجاری سازی
۴۸	۴-۲- معرفی فرآیندهای پس از استحصال گاز سنتزی
۵۰	۵-۲- اتصال چاه های تزریق و تولید
۵۱	۱-۵-۲- شیوه ی اتصال چاه ها با استفاده از روش های احتراقی
۵۲	۱-۱-۵-۲- روش احتراق پسرو
۵۴	۲-۱-۵-۲- روش احتراق پیشرو
۵۵	۳-۱-۵-۲- مقایسه ی روش احتراق پیشرو و پسرو
۵۵	۲-۵-۲- شیوه ی اتصال چاه ها با استفاده از روش حفاری جهت دار
۵۷	۱-۲-۵-۲- حفاری جهت دار با یک ترانشه
۵۸	۲-۲-۵-۲- حفاری جهت دار با چند ترانشه
۵۸	۶-۲- روش های مختلف گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ
۵۹	۱-۶-۲- روش اتاقی
۵۹	۲-۶-۲- روش گمانه ای
۶۰	۳-۶-۲- روش گالری شیب دار
۶۱	۴-۶-۲- روش چاه قائم
۶۲	۵-۶-۲- روش تونلی
۶۴	۶-۶-۲- روش منبع احتراق قابل کنترل به کمک لوله ی مغزی سیار
۶۶	۱-۶-۶-۲- روش CRIP خطی
۶۸	۲-۶-۶-۲- روش CRIP موازی
۷۰	۷-۲- جمع بندی

فصل سوم: سینتیک واکنش‌های شیمیایی در فرآیند UCG

۷۲	۱-۳- مقدمه
۷۳	۲-۳- فرآیند گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ
۷۳	۳-۳- واکنش‌های شیمیایی اساسی در روش UCG
۷۴	۱-۳-۳- ناحیه‌ی خشک کن و تفکافت زغال سنگ
۷۵	۲-۳-۳- ناحیه‌ی گاز کردن زغال سنگ
۷۶	۱-۲-۳-۳- ناحیه‌ی اکسیداسیون
۷۶	۲-۲-۳-۳- ناحیه‌ی کاهش
۷۸	۴-۳- انتخاب اکسیدان
۷۹	۵-۳- عملکرد راکتور UCG در تعادل شیمیایی اتوترمال
۷۹	۶-۳- عوامل مؤثر بر سینتیک واکنش‌های شیمیایی
۸۰	۱-۶-۳- عوامل غیرقابل کنترل
۸۰	۱-۱-۶-۳- نوع زغال سنگ
۸۰	۲-۱-۶-۳- خاکستر
۸۱	۳-۱-۶-۳- لیچه
۸۱	۴-۱-۶-۳- ضخامت لایه‌ی زغال سنگ
۸۱	۵-۱-۶-۳- عمق لایه‌ی زغال سنگ
۸۱	۲-۶-۳- عوامل قابل کنترل
۸۲	۱-۲-۶-۳- نوع اکسیدان
۸۲	۲-۲-۶-۳- آب
۸۳	۳-۲-۶-۳- درجه حرارت راکتور
۸۳	۴-۲-۶-۳- فشار راکتور
۸۵	۷-۳- ترکیب گاز سنتزی
۸۷	۸-۳- ارزش حرارتی گاز سنتزی
۸۸	۹-۳- جمع‌بندی

فصل چهارم: امکان‌سنجی استفاده از UCG در معادن زغال سنگ طبس

۹۰	۱-۴- مقدمه
۹۱	۲-۴- حوزه‌ی زغال دار طبس
۹۱	۳-۴- ناحیه‌ی زغال دار مزینو

۹۲	 ۴-۴- زمین‌شناسی ناحیه‌ی مزی‌نو
۹۴	 ۴-۵- تکنیک و ساختمان زمین‌شناسی ناحیه‌ی مزی‌نو
۹۵	 ۴-۶- وضعیت هیدروژئولوژی ناحیه‌ی مزی‌نو
۹۵	 ۴-۷- زغال‌خیزی ناحیه‌ی مزی‌نو
۹۸	 ۴-۸- مشخصات هندسی و کیفی زغال‌سنگ ناحیه‌ی مزی‌نو
۹۹	 ۴-۹- تعیین لایه‌ی امیدبخش
۱۰۰	 ۴-۱۰- روش استخراج پیشنهادی
۱۰۰	 ۴-۱۱- جمع‌بندی

فصل پنجم: بررسی عوامل مؤثر بر نشت گاز از کارگاه‌های استخراج UCG

۱۰۳	 ۵-۱- مقدمه
۱۰۴	 ۵-۲- مخاطرات زیست‌محیطی روش استخراج UCG
۱۰۴	 ۵-۲-۱- نشست سطح زمین
۱۰۴	 ۵-۲-۲- خودسوزی کنترل‌نشده لایه‌ی زغال‌سنگ
۱۰۵	 ۵-۲-۳- آلودگی آب‌های زیرزمینی
۱۰۵	 ۵-۲-۴- آلودگی آب‌های سطحی
۱۰۶	 ۵-۲-۵- آلودگی هوا
۱۰۶	 ۵-۳- عوامل مؤثر بر نشت گاز از راکتور استخراج UCG
۱۰۶	 ۵-۳-۱- تخلخل و نفوذپذیری سنگ
۱۰۷	 ۵-۳-۱-۱- تخلخل سنگ‌های رسوبی
۱۰۹	 ۵-۳-۱-۲- نفوذپذیری زغال‌سنگ
۱۱۰	 ۵-۳-۱-۳- عوامل مؤثر بر نفوذپذیری
۱۱۲	 ۵-۳-۱-۴- آزمون‌های آزمایشگاهی نفوذپذیری در سنگ
۱۱۲	 ۵-۳-۲- گسترش راکتور UCG و تخریب سقف راکتور
۱۱۳	 ۵-۳-۲-۱- گسترش راکتور UCG
۱۱۴	 ۵-۳-۲-۲- هندسه‌ی راکتور UCG
۱۱۵	 ۵-۳-۲-۳- تخریب سقف راکتور
۱۱۸	 ۵-۳-۳- اثر کارگاه‌های مجاور
۱۱۸	 ۵-۳-۴- ضخامت لایه
۱۱۹	 ۵-۳-۵- عمق راکتور

۱۱۹	۵-۳-۶- آب زیرزمینی
۱۲۰	۵-۳-۷- فشار راکتور UCG
۱۲۰	۵-۳-۸- درجه حرارت راکتور UCG
۱۲۱	۵-۴- جمع بندی

فصل ششم: مدل سازی و تحلیل نشت گاز از راکتور UCG

۱۲۳	۶-۱- مقدمه
۱۲۴	۶-۲- روش های حل مسایل مکانیک سیالات
۱۲۵	۶-۳- معرفی نرم افزارهای Gambit و Fluent
۱۲۶	۶-۴- اطلاعات ورودی مدل سازی
۱۲۶	۶-۴-۱- شبکه بندی مدل
۱۲۷	۶-۴-۲- ویژگی گاز درون راکتور
۱۲۹	۶-۴-۲-۱- وزن مولکولی و چگالی گاز
۱۲۹	۶-۴-۲-۲- لزجت پویای گاز
۱۳۱	۶-۴-۲-۳- ظرفیت گرمایی ویژه گاز
۱۳۲	۶-۴-۲-۴- ضریب هدایت حرارتی گاز
۱۳۳	۶-۴-۳- ویژگی سنگ پیرامون راکتور
۱۳۴	۶-۴-۴- شرایط مرزی
۱۳۵	۶-۴-۵- شرایط اولیه
۱۳۵	۶-۵- مدل سازی و محاسبه ی نشت گاز
۱۳۶	۶-۵-۱- مدل سازی محیط متخلخل
۱۳۶	۶-۵-۲- حل مدل نشت گاز
۱۳۸	۶-۵-۳- محاسبه ی دبی نشت گاز
۱۴۰	۶-۶- تحلیل پارامترهای ورودی مدل عددی
۱۴۱	۶-۶-۱- تحلیل پارامتری مدل
۱۴۱	۶-۶-۱-۱- تحلیل پارامتری درجه حرارت گاز درون راکتور
۱۴۲	۶-۶-۱-۲- تحلیل پارامتری فشار گاز درون راکتور
۱۴۶	۶-۶-۲- تحلیل حساسیت مدل
۱۴۶	۶-۶-۲-۱- تحلیل حساسیت نسبت به عمق راکتور
۱۴۹	۶-۶-۲-۲- تحلیل حساسیت به نفوذپذیری لایه های سنگی پیرامون راکتور

۱۵۰	 ۶-۸- جمع بندی
-----	---------------------

فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۱۵۲	 ۷-۱- نتیجه گیری
-----	-----------------------

۱۵۵	 ۷-۲- پیشنهادات
-----	----------------------

منابع

۱۵۸	 منابع فارسی
-----	-------------------

۱۶۰	 منابع لاتین
-----	-------------------

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۵	شکل ۱-۱: شمایی از فرآیند گاز کردن زیرزمینی زغال‌سنگ.....
۶	شکل ۲-۱: برخی از کارگاه‌های استخراج آزمایشی و فعال و نیز نواحی امیدبخش UCG در جهان..
۱۱	شکل ۳-۱: ذخایر (قابل بازیابی به صورت اقتصادی) و منابع سوخت‌های فسیلی در جهان.....
۱۲	شکل ۴-۱: مقایسه‌ی بازیابی انرژی در زغال‌سنگ.....
۲۹	شکل ۱-۲: روند نمای انتخاب کارگاه استخراج UCG.....
۳۴	شکل ۲-۲: تغییرات تدریجی خواص فیزیکی و شیمیایی زغال‌سنگ در مراحل مختلف تشکیل.....
۳۶	شکل ۳-۲: اثر ضخامت لایه و تراوش آب بر ارزش حرارتی گازهای تولید شده.....
۳۷	شکل ۴-۲: ضخامت و عمق لایه‌ها برای کارگاه‌های آزمایشی متفاوت.....
۴۰	شکل ۵-۲: رابطه‌ی مقدار خاکستر زغال‌سنگ و ارزش حرارتی گازهای تولید شده.....
۵۰	شکل ۶-۲: شمای کلی از فرآیند UCG تا فرآیند GTL.....
۵۲	شکل ۷-۲: اتصال به کمک روش احتراق پسر و پیشرو.....
۵۳	شکل ۸-۲: مراحل اتصال چاه‌ها با روش احتراق پسر در روش UCG.....
۵۷	شکل ۹-۲: خط مسیر چاه افقی درون لایه‌ی زغال‌سنگ.....
۵۷	شکل ۱۰-۲: حفاری جهت‌دار با یک ترانشه در لایه‌ی زغال‌سنگ.....
۵۸	شکل ۱۱-۲: حفاری جهت‌دار با چند ترانشه.....
۵۹	شکل ۱۲-۲: روش استخراج اتاقی.....
۶۰	شکل ۱۳-۲: روش گمانه‌ای.....
۶۱	شکل ۱۴-۲: روش گالری شیب‌دار.....
۶۲	شکل ۱۵-۲: روش چاه قائم یا روسی.....
۶۳	شکل ۱۶-۲: روش استخراج تونلی.....
۶۵	شکل ۱۷-۲: سیستم تزریق به کمک لوله‌ی مغزی سیار در روش CRIP.....
۶۶	شکل ۱۸-۲: روش CRIP خطی و موازی.....
۶۷	شکل ۱۹-۲: روش استخراج CRIP.....
۶۷	شکل ۲۰-۲: ترانشه‌های چندگانه راکتور CRIP خطی برای گاز کردن در مقیاس تجاری.....
۶۹	شکل ۲۱-۲: کارخانه‌ی نیمه‌تجاری UCG از نوع CRIP موازی در بلادوود کریک استرالیا.....
۷۴	شکل ۱-۳: واکنش‌های شیمیایی اساسی در راکتور UCG و تغییرات دما در طول راکتور.....
۷۵	شکل ۲-۳: روند تبدیل زغال‌سنگ به گازهای فرار در فرآیند UCG.....

۸۳	شکل ۳-۳: اثر نسبت مخلوط بخار آب و اکسیژن بر تغییر ترکیب گاز تولید شده.....
۸۴	شکل ۴-۳: نقش درجه حرارت در تولید گاز سنتزی در روش استخراج UCG.....
۸۵	شکل ۵-۳: اثر فشار گاز بر ترکیب گاز در درجه حرارت ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ کلوین.....
۸۷	شکل ۶-۳: ترکیب گاز سنتزی در کارگاه‌های مختلف UCG در جهان.....
۹۲	شکل ۱-۴: موقعیت ناحیه‌ی مزی‌نو از حوزه‌ی زغال‌دار طبس.....
۹۶	شکل ۲-۴: یکی از ستون‌های چینه‌شناسی ناحیه‌ی مزی‌نو.....
۱۰۸	شکل ۱-۵: رابطه‌ی بین تخلخل و عمق.....
۱۱۳	شکل ۲-۵: شیوه‌ی گسترش راکتور UCG.....
۱۱۴	شکل ۳-۵: مقطع راکتور UCG واقعی و مدل‌سازی شده در روش CRIP.....
۱۱۶	شکل ۴-۵: مراحل گسترش راکتور UCG.....
۱۱۷	شکل ۵-۵: پلانی از مدل راکتور UCG.....
۱۲۸	شکل ۱-۶: شبکه مش‌بندی شده مدل.....
۱۳۷	شکل ۲-۶: نمونه‌ای از مقدار باقی‌مانده سرعت.....
۱۳۸	شکل ۳-۶: نتایج دبی نشت گاز از راکتور.....
۱۳۹	شکل ۴-۶: نمودار توزیع فشار استاتیک در اطراف راکتور.....
۱۴۰	شکل ۵-۶: نمودار توزیع سرعت گاز در اطراف راکتور.....
۱۴۲	شکل ۶-۶: نتایج تحلیل پارامتری درجه‌ی حرارت گاز بر دبی نشت گاز از راکتور.....
۱۴۳	شکل ۷-۶: نتایج تحلیل پارامتری فشار گاز بر دبی نشت گاز از راکتور در عمق ۱۵۰ متر.....
۱۴۴	شکل ۸-۶: نمودار توزیع سرعت گاز در اطراف راکتور در فشار راکتور ۲ مگاپاسکال.....
۱۴۴	شکل ۹-۶: نمودار توزیع سرعت گاز در اطراف راکتور در فشار راکتور ۳ مگاپاسکال.....
۱۴۵	شکل ۱۰-۶: نمودار توزیع سرعت گاز در اطراف راکتور در فشار راکتور ۴ مگاپاسکال.....
۱۴۵	شکل ۱۱-۶: نمودار توزیع سرعت گاز در اطراف راکتور در فشار راکتور ۵ مگاپاسکال.....
۱۴۷	شکل ۱۲-۶: نتایج تحلیل حساسیت عمق راکتور بر دبی نشت گاز در فشار ۱ مگاپاسکال.....
۱۴۷	شکل ۱۳-۶: نتایج تحلیل حساسیت عمق راکتور بر دبی نشت گاز در فشار ۲ مگاپاسکال.....
۱۴۷	شکل ۱۴-۶: نتایج تحلیل حساسیت عمق راکتور بر دبی نشت گاز در فشار ۳ مگاپاسکال.....
۱۴۸	شکل ۱۵-۶: نتایج تحلیل حساسیت عمق راکتور بر دبی نشت گاز در فشار ۴ مگاپاسکال.....
۱۴۸	شکل ۱۶-۶: نتایج تحلیل حساسیت عمق راکتور بر دبی نشت گاز در فشار ۵ مگاپاسکال.....
۱۴۹	شکل ۱۷-۶: نتایج تحلیل حساسیت نفوذپذیری راکتور بر دبی نشت گاز.....

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱: خلاصه‌ای از پروژه‌های UCG انجام شده در جهان.....	۷
جدول ۱-۲: خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در زمینه‌ی نشت گاز در استخراج زیرزمینی زغال‌سنگ.....	۲۱
جدول ۱-۲: معیارهای ایده‌آل برای انتخاب کارگاه استخراج UCG در ایالات متحده.....	۳۱
جدول ۲-۲: محدودیت‌های انتخاب کارگاه‌های استخراج UCG در ایالات متحده.....	۳۱
جدول ۳-۲: محدودیت‌های پیشنهادی پژوهشگاه ملی زغال‌سنگ بریتانیا برای انتخاب کارگاه‌های استخراج UCG.....	۳۲
جدول ۴-۲: محدودیت‌های پیشنهادی دانشگاه پردوا برای انتخاب کارگاه استخراج UCG.....	۳۲
جدول ۵-۲: محدودیت‌های پیشنهادی دانشگاه کاردیف برای انتخاب کارگاه استخراج UCG.....	۳۲
جدول ۶-۲: محدودیت‌های پیشنهادی CSIRO برای انتخاب کارگاه‌های استخراج UCG.....	۳۳
جدول ۷-۲: نوع زغال‌سنگ و نام کارگاه‌های استخراج.....	۳۵
جدول ۸-۲: ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ در برخی از کارگاه‌های استخراج UCG.....	۳۶
جدول ۸-۲: عمق برخی از کارگاه‌های استخراج UCG.....	۳۸
جدول ۹-۲: شیب برخی از کارگاه‌های استخراج UCG.....	۳۹
جدول ۱۰-۲: خاکستر زغال‌سنگ در برخی از کارگاه‌های استخراج UCG.....	۴۰
جدول ۱-۳: ترکیب گازهای سنتزی مختلف بر اساس اکسیدان تزریق شده.....	۸۲
جدول ۲-۳: نتایج مدل‌سازی CFD ترکیب گاز سنتزی.....	۸۶
جدول ۳-۳: ترکیب گاز سنتزی چندین کارگاه استخراج UCG در جهان.....	۸۶
جدول ۱-۴: ذخایر و نوع زغال‌سنگ در حوزه‌ی زغال‌دار طبس.....	۹۱
جدول ۲-۴: فاصله‌ی بین لایه‌های مختلف و جنس رسوبات در بخش‌های مختلف ناحیه‌ی مزی‌نو.....	۹۷
جدول ۳-۴: مشخصات هندسی و کیفی لایه‌های ناحیه‌ی مزی‌نو.....	۹۸
جدول ۴-۴: مشخصات هندسی و کیفی لایه‌ی M26.....	۱۰۰
جدول ۱-۵: تخلخل برخی از سنگ‌های رسوبی.....	۱۰۹
جدول ۲-۵: ضریب نفوذپذیری برخی از سنگ‌های رسوبی برجا.....	۱۱۰
جدول ۳-۵: روابط تجربی محاسبه نفوذپذیری توده‌سنگ.....	۱۱۲
جدول ۴-۵: حداقل ارتفاع مورد نیاز برای تخریب سقف راکتور در روش استخراج UCG.....	۱۱۸
جدول ۱-۶: برآورد ترکیب، وزن مولکولی و چگالی گاز درون راکتور.....	۱۳۰

جدول ۶-۲:	لزجت گازها در دماهای مورد نظر.....	۱۳۱
جدول ۶-۳:	لزجت مخلوط گاز تولید شده در دما و فشارهای مورد نظر.....	۱۳۱
جدول ۶-۴:	ظرفیت گرمایی ویژه گازها در دماهای مورد نظر.....	۱۳۱
جدول ۶-۵:	ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط گاز تولید شده در دما و فشارهای مورد نظر.....	۱۳۲
جدول ۶-۶:	ضریب هدایت حرارتی گاز.....	۱۳۲
جدول ۶-۷:	ضریب هدایت حرارتی گاز مخلوط گاز تولید شده در دما و فشارهای مورد نظر.....	۱۳۳
جدول ۶-۸:	ضریب‌های مقاومت لزجت و مقاوت لختی و تخلخل سنگ.....	۱۳۴
جدول ۶-۹:	نتایج تحلیل پارامتری درجه حرارت گاز بر دبی نشت گاز از راکتور.....	۱۴۱
جدول ۶-۱۰:	نتایج تحلیل پارامتری فشار گاز بر دبی نشت گاز از راکتور.....	۱۴۳
جدول ۶-۱۱:	نفوذپذیری استفاده شده در تحلیل حساسیت به نفوذپذیری.....	۱۴۹

فصل تحت:

معرفی روش استخراج گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ

۱-۱- مقدمه

افزایش روزافزون جمعیت و تقاضای جهان صنعتی برای تأمین انرژی و خوراک صنایع پتروشیمی به یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های بشر در سده‌ی حاضر تبدیل شده است. به همین دلیل، بیشتر کشورهای جهان به نقش و اهمیت منابع مختلف انرژی در تأمین نیازهای حاضر و آینده‌ی بشر پی برده و پژوهش‌های گسترده‌ای را در این زمینه برای برنامه‌ریزی بلند مدت و چگونگی سرمایه‌گذاری انجام می‌دهند.

مهم‌ترین منابع انرژی را سوخت‌های فسیلی مانند نفت، گاز و زغال‌سنگ، انرژی هسته‌ای و نیز انرژی‌های تجدیدپذیر مانند باد، خورشید و زمین‌گرمایی تشکیل می‌دهند.

تهی شدن ذخایر نفت و گاز، وضعیت غیرقابل پیش‌بینی بازار نفت، روند رو به رشد صنایع پتروشیمی در جهان و قابلیت تبدیل فرآورده‌های نفتی به مواد با ارزش افزوده‌ی بیشتر، باعث شده است که در کشورهای پیشرفته‌ی جهان، استفاده از نفت و گاز به عنوان سوخت در سبد انرژی به تدریج کاهش یافته و توجه آن‌ها به سوخت‌های جایگزین نفت و گاز جلب شود.

انرژی‌های تجدیدپذیر با مسایلی مانند محدود شدن به مکان‌های خاص و هزینه‌های زیاد راه‌اندازی

مواجه هستند. انرژی هسته‌ای هم به نظر نمی‌رسد، در زمان طولانی جوابگوی مسأله‌ی تولید برق در جهان باشد. اگر چه تعدادی از کشورهای جهان از این انرژی استفاده می‌کنند؛ ولی با چالش‌هایی مانند دفع زباله‌های هسته‌ای، آلودگی زیست‌محیطی و احتمال گسترش سلاح‌های اتمی مواجه هستند.

اکثر شرکت‌های تولید کننده مواد هیدروکربنی پیش‌بینی کرده‌اند که تولید جهانی نفت تا سال ۲۰۵۰ م. و گاز طبیعی تا سال ۲۰۷۰ م. به مقدار قابل توجهی کاهش خواهد یافت. همچنین، طول عمر ذخایر زغال‌سنگ در مقایسه با ذخایر نفت و گاز جهان به بیش از ۲۰۰ سال برآورد شده و عمر طولانی‌تری نسبت به نفت و گاز دارند (Hester and Harrison, 2010).

به دلیل وجود ذخایر بسیار غنی زغال‌سنگ و نیز پراکندگی آن‌ها در سراسر جهان و امکان ساخت نیروگاه‌ها در نزدیکی این منابع، توجه اغلب کشورها به استفاده از این منابع به ویژه در تولید برق و استفاده در صنایع شیمیایی بیشتر شده است.

در سده‌ی گذشته، در سراسر جهان روش‌های نوین استخراج زغال‌سنگ همیشه مورد بررسی بوده است. اکثر پژوهشگران در پی روش‌های ارزان‌تر و پاک‌تر برای انتقال انرژی زغال‌سنگ از حالت جامد به حالت مایع یا گاز و انتقال آن به سطح زمین و جایگزین کردن با نفت و گاز طبیعی بوده‌اند. یکی از روش‌های استخراج پاک‌تر و در عین حال ارزان‌تر زغال‌سنگ در مقایسه با روش‌های سنتی، روش گاز کردن زیرزمینی زغال‌سنگ^۱ (UCG) است.

در این فصل به بررسی روش استخراج UCG و کاربرد آن، پیشینه‌ی این روش، منابع و ذخایر زغال‌سنگ جهان، توجیه اقتصادی این روش و ضرورت جایگزینی زغال‌سنگ به جای نفت و گاز، مزایا و معایب روش UCG، ضرورت بهره‌برداری از ذخایر زغال‌سنگ در ایران با روش مذکور، آلودگی‌های زیست‌محیطی و ضرورت بررسی نشت گاز^۲ از کارگاه‌های استخراج UCG پرداخته می‌شود.

^۱ - UCG: Underground Coal Gasification

^۲ - Gas Seepage

۱-۲- فرآیند گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG)

گاز کردن^۱ به فرآیندهای ترکیب شیمیایی سوخت‌های جامد و مایع (مانند زغال سنگ، کک، گاز طبیعی یا هیدروکربن‌های سنگین) با هوا، اکسیژن و یا بخار آب در درجه حرارت و فشار زیاد و تبدیل آن‌ها به محصولات گازی قابل احتراق مانند گاز سنتزی^۲ گفته می‌شود (Burton *et al.*, 2007). گاز سنتزی به عنوان یک پیش ماده، عمدتاً از گازهای هیدروژن، مونواکسید کربن، متان و بخار آب تشکیل شده است (Shedden Uhde Australia, 2009). این محصولات گازی در توربین گاز (سیکل ساده یا سیکل ترکیبی) و نیروگاه بخار آب (تنها و یا به عنوان سوخت مکمل) برای تولید برق؛ خوراک صنایع شیمیایی برای تولید مواد شیمیایی مانند متانول و مشتقات آن، اتانول، آمونیاک، کود شیمیایی، سوخت‌های مایع، سوخت جت؛ سوخت هیدروژنی و جایگزین گاز طبیعی سنتزی^۳ (SNG) استفاده می‌شوند (Burton *et al.*, 2007; Shafirovich *et al.*, 2008).

گاز کردن زغال سنگ به دو دسته گاز کردن سطحی زغال سنگ^۴ (SCG) و UCG تقسیم‌بندی می‌شود. در SCG، زغال سنگ استخراج شده با استفاده از روش‌های سنتی در راکتورهای سطحی^۵ تبدیل به گاز می‌شوند. تبدیل زغال سنگ درجا یا زیرزمینی به محصولات گازی (معمولاً گاز سنتزی)، همانند فرآیند راکتورهای سطحی، بدون استفاده از روش‌های استخراج سنتی روباز یا زیرزمینی، را گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG) می‌نامند (GasTech, 2007). اجرای روش استخراج UCG مستلزم انتخاب کارگاه استخراج، فن‌آوری حفاری چاه‌های تزریق^۶ و تولید^۷، اتصال^۸ چاه‌ها، گاز کردن زغال سنگ و عملیات سطحی است (Sathaiah *et al.*, 2010). شکل ۱-۱، شمایی از فرآیند UCG را نشان می‌دهد.

^۱ - Gasification

^۲ - Syngas

^۳ - Synthetic Natural Gas

^۴ - Surface Coal Gasification

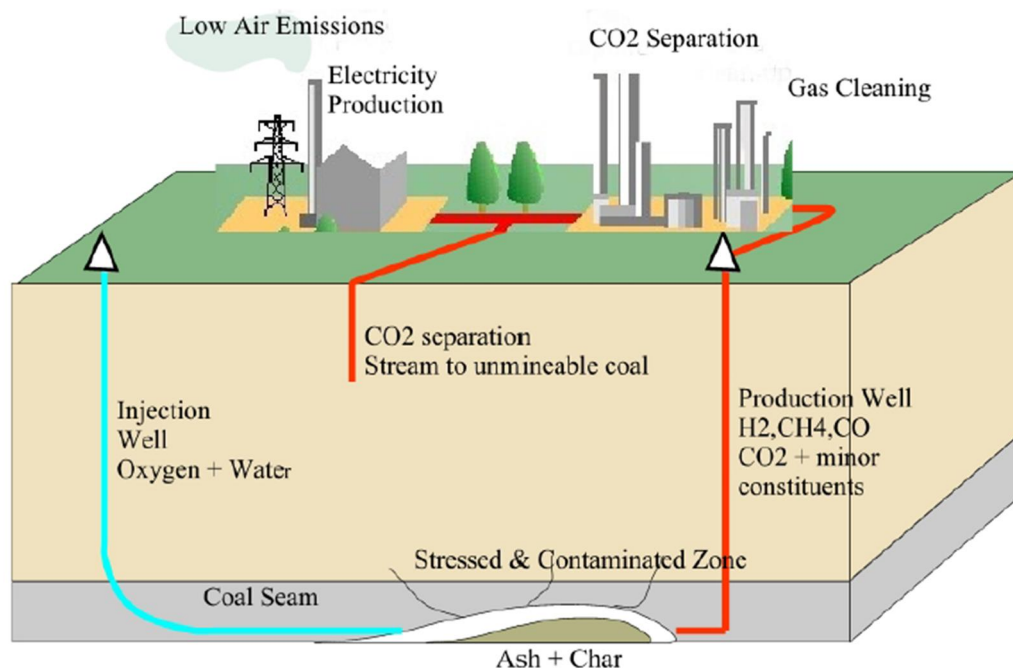
^۵ - Reactors

^۶ - Site Selection

^۷ - Injection Well

^۸ - Production Well

^۹ - Well Linking



شکل ۱-۱: شمایی از فرآیند گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (Burton et al., 2007).

تا سال ۲۰۰۹ م. در بیش از ۱۶۰ کارخانه در جهان با استفاده از روش گاز کردن زغال سنگ، بیش از ۵۰ هزار مگاوات حرارت یا گاز سنتزی تولید شده است (Couch, 2009). محصول اولیه استخراج شده از زیرزمین در روش UCG، گازهای قابل احتراق با ارزش حرارتی^۱ کم تا متوسط (تا ۱۶ مگاژول بر مترمکعب) است (Chai, 2004).

۱-۳- پیشینه‌ی روش استخراج UCG

گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ، نخستین بار توسط سر ویلیام زیمنس^۲، دانشمند آلمانی، در سال ۱۸۶۸ م. پیشنهاد شده است. تقریباً در همان زمان دیمیتری مندلیف^۳، شیمی‌دان روسی، ایده‌ی حفاری چاه‌های تزریق و تولید، تزریق هوا و گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ به صورت خود به خودی را پیشنهاد

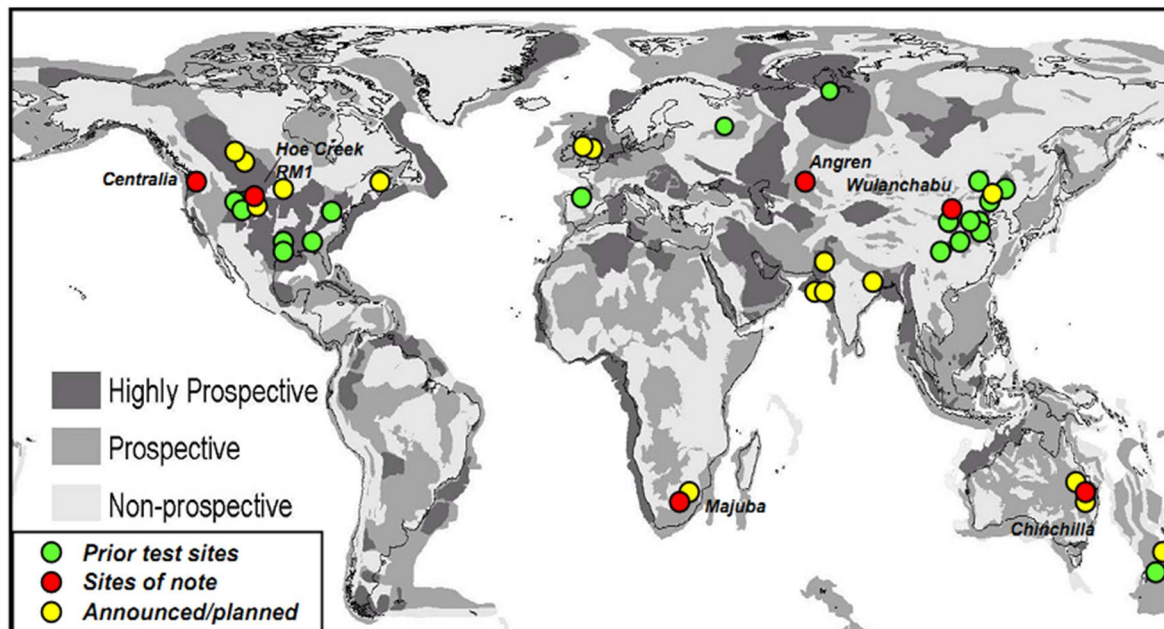
^۱ - Heating Value

^۲ - William Siemens

^۳ - Dmitry Mendeleyev

داد. نخستین طرح آزمایش UCG در دورهام^۱ انگلستان به سرپرستی سر ویلیام رامسی^۲ در سال ۱۹۱۲ م. آغاز شد که با مرگ رامسی و آغاز جنگ جهانی اول ناتمام ماند (GasTech, 2007; Burton et al., 2007).

گسترش این روش از دهه‌ی ۱۹۳۰ م. در اتحاد جماهیر شوروی سابق، از سال ۱۹۴۰ م. در ایالات متحده‌ی آمریکا، از سال ۱۹۸۰ م. در چین و از سال ۱۹۹۰ م. در استرالیا آغاز شده است. بر اساس گزارش‌های موجود تا سال ۲۰۰۶ م.، بیش از ۵۰ طرح UCG به صورت آزمایشی یا تجاری در سراسر جهان وجود داشته که بیش از ۳۰ مورد آن در ایالات متحده قرار داشته است (Burton et al., 2007). برخی از کارگاه‌های آزمایشی یا تجاری UCG و موقعیت جغرافیایی مناطق امیدبخش در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲: برخی از کارگاه‌های استخراج آزمایشی و فعال و نیز نواحی امیدبخش UCG در جهان (Friedmann et al., 2009).

^۱ - Durham

^۲ - William Ramsey

تفاوت معنادار آزمایش‌های UCG انجام شده در اروپای غربی با اتحاد جماهیر شوروی سابق و ایالات متحده در این است که آزمایش‌ها در اروپای غربی در اعماق زیاد (۶۰۰ تا ۱۲۰۰ متر) و در اتحاد جماهیر شوروی سابق و ایالات متحده در اعماق کمتر از ۳۰۰ متر انجام شده (Burton *et al.*, 2007).

روش استخراج UCG به صورت آزمایشی و یا تجاری در کشورهای دیگری مانند کانادا، انگلستان، ایرلند، فرانسه، آلمان، هلند، بلژیک، اسپانیا، اوکراین، لهستان، اسلواکی، اسلونی، ایتالیا، بلغارستان، مجارستان، ترکیه، رومانی، جمهوری چک، ازبکستان، قزاقستان، مغولستان، هندوستان، پاکستان، آفریقای جنوبی، بوتسوانا، ویتنام، نیوزیلند، ژاپن، بنگلادش، اندونزی، برزیل، کلمبیا و شیلی انجام شده و یا در حال انجام است (UCG Association, 2012). خلاصه‌ای از پروژه‌های UCG انجام شده در جهان در جدول ۱-۱ آورده شده است.

جدول ۱-۱: خلاصه‌ای از پروژه‌های UCG انجام شده در جهان

ردیف	کشور	نام شرکت یا پروژه	تاریخ عملیات	توضیحات	مرجع
۱	روسیه	-	دهه‌ی ۱۹۳۰	تحقیق و توسعه؛	Burton <i>et al.</i> , 2007
		Shatskaya	۱۹۶۵ تا ۱۹۷۴	گاز کردن آنتراسیت با ضخامت ۲/۶ تا ۴ متر و در عمق ۳۰ تا ۶۰ متر	
		Podmoskovnaya	۱۹۴۰ تا ۱۹۶۲	گاز کردن لیگنیت با ضخامت ۲ تا ۴ متر و در عمق ۴۰ تا ۶۰ متر	
		Sinelnikovsky	-	گاز کردن لیگنیت با ضخامت ۳/۶ تا ۶ متر و در عمق ۸۰ متر	
		Yuzhno-Abinskaya	۱۹۵۵ تا ۱۹۸۹ و ۱۹۹۹ تاکنون	گاز کردن بیتومینه با ضخامت ۲ تا ۹ متر و در عمق ۵۰ تا ۳۰۰ متر	
۲	اوکراین	Lisichanskaya	۱۹۳۴ تا ۱۹۶۳	گاز کردن بیتومینه با ضخامت ۰/۴ تا ۱/۵ متر و در عمق ۴۰۰ متر	
		Gorlovka	۱۹۳۵ تا ۱۹۳۹	گاز کردن لایه با ضخامت ۱/۹ متر و در عمق ۴۰ متر	
۳	ازبکستان	Angren	۱۹۵۷ تاکنون	گاز کردن لیگنیت با ضخامت ۲ تا ۲۴ متر، در عمق ۱۱۰ تا ۲۵۰ متر، تولید برق از یک نیروگاه ۱۰۰ مگاواتی؛	

ادامه‌ی جدول ۱-۱: خلاصه‌ای از پروژه‌های UCG انجام شده در جهان.

ردیف	کشور	نام شرکت و پروژه	تاریخ عملیات	توضیحات	مرجع
۴	ایالات متحده	Alabama	دهه‌ی ۱۹۴۰ تا ۱۹۵۰	نخستین آزمایش در ایالات متحده؛	GasTech, 2007
		Hoe Creek	۱۹۷۶ تا ۱۹۷۹	زیر نظر LLNL/USDOE؛ در لایه‌ی نیمه‌بیتومینه، ضخامت ۸ متر و عمق ۴۰ متر؛	Burton <i>et al.</i> , 2007, Perkins, 2005; Beath and Davis, 2006
		Princetown	۱۹۷۷ تا ۱۹۸۰	زیر نظر Morgantown؛ در لایه‌ی بیتومینه، ضخامت ۲ متر و عمق ۲۷۰ متر؛	
		Rawlins	۱۹۷۶ تا ۱۹۸۴	زیر نظر Gulf Oil/DOE؛ در لایه‌ی نیمه‌بیتومینه، ضخامت ۱۸ متر و عمق ۱۰۵ متر	
		Hanna	۱۹۷۱ تا ۱۹۷۹	زیر نظر Lnd/Cons/DOE و Laramie ETC؛ در لایه‌ی نیمه‌بیتومینه، ضخامت ۹ متر و عمق ۸۵ تا ۱۲۰ متر؛	
		Centralia	۱۹۸۱ تا ۱۹۸۴	زیر نظر LLNL؛ در لایه‌ی نیمه‌بیتومینه، ضخامت ۶ و عمق ۷۵ متر	
		Rocky Mountain	۱۹۸۶ تا ۱۹۹۳	زیر نظر IC/DOE؛ در لایه‌ی نیمه‌بیتومینه، ضخامت ۷ متر و عمق ۷۵ تا ۱۱۰ متر؛	
		Rockdale TX	۱۹۷۸ تا ۱۹۸۰	گاز کردن لیگنیت؛ زیر نظر Texas A&M	Beath and Davis, 2006
		Tennessee Colony	۱۹۷۶ تا ۱۹۸۰	گاز کردن لیگنیت؛ زیر نظر Texas Utilities	
		Rocky Hill WY	۱۹۷۷ تا ۱۹۸۲	گاز کردن نیمه‌بیتومینه، زیر نظر ARCO	
		Indiana	۲۰۰۷ تاکنون	مطالعات امکان‌سنجی و ساخت نیروگاه ۲۵۰ مگاوات؛	Ag Mohamed <i>et al.</i> , 2011
		Powder River	۲۰۰۶ تاکنون	زیر نظر شرکت GasTech؛	GasTech, 2007
۵	چین	Laurus Energy, Alaska	۲۰۰۹ تاکنون	برنامه‌ریزی برای تجاری‌سازی تا سال ۲۰۱۵ م؛	Stone Horn Ridge, 2010
		-	دهه‌ی ۱۹۸۰	آزمایش‌هایی برای بهره‌برداری از چاه‌ها و تونل‌های معادن زغال سنگ متروکه اجرا شد.	Burton <i>et al.</i> , 2007
		-	۱۹۹۱ تاکنون	چین تاکنون ۱۶ پروژه UCG انجام داده است.	Burton <i>et al.</i> , 2007
		ENN, Wulanchabu	۲۰۰۷ تاکنون	احداث کارخانه تجاری برای تولید برق و متانول؛	Couch, 2009

ادامه‌ی جدول ۱-۱: خلاصه‌ای از پروژه‌های UCG انجام شده در جهان.

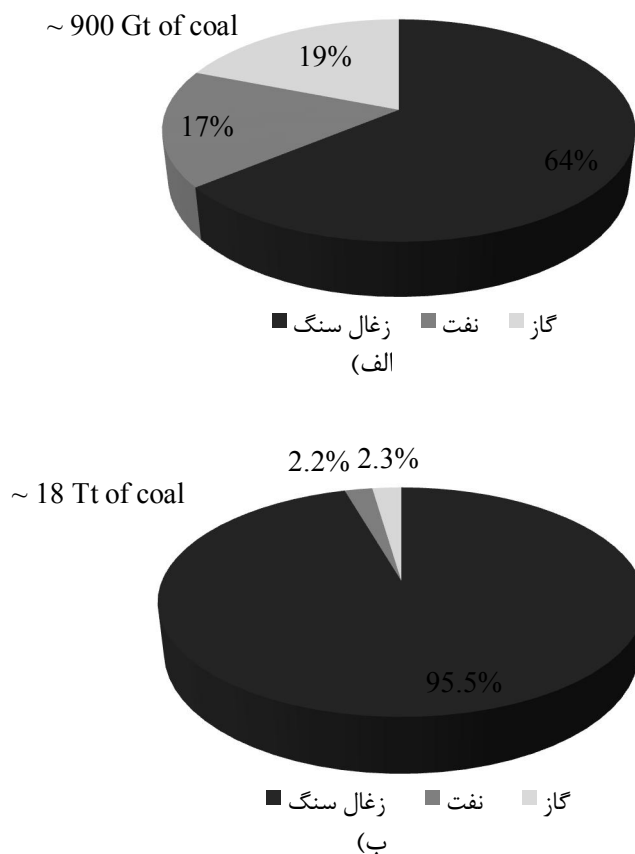
ردیف	کشور	نام شرکت و پروژه	تاریخ عملیات	توضیحات	مرجع
۶	استرالیا	Linc Energy, Chinchilla	۱۹۹۹ تاکنون	انتخاب کارگاه استخراج و بهره‌برداری از کارخانه‌هایی در مقیاس تجاری‌سازی برای تولید سوخت‌های مایع؛	LincEnergy Report, 2012A
		Carbon Energy, Bloodwood Creek	۲۰۰۸ تاکنون	بهره‌برداری از کارخانه نیمه‌صنعتی و امکان‌سنجی تولید گاز سنتزی برای مصرف در نیروگاه و کاربرد در صنایع شیمیایی؛	Carbon Energy Report, 2011B
		Cougar Energy, Kingaroy and Victoria	۲۰۰۹ تاکنون	مطالعات امکان‌سنجی و طراحی ساخت نیروگاه ۴۰۰ مگاواتی و بهره‌برداری از سال ۳۰۱۳ تا ۲۰۴۳ م؛	Shafirovich and Varma, 2009
		Linc Energy, Orroroo	۲۰۰۹ تاکنون	حفاری و مطالعات اولیه برای تولید گاز برای خوراک کارخانه تولید سوخت مایع و نیروگاه در استرالیای جنوبی؛	LincEnergy Report, 2009
۷	بریتانیا	Durham	۱۹۱۲	نخستین طرح آزمایشی UCG در جهان توسط سر ویلیام رامسی؛	GasTech, 2007
		Newman Spinney	۱۹۴۹ تا ۱۹۵۹	گاز کردن نیمه‌بیتومینه با ضخامت ۱ متر و در عمق ۷۵ متر؛	GasTech, 2007
		The UK Department of Trade and Industry	۱۹۹۹ تاکنون	دوره‌ی جدید امکان‌سنجی در چند ناحیه از بریتانیا؛ انتخاب کارگاه استخراج و بررسی فنی و اقتصادی؛	Beath and Davis, 2006
۸	لهستان	Mars	۱۹۵۳ م.	کاربرد روش UCG در معدن Mars؛	Couch, 2009
		EU HUGE project	۲۰۰۷ تاکنون	مطالعه‌ی امکان‌سنجی؛	
۹	اسلواکی	Czechoslovakia	۱۹۵۶	آزمایش روش UCG؛	Couch, 2009
		-	۲۰۰۷ تاکنون	مطالعات در زمینه‌ی روش UCG؛	
۱۰	بلژیک	Thulin	۱۹۸۲ تا ۱۹۸۷	این پروژه در آنتراسیت در عمق ۸۶۰ متر انجام شده است.	GasTech, 2007; Burton et al., 2007
۱۱	اسپانیا	El Tremedal	۱۹۹۲ تا ۱۹۹۹	امکان‌سنجی کاربرد UCG در اعماق بیش از ۵۵۰ متر؛	Burton et al., 2007
۱۲	فرانسه	Bruay en Artois	۱۹۸۰ تا ۱۹۸۱	امکان‌سنجی کاربرد UCG در اعماق بیش از ۱۰۰۰ متر؛	Shafirovich and Varma, 2009
۱۳	ژاپن	-	دهه‌ی ۱۹۹۰	مطالعات اولیه و امکان‌سنجی؛	Couch, 2009
۱۴	هندوستان	دولتی	دهه‌ی ۱۹۸۰ و ۲۰۰۰ تاکنون	مطالعات امکان‌سنجی در چند منطقه، انتخاب کارگاه	Couch, 2009

ادامه‌ی جدول ۱-۱: خلاصه‌ای از پروژه‌های UCG انجام شده در جهان.

ردیف	کشور	نام شرکت و پروژه	تاریخ عملیات	توضیحات	مرجع
۱۵	نیوزیلند	US Technical Assistance	۱۹۹۴ تاکنون	گاز کردن کامل با موفقیت انجام نشد.	Burton <i>et al.</i> , 2007
		Solid Energy, Huntly	۲۰۰۹ تاکنون	انتخاب کارگاه؛ امکان‌سنجی برای احداث نیروگاه ۳۶۰ مگاواتی؛	Solid Energy, 2011
۱۶	آفریقای جنوبی	Eskom, Majuba	۲۰۰۱ تاکنون	انتخاب کارگاه استخراج؛ موفقیت در اجرای نیروگاه نیمه‌صنعتی؛ طراحی و ساخت نیروگاه‌هایی با توان ۴۲۰۰ مگاوات؛	GasTech, 2007
		Sasol, Secunda	۲۰۰۹ تاکنون	امکان‌سنجی و انجام پایلوت؛	Couch, 2009
۱۷	ویتنام	Linc Energy, Tonkin	۲۰۰۹ تاکنون	پروژه احداث نیروگاه‌هایی برای تأمین برق ۶ میلیون خانوار؛	Linc Energy Report, 2012A
۱۸	قزاقستان	Tobol Chernigovsky	۲۰۰۹ تاکنون	مطالعات امکان‌سنجی	Couch, 2009
۱۹	کانادا	Swan Hills Synfuels, Swan Hills Project	۲۰۰۸ تاکنون	احداث نیروگاه سیکل ترکیبی ۳۰۰ مگاواتی در آلبرتا تا سال ۲۰۱۵ م. با هزینه‌ی ۱/۵ میلیارد دلار کانادا؛ گاز کردن در عمق ۱۴۰۰؛	Swan Hills Synfuels, 2011; Roberts and Schaffer, 2009
۲۰	مغولستان	Hebel	۲۰۰۶ تاکنون	-	Couch, 2009
۲۱	برزیل	-	۲۰۰۷ تاکنون	مدل‌سازی فرآیند و اعتبارسنجی آن در مقیاس آزمایشگاهی و در مقیاس پایلوت	Couch, 2009
۲۲	پاکستان	Thar IGCC	۲۰۱۰ تاکنون	بهره‌برداری از نیروگاه سیکل ترکیبی ۱۰۰ مگاوات بر مبنای روش UCG تا سال ۲۰۱۳ م؛	Daly, 2012
۲۳	ایرلند	VP Power Ltd	-	مطالعه‌ی امکان‌سنجی کاربرد روش UCG در حوزه‌ی Kish	Couch, 2009
۲۴	مجارستان	WildHorse Energy; Izabella, Amelie, Mecsek Hills, Suki and Ciko	۲۰۱۰ تاکنون	انتخاب کارگاه استخراج؛ برنامه‌ریزی برای کاربرد UCG در ۵ کارگاه استخراج برای تولید برق؛	Westblade, 2011
۲۵	ترکیه	Carbon Energy with Hema, Amasra	۲۰۱۱ تاکنون	آغاز امکان‌سنجی و طرح پایلوت؛	Carbon Energy Report, 2011A
۲۶	شیلی	Carbon Energy, Mulpun	۲۰۰۹ تاکنون	آغاز مطالعات امکان‌سنجی؛	Carbon Energy Report, 2011B
۲۷	کلمبیا	-	-	انتخاب چندین کارگاه استخراج و طراحی پروژه UCG؛	UCG Association, 2012

۱-۴- منابع و ذخایر زغال سنگ در جهان

نخست به دلیل اهمیت زغال سنگ به عنوان یکی از مهم‌ترین حامل‌های انرژی، نیاز است که منابع و ذخایر آن در مقایسه با دیگر سوخت‌های فسیلی بررسی شود. منابع زغال سنگ جهان بیش از ۱۰ هزار میلیارد تن برآورد می‌شود. امروزه، برخی از منابع زغال سنگ به دلایل عمق زیاد، ضخامت کم، خاکستر زیاد و کیفیت کم آن قابل بهره‌برداری نیستند (Sathaiah *et al.*, 2010). ارتباط بین ذخایر (قابل بازیابی به صورت اقتصادی) و منابع کلی سوخت‌های فسیلی جهان در شکل ۱-۳ دیده می‌شود.

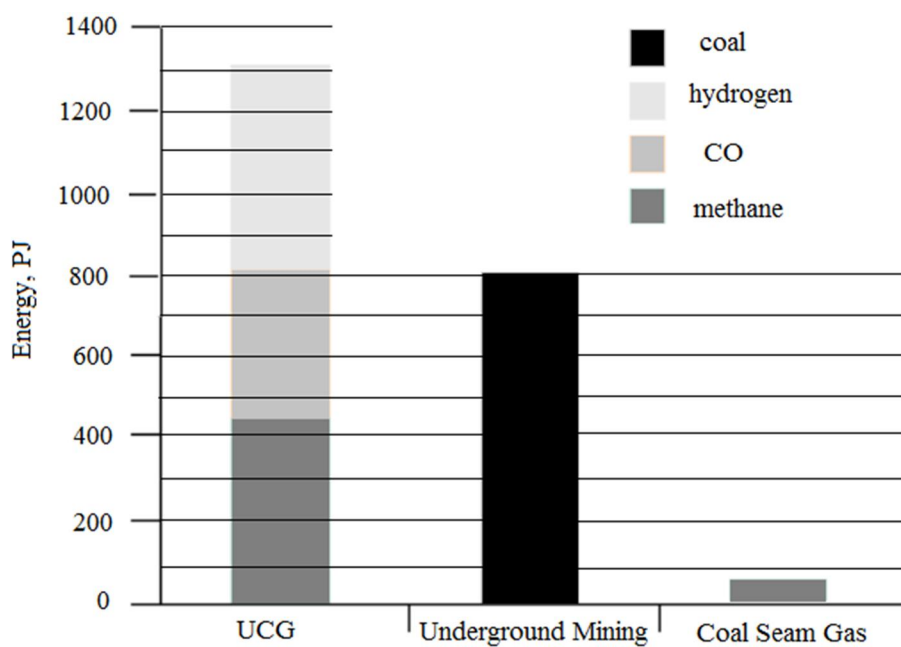


شکل ۱-۳: الف) ذخایر (قابل بازیابی به صورت اقتصادی) و ب) منابع سوخت‌های فسیلی در جهان (Couch, 2009).

برتری نسبی زغال سنگ نسبت به دیگر سوخت‌های فسیلی به وضوح دیده می‌شود. منابع

زغال سنگ جهان بسیار گسترده بوده و به طور قطعی بسیار بیشتر از دیگر سوخت‌های فسیلی مانند نفت و گاز است. با این حال، تنها کسری از این منابع انرژی را می‌توان با استفاده از معدن کاری معمولی (روباز و زیرزمینی سنتی) استخراج نمود (Couch, 2009).

شکل ۱-۴، پتانسیل بازیابی انرژی در نوعی زغال سنگ در کوئینزلند^۱ استرالیا با استفاده از روش‌های استخراج مکانیزه زیرزمینی زغال سنگ، استحصال متان از لایه‌ی زغال سنگ^۲ (CSG) و گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG) را نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود، پتانسیل بازیابی انرژی در روش UCG نسبت به دو روش دیگر بیشتر است. البته مقدار انرژی قابل بازیابی در عمل بستگی به عوامل گوناگونی دارد (Couch, 2009).



شکل ۱-۴: مقایسه‌ی بازیابی انرژی در زغال سنگ (Couch, 2009).

منابع زغال سنگ جهان توسط UCG Partnership در سال ۲۰۰۹ م. تقریباً ۸ هزار میلیارد تن برآورد شده است (Hester and Harrison, 2010) که بیش از ۴ هزار میلیارد تن از این منابع برای

^۱ - CSG: Coal Seam Gas

^۲ - Queensland

استخراج با کاربرد روش UCG مطلوب است (Mueller *et al.*, 2009).

ذخایر معادن زغال سنگ چین، به عنوان یکی از بزرگترین مصرف کنندگان زغال سنگ در جهان، شامل معادن در حال استخراج به روش اتاق و پایه و جبهه کار طولانی، معادن متروکه و ذخایر بهره برداری نشده، حدوداً ۳۰ میلیارد تن برآورد می شود. ذخایر زغال سنگ چین با کاربرد روش UCG همراه با فن آوری حفاری جهت دار^۱ در اعماق، تقریباً به ۳۰۰ میلیارد تن افزایش می یابد (Chai, 2004). همچنین در ایالات متحده هم افزایش ۳۰۰ تا ۴۰۰ درصدی در ذخایر زغال سنگ با کاربرد روش UCG برآورد شده است (Burton *et al.*, 2007).

با بهره گیری از این فن آوری، ذخایر قابل استخراج زغال سنگ در جهان و تولید انرژی و خوراک برای استفاده در صنایع شیمیایی افزایش می یابد. بررسی اقتصادی روش UCG در ادامه بحث می شود.

۱-۵- بررسی اقتصادی روش استخراج UCG

مهم ترین منابع انرژی را سوخت های فسیلی، انرژی هسته ای و انرژی های تجدیدپذیر مانند باد، خورشید و زمین گرمایی تشکیل می دهند. انرژی های تجدیدپذیر با مسایلی مانند محدود شدن به مکان های خاص و هزینه های زیاد راه اندازی مواجه هستند و نیز غیرمعمول هستند. انرژی هسته ای هم به نظر نمی رسد در زمان طولانی جوابگوی مسأله ی تولید برق در جهان باشد. اگر چه برخی از کشورهای جهان از این انرژی استفاده می کنند؛ ولی با چالش هایی مانند دفع زباله های هسته ای و گسترش احتمالی سلاح های اتمی مواجه هستند (Burton *et al.*, 2007).

کوتاهی عمر جهانی ذخایر نفت و گاز نسبت به ذخایر زغال سنگ ایجاب می کند که زغال سنگ همواره به عنوان حامل انرژی و در صورت ممکن در شبکه ی توزیع انرژی در کنار سایر حامل های انرژی

^۱ - Directional Drilling

مانند برق، آب و گاز حضور داشته باشد. بنابراین در آینده پیش‌بینی می‌شود که مصرف گاز و زغال سنگ نسبت به سایر سوخت‌ها در تولید برق افزایش یافته و سهم مصرف نفت در کل سبد انرژی کاهش یابد (طاهری، ۱۳۷۸).

در کشورهایی مانند چین، هندوستان، روسیه، آفریقای جنوبی و ایالات متحده که دارای منابع عظیم زغال سنگ هستند، زغال سنگ منبع اصلی تولید برق است. زغال سنگ پا به پای رشد تولید برق در جهان رشد کرده و تقریباً درصد ثابتی (۳۹ درصد) از تولید برق جهان را به خود اختصاص داده است. علت این امر، ذخایر بسیار غنی و پراکنده زغال سنگ در سراسر جهان است (طاهری، ۱۳۷۸).

تلاش برای بهره‌برداری از ذخایر طبیعی مانند زغال سنگ و لیگنیت^۱ در هر کشوری برای تولید انرژی پاک و سالم وجود دارد. برای بهره‌برداری از درصد زیادی از ذخایر زغال سنگ جهان به صورت اقتصادی در سال‌های اخیر، روش استخراج UCG توجه و علاقه‌مندی زیادی را به خود جلب کرده است (Sathaiah *et al.*, 2010).

برخی از معادن زغال سنگ از دیدگاه مسایل فنی و اقتصادی به دلیل ارزش حرارتی کم زغال سنگ، عمق زیاد، ضخامت کم لایه، شیب زیاد، خاکستر زیاد، رطوبت زیاد و شرایط نامطلوب روباره برای استخراج به روش‌های متداول، مناسب نیستند. روش استخراج UCG می‌تواند راه کار مناسبی برای استخراج این نوع لایه‌های زغال سنگ باشد (Yeary, 1987).

به طور کلی عواملی برای بررسی فنی و اقتصادی روش UCG مطرح است که برخی از آن‌ها شامل هزینه‌های اکتشاف، جانمایی محل کارگاه استخراج، حفاری، احداث تجهیزات تزریق و تولید، پالایش گاز، فروش گاز و هزینه‌های عملیاتی هستند.

روش استخراج UCG با کاهش تولید نفت و گاز در جهان و افزایش قیمت آن‌ها، مطلوب به نظر

^۱ - Lignite

می‌رسد. هزینه‌ی تولید برق از یک نیروگاه ۳۰۰ مگاواتی با کاربرد روش UCG در مقایسه با نیروگاه سیکل ترکیبی گاز کردن^۱، که سیستمی مرکب از یک واحد تبدیل زغال سنگ به گاز و یک سیکل ترکیبی تولید برق می‌باشد؛ کمتر برآورد شده است (Gujarat Industries Power Co, 2009).

با ملاحظه داده‌های سال ۲۰۰۸ م. در ایالات متحده‌ی آمریکا، گاز سنتزی خام با تزریق هوا با روش UCG در این کشور با قیمت ۱/۸ دلار بر یک میلیون واحد حرارت بریتانیایی^۲ (۱/۰۵۵ کیلوژول) تولید شده است که در مقایسه با قیمت گاز طبیعی یعنی، ۹ دلار بر یک میلیون BTU، قابل توجه است. هزینه‌ی تولید گاز سنتزی با استفاده از تزریق اکسیژن به عنوان اکسیدان^۳ (ماده شیمیایی عامل اکسید شدن و گاز شدن زغال سنگ) در اروپا با استفاده از این روش، ۳/۸ دلار بر یک میلیون BTU برآورد شده است. این رقم از دیدگاه اقتصادی زمانی که قیمت نفت و گاز به مقدار قابل توجهی زیاد است، حائز اهمیت است (Hester and Harrison, 2010).

از طرف دیگر، هر چند منابع انرژی‌های هسته‌ای و تجدیدپذیر برای تولید هیدروژن پیشنهاد شده‌اند؛ ولی بهترین منبع برای تولید هیدروژن، سوخت‌های فسیلی به ویژه زغال سنگ است. همچنین روش UCG، روشی مناسب برای تولید هیدروژن با هزینه‌ی کمتر است (Burton et al., 2007).

سیستم‌ها بر پایه روش UCG نسبت به روش SCG نیاز به راکتور گاز کردن نداشته و نیز نیاز به تجهیزات کمتری برای پالایش گاز دارند. مقدار زیادی از خاکستر و قیر^۴ که در روش SCG تولید می‌شود؛ در روش UCG در زیر زمین مدفون شده و وارد گاز تولید شده نمی‌شود. در نتیجه، هزینه‌ی پالایش گاز کاهش می‌یابد (Burton et al., 2007).

در حالت کلی، درباره‌ی توجیه اقتصادی روش استخراج UCG باید توازنی بین عوامل مثبت (مزایای روش) و عوامل منفی (محدودیت‌های روش) وجود داشته باشد (Hester and Harrison, 2010).

^۱ - IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle

^۲ - BTU: British Thermal Unit

^۳ - Oxidant

^۴ - Tar

۱-۶- مزایای روش استخراج UCG

روش استخراج UCG نسبت به روش‌های استخراج سنتی زغال سنگ دارای برتری‌هایی به صورت زیر است:

- این روش برای لایه‌های زغال سنگ با شرایط نامطلوب (ضخامت کم، شیب زیاد، کیفیت کم، قبلاً کار شده، شرایط نامساعد) که معمولاً از نظر اقتصادی غیرقابل استخراج تشخیص داده شده است، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (Burton et al., 2007).
- UCG تنها فن‌آوری امکان‌پذیر برای استخراج زغال سنگ در اعماق بیش از ۷۰۰ متر است که با استفاده از معدن‌کاری سنتی غیرقابل استخراج است. البته این روش حتی در اعماق کم هم اقتصادی است (Couch, 2009).
- فن‌آوری UCG برای استخراج منابع زغال سنگ معادن متروکه و منابع زغال سنگ دریایی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (Hester and Harrison, 2010).
- اتلاف انرژی به دلیل حمل و نقل زغال سنگ و باطله وجود ندارد (Burton et al., 2007).
- هزینه‌ی بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری عملیات UCG به طور بالقوه خیلی کمتر از روش‌های استخراج سنتی است (Burton et al., 2007).
- موضوع نشست^۱ سطح زمین نسبت به روش‌های استخراج زیرزمینی تا حد زیادی کاهش می‌یابد (Burton et al., 2007).
- این روش دارای شرایط ایمنی و بهداشتی بسیار خوب (عدم حضور معدن کار در زیرزمین) و بازده زیاد است و سازگاری مناسب با محیط زیست دارد (Nourozieh et al., 2010A).
- آلودگی صوتی نسبت به روش‌های سنتی کمتر است (Couch, 2009).

^۱ - Subsidence

- کاربرد گسترده‌ای در صنایع شیمیایی و تولید برق دارد (Hester and Harrison, 2010).
- نوسانات زیاد قیمت نفت بر روی آن‌ها تأثیر چندانی ندارد (Hester and Harrison, 2010).
- برای تولید برق ارزان‌تر از گاز طبیعی است (Hester and Harrison, 2010).
- به عنوان مزایای روش UCG در مقایسه با روش SCG می‌توان موارد زیر را برشمرد:
- قیمت تمام شده تولید گاز در روش UCG، ۲۵ تا ۵۰ درصد روش SCG است (Couch, 2009).
- هزینه‌ی خرید راکتور گاز کردن سطحی حذف می‌شود (Burton et al., 2007).
- مقدار زیادی از خاکستر زغال سنگ در زیرزمین مدفون شده، در نتیجه فرآیند انباشت خاکستر حذف شده و فرآیندهای پالایش گاز آسان‌تر خواهد شود (Burton et al., 2007).
- کارخانه تولید برق بر پایه UCG، همانند نیروگاه سیکل ترکیبی گاز کردن منهای راکتور سطحی است. ولی همانند SCG نیاز به تجهیزات پالایش گاز، خنک کننده، توربین گاز، مبدل‌های حرارت برای تولید بخار، توربین بخار و ژنراتورهای الکتریکی دارد (Burton et al., 2007).
- در روش UCG در مقایسه با روش SCG، گازهای گلخانه‌ای و دیگر آلاینده‌های کمتری مانند SO_x ، NO_x ، جیوه، سولفورها و ذرات معلق تولید شده و برای جداسازی و ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن^۱ مناسب‌تر است (Burton et al., 2007).

۷-۱- محدودیت‌های روش استخراج UCG

هر چند روش UCG دارای مزایای زیادی است؛ ولی روند تجاری‌سازی، گسترش، تنظیم و کنترل عملیات این روش با چالش‌ها و محدودیت‌های زیادی مواجه است. برخی از محدودیت‌های این روش عبارتند از:

^۱ - CCS: Carbon Capture and Storage

- روش UCG برای بسیاری از منابع زغال سنگ مناسب است، ولی در برخی مناطق به دلیل شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی نامناسب، محدودیت‌های زیست‌محیطی مانند آلودگی آب‌های زیرزمینی، نشست گاز و نشست سطح زمین، کاربرد این روش با محدودیت‌هایی همراه خواهد بود (Burton et al., 2007).
- راکتورهای زیرزمینی به اندازه راکتورهای سطحی قابل کنترل نیستند. عوامل زیادی مانند میزان تراوش آب، توزیع اکسیدان‌ها در راکتور و میزان گسترش راکتور بر روی فرآیندها اثر می‌گذارند. این اثرات تنها از روی اندازه‌گیری درجه حرارت، کیفیت و کمیت محصولات گازی قابل ارزیابی هستند (Burton et al., 2007).
- روش UCG اساساً یک روش ناپایدار بوده و میزان جریان گاز و ارزش حرارتی آن هنگام گاز کردن متفاوت است (Burton et al., 2007).
- هزینه‌ی آزمایش پایلوت و انتقال به بازار مصرف زیاد است (Hester and Harrison, 2010).

۸-۱- ضرورت انجام تحقیق

زغال سنگ‌های ایران به دو دسته زغال سنگ‌های حرارتی و متالورژی دسته‌بندی می‌شوند. منابع شناخته شده‌ی احتمالی زغال سنگ در ایران ۱۱ تا ۱۴ میلیارد تن برآورد می‌شود. ۵۰ تا ۶۷ درصد از کل ذخایر زغال سنگ شناخته شده در ایران از نوع حرارتی هستند. ولی هنوز از این ذخایر انرژی برای تولید برق استفاده نمی‌شود؛ در صورتی که سهم زغال سنگ در تولید برق در جهان به ۳۹ درصد می‌رسد. در دهه‌های پیشین توجه کشور بیشتر در مصرف زغال سنگ کک‌شو برای تولید فولاد و مصرف در ذوب آهن و صنایع فرو آلیاژ بوده است. میزان ذخایر زغال سنگ در ایران بسیار بیشتر از مقدار مورد نیاز در صنایع فولاد است؛ لذا استفاده از انرژی حرارتی این مواد و تولید برق به عنوان یک پتانسیل مهم در برنامه‌های

دولت مطرح است (اسماعیل‌نیا و حمزه‌خانی، ۱۳۸۹).

با توجه به این که ایران دارای ذخایر عظیم گاز نیز هست؛ کاربرد زغال سنگ به عنوان سوخت ممکن است در نظر اول از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر نباشد. ولی با توجه به سهولت صادرات نفت و گاز نسبت به زغال سنگ با در نظر گرفتن ارزش افزوده‌ی حاصل از صادرات نفت و گاز و ضرورت بهره‌برداری از این منابع، بررسی راه کارهای موجود برای استفاده‌ی بهینه و ایمن از منابع زغال سنگ ضروری است. به دلیل وجود ذخایر عظیم زغال سنگ حرارتی در کشور، به ویژه در معادن زغال سنگ طبس (حدود ۶۰ درصد کل ذخایر حرارتی کشور) ضرورت استفاده‌ی بهینه و بهره‌برداری از این منبع برای تولید برق به عنوان یک جایگزین مناسب در سبد انرژی کشور و همچنین تولید محصولات شیمیایی و سوخت‌های مایع از زغال سنگ احساس می‌شود.

یکی از روش‌های ارزان‌تر، ایمن‌تر و در عین حال پاک‌تر استخراج زغال سنگ نسبت به روش‌های معمول (رو باز و زیرزمینی سنتی) و روش SCG روش استخراج UCG است. انجام پژوهش‌های گسترده و سرمایه‌گذاری‌های عظیم در زمینه‌ی UCG در نقاط مختلف جهان نشان از اهمیت زیاد این روش استخراج دارد. تاکنون هیچ گونه پژوهشی در این زمینه در کشور انجام نشده است. بنابراین بررسی این روش استخراج در کشور به صورت تئوری و عملی نیاز است.

با انجام پژوهش‌ها در زمینه‌ی روش استخراج UCG و سرمایه‌گذاری دولت، آینده‌ی روشنی از بهره‌برداری از ذخایر عظیم زغال سنگ در کشور، به ویژه معادن زغال سنگ طبس می‌توان متصور شد.

۱-۹- هدف از تحقیق

در سده‌های پیشین که کاربرد زغال سنگ به عنوان سوخت رواج بیشتری داشت؛ مسایل زیست‌محیطی آن نیز در همین محدوده بود. ولی امروزه به دلیل کاربردهای متعدد و گسترده‌ی زغال سنگ،

مخاطرات زیست‌محیطی آن نیز متنوع است. به طور کلی زغال‌سنگ از استخراج تا فرآوری و کاربرد، محیط زیست را به صورت‌های گوناگون تحت تأثیر قرار می‌دهد. در روش استخراج UCG، در مراحل مانند احداث تأسیسات و کارخانه‌ها و گاز کردن زغال‌سنگ همگی ممکن است باعث اختلال در تعادل محیط زیست شوند. اگر فرآیندهای UCG به خوبی مدیریت نشوند، ایجاد مخاطرات زیست‌محیطی مانند آلودگی هوا، آلودگی آب‌های زیرزمینی و سطحی، خودسوزی کنترل‌نشده لایه‌ی زغال‌سنگ و نشست سطح زمین، دور از انتظار نخواهد بود.

همزمان با گسترش راکتور UCG، سقف راکتور تخریب شده و به صورت کلی یا جزئی به درون راکتور ریزش می‌کند. اثر این تخریب ممکن است تا سطح زمین گسترش یافته و باعث نشست سطح زمین شود. نشست سطح زمین باعث تغییر وضعیت سطح زمین، پوشش گیاهی، تغییر جریان آب‌های زیرزمینی، افزایش امکان نشت گاز و انتشار آلاینده‌ها می‌شود.

امروزه یکی از مسایل زیست‌محیطی جهان، آلودگی هوا است. مصرف زغال‌سنگ از دیرباز به عنوان سوخت بیشترین اثر را در آلودگی محیط زیست، به ویژه هوا به دلیل تولید دود داشته است. انتشار گاز در دو روش UCG و SCG وجود دارد که بیشتر در نوع SCG، گازهای خروجی دودکش‌ها و در روش UCG، نشت گاز از راکتور زیرزمینی و همچنین آلودگی‌های کارخانجات سطحی است.

نشست گاز از راکتور UCG باعث از دست رفتن مقدار زیادی از گاز تولید شده، کاهش بازدهی فرآیند، آلودگی هوا و حتی غیر عملیاتی شدن پروژه می‌شود. عوامل مؤثر بر نشت گاز از راکتور UCG را می‌توان به دو دسته عوامل غیرقابل کنترل و قابل کنترل تقسیم‌بندی کرد. عوامل غیرقابل کنترل شامل تخلخل و نفوذپذیری سنگ‌ها، گسترش راکتور UCG و تخریب سقف راکتور، اثر کارگاه‌های مجاور، ضخامت لایه، عمق لایه و آب زیرزمینی هستند. عوامل قابل کنترل شامل فشار و تا مقداری درجه حرارت درون راکتور است. هدف از این پژوهش مدل‌سازی نشت گاز و تحلیل پارامتری و حساسیت آن است.

۱-۱۰-۱- مروری بر کارهای پیشین

خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در زمینه‌ی نشت گاز در کارگاه‌های استخراج زیرزمینی زغال سنگ در جدول ۱-۲ آورده شده است.

جدول ۱-۲: خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در زمینه‌ی نشت گاز در استخراج زیرزمینی زغال سنگ.

ردیف	مؤلف	توضیح مختصر	مرجع
۱	ژوو ^۱	برای نخستین بار قانون داری برای نشت گاز در لایه‌ی زغال سنگ به کار برده شد.	(Wu et al., 1998)
۲	دینگ ^۲ و بای ^۳	نشت مخلوط گاز در فضای تخریب شده با استفاده از روش عددی اجزاء محدود ^۴ مدل سازی شده است.	(Ding and Bai, 1996)
۳	هو ^۵ و همکاران	برای مدل سازی جریان گاز در فضای تخریب شده از روش CFD و نرم افزار Fluent استفاده شده است.	(Hu et al., 2007)
۴	وو ^۶ و همکاران	مدل سازی عددی اجزاء محدود سه بعدی نشت گاز در فضای تخریب شده در استخراج زغال سنگ انجام شد.	(Wu et al., 2007)
۵	هو و همکاران	کاربرد معادله‌ی نشت گاز از لایه‌های زغال سنگ استخراج شده، بررسی شده است.	(Hu et al., 2008)
۶	لو ^۷	جریان گاز در فضای تخریب شده ناهمگن معدن زغال سنگ با استفاده از CFD مدل سازی شده است.	(Lu, 2009)
۷	جین ^۸ و همکاران	نشت گاز در فضای تخریب شده با استفاده از روش CFD مدل سازی شده است.	(Jin et al., 2010)

Hu - ۵

Zhou - ۱

Wu - ۶

Ding - ۲

Lu - ۷

Bai - ۳

Jin - ۸

Finite Element Method - ۴

این مطالعات بیشتر در زمینه‌ی نشت گاز از فضای تخریب شده^۱ هستند. اخیراً از روش دینامیک سیالات محاسباتی^۲ (CFD) برای مدل سازی نشت گاز از معادن زیرزمینی استفاده می‌شود.

^۱ - Gob or Goaf

^۲ - CFD: Computational Fluid Dynamics

یانگ در سال ۲۰۰۳ م. با استفاده از مدل سازی عددی اجزاء محدود گالرکین^۱، نشت گاز در فرآیند اتصال چاه های تزریق و تولید UCG را بررسی کرده و نمودارهایی را بر حسب طول چاه ها و فشار تزریق ارائه داده است (Yang, 2003). همچنین، بلیندرمن^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۸ م. نشت گاز در اتصال چاه های تزریق و تولید UCG را مدل سازی کرده اند (Blinderman et al., 2008). ولی نشت گاز از راکتور UCG مدل سازی نشده است. در مورد پژوهش های صورت گرفته در مورد UCG در ایران به تحلیل پایداری فضا های استخراجی به روش UCG در ناحیه ی زغالی تخت (شرکت زغال سنگ البرز شرقی) توسط موسوی در سال ۱۳۹۰ خ. می توان اشاره نمود (موسوی، ۱۳۹۰).

۱-۱۱- روش انجام تحقیق

در این تحقیق نخست با استفاده از معیارها و محدودیت های انتخاب کارگاه استخراج UCG به بررسی امکان سنجی استفاده از روش استخراج UCG در ناحیه ی زغال دار مزینو پرداخته شده و لایه ی امیدبخش برای گاز کردن انتخاب شده است. برای مدل سازی جریان سیال معمولاً از سه روش دینامیک سیالات آزمایشگاهی، نظری و محاسباتی استفاده می شود. در این پژوهش از روش CFD که یکی از روش های عددی تحلیل جریان سیال در محیط های متخلخل است، برای مدل سازی نشت گاز از راکتور UCG استفاده شده است. سپس به تحلیل حساسیت و تحلیل پارامتری مدل نشت گاز پرداخته شده است. در تحلیل پارامتری اثر درجه حرارت و فشار گاز درون راکتور و در تحلیل حساسیت اثر عمق راکتور و نفوذپذیری لایه پیرامون راکتور بر نشت گاز بررسی شده است.

^۱ - Galerkin Finite Element

^۲ - Blinderman

۱-۱۲- سازماندهی پایان نامه

به طور کلی مطالب این پایان نامه در هفت فصل گردآوری شده است.

فصل نخست- معرفی روش استخراج گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ: در این فصل کلیات روش

استخراج UCG، ضرورت و روش انجام تحقیق بحث شده.

فصل دوم- انتخاب کارگاه استخراج گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ و انواع روش های استخراج آن:

در این فصل معیارها و محدودیت های انتخاب کارگاه استخراج UCG و انواع روش های گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ بررسی شده است.

فصل سوم- سینتیک واکنش های شیمیایی در فرآیند UCG: در این فصل سینتیک واکنش های

شیمیایی درون راکتور UCG، انتخاب اکسیدان، ترکیب و ارزش حرارتی گاز سنتزی و عوامل مؤثر بر سینتیک واکنش های شیمیایی مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل چهارم- امکان سنجی استفاده از UCG در معادن زغال سنگ طبس: در این فصل به معرفی

ناحیه ی مزینو از حوزه ی زغال دار طبس و زمین شناسی و زغال خیزی ناحیه ی مزینو پرداخته شده و لایه ی امیدبخش برای استخراج با روش UCG انتخاب شده است.

فصل پنجم- بررسی عوامل مؤثر بر نشت گاز از کارگاه های استخراج UCG: در این فصل مخاطرات

زیست محیطی روش استخراج UCG و عوامل مؤثر بر نشت گاز از کارگاه های استخراج UCG مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل ششم- مدل سازی و تحلیل نشت گاز از راکتور UCG: در این فصل نشت گاز از راکتور UCG

در ناحیه ی مزینو به روش عددی با کمک نرم افزار Fluent مدل سازی و تحلیل شده است.

فصل هفتم- نتیجه گیری و پیشنهادات

فصل دوم:

انتخاب کارگاه استخراج UCG و

انواع روش های استخراج آن

۲-۱- مقدمه

به دلیل شرایط ویژه‌ی روش استخراج UCG، کاربرد آن به صورت تجاری بسیار منحصر به فرد است. پتانسیل اقتصادی عملیات تجاری UCG به عوامل بسیاری بستگی دارد. از آنجا که فرآیندهای UCG در زیر سطح زمین انجام می‌شود، ویژگی زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی محیط زیرزمینی بیشترین تأثیر را بر روی بازده فرآیند، مسایل زیست‌محیطی و اقتصادی بودن طرح دارند.

در این فصل، نخست به بررسی برداشت‌های صحرایی برای انتخاب کارگاه استخراج UCG پرداخته می‌شود. سپس مراحل انتخاب کارگاه استخراج UCG، شامل تعیین معیارهای انتخاب کارگاه استخراج، انتخاب کارگاه استخراج، ارزیابی کارگاه استخراج و پایش‌های میدانی آن بررسی خواهند شد و در پایان، به معیارها و محدودیت‌هایی پیشنهاد شده برای انتخاب کارگاه استخراج UCG در کشورهای مختلف مانند ایالات متحده، بریتانیا و استرالیا اشاره خواهد شد.

همچنین در این فصل عوامل مؤثر در انتخاب کارگاه‌های استخراج UCG شامل عوامل وابسته به لایه‌ی زغال‌سنگ، لایه‌های در برگیرنده و روباره، آب‌های زیرزمینی، مقدار ذخیره‌ی زغال‌سنگ و محدودیت‌های منطقه‌ای و اقتصادی جداگانه مورد بررسی قرار خواهند گرفت. سپس به انواع روش‌های حفاری، اتصال چاه‌های تزریق و تولید، تزریق اکسیدان‌ها، بهره‌برداری و استخراج با استفاده از روش UCG و تأسیسات سطحی اشاره خواهد شد. در پایان، امکان استفاده از فن‌آوری‌های حفاری و استخراج پیشرفته در لایه‌های زغال‌سنگ با عمق زیاد مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند که با استفاده از روش‌های استخراج سنتی و روش‌های UCG دیگر قابل بهره‌برداری نیستند.

۲-۲- مطالعات اولیه برای مشخص کردن کارگاه‌های استخراج

برداشت‌های صحرایی برای مشخص کردن کارگاه‌های استخراج شامل تصاویر ماهواره‌ای یا هوایی، روش‌های ژئوفیزیکی سطحی، نقشه‌برداری سطحی، حفاری، مغزه‌گیری، گمانه‌های ژئوفیزیکی و آزمایش‌های هیدروژئولوژی است. تصاویر ماهواره‌ای و روش‌های ژئوفیزیکی سطحی، نخست برای ارزیابی در مقیاس بزرگ و سپس در مقیاس کوچک‌تر استفاده می‌شوند (Oliver and Covell, 1989).

روش‌های ژئوفیزیکی متعددی برای تعیین شرایط زمین‌شناسی ساختمانی و ناپیوستگی‌های سطحی وجود دارند. مغناطیس‌سنجی، گران‌سنجی، مقاومت الکتریکی و مشاهدات لرزه‌نگاری برخی از روش‌های ژئوفیزیکی موجود هستند. این روش‌ها زمانی سودمند هستند که همراه با روش‌های دیگر به کار گرفته شوند. شرایطی که باعث اختلال در عملیات می‌شود، شامل پوشش گیاهی ضخیم، توپوگرافی ناهموار، وجود آب در سطح زمین، شکستگی طبقات، پیچیدگی ساختارهای زیرسطحی و برقراری ارتباط بین این عوامل هستند. همچنین از روش‌های ژئوفیزیکی برای تعیین هندسه‌ی راکتورهای تخلیه شده و شیوه‌ی گسترش آن‌ها استفاده می‌شود (Oliver and Covell, 1989).

نقشه‌برداری سطحی برای مکان‌یابی چین‌ها و گسل‌ها به کار می‌رود. امتداد گسل‌ها در زیر زمین با استفاده از روش‌های دیگری مانند حفاری، مغزه‌گیری و گمانه‌های ژئوفیزیکی تعیین می‌شوند (Oliver and Covell, 1989).

با این حال، بهترین روش برای ارزیابی شرایط زمین‌شناسی کارگاه‌ها، ترکیب داده‌های مغزه‌گیری و چاه‌پیمایی ژئوفیزیکی است. مهم‌ترین اطلاعاتی که از مغزه‌های حفاری به دست می‌آید شامل سنگ‌شناسی، تعیین تخلخل و نفوذپذیری سنگ، امتداد ناپیوستگی‌ها و گسل‌ها، تحلیل کیفیت زغال‌سنگ و آزمایش‌های مقاومت سنگی هستند (Oliver and Covell, 1989).

حفاری بدون مغزه‌گیری هم روشی کم هزینه برای کنترل فرآیندهای درون راکتور استخراج و

مقایسه‌ی داده‌ها با مقادیر برآورد شده است. تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از مغزه‌های حفاری هم روشی برای کنترل مخاطرات زیست‌محیطی و فرآیندها است (Oliver and Covell, 1989).

در پایان، برای اطمینان از گسترش مناسب راکتور و جلوگیری از نشت گاز، عوامل هیدروژئولوژی کارگاه استخراج باید تعیین شوند. معیارهای هیدروژئولوژی نواحی آبدار شامل تعیین نفوذپذیری قائم و افقی در لایه‌ی زغال‌سنگ و طبقات در برگیرنده است، که با آزمایش‌های پمپاژ آب تعیین می‌شود (Oliver and Covell, 1989).

۲-۳- مراحل انتخاب کارگاه‌های استخراج UCG

از نتایج به دست آمده از برداشت‌های صحرایی و مطالعات دفتری برای انتخاب کارگاه استخراج استفاده می‌شود. در انتخاب کارگاه استخراج نخست یک ناحیه‌ی گسترده را انتخاب کرده و با انجام مطالعات مورد نیاز آن را به ناحیه‌ی کوچکتر، یعنی کارگاه استخراج، محدود می‌کنند. بازده اقتصادی احتمالی کارگاه استخراج را می‌توان با استفاده از این داده‌ها مشخص نمود. سلسله مراتب انتخاب کارگاه استخراج UCG شامل چهار مرحله است (Oliver and Covell, 1989):

- ۱- تعیین معیارهای انتخاب کارگاه استخراج: نخست باید معیارهای مورد نیاز برای انتخاب و گزینش محل کارگاه استخراج تعیین شوند.
- ۲- انتخاب کارگاه استخراج: رتبه‌بندی مناطق امیدبخش با استفاده از معیارهای انتخاب صورت می‌گیرد. مناطقی که برای طراحی مناسب‌تر هستند، برای رتبه‌بندی مشخص می‌شوند. ممکن است در یک ناحیه بیش از یک کارگاه انتخاب شود.
- ۳- ارزیابی کارگاه استخراج: ناحیه انتخاب شده برای یک کارگاه استخراج باید مورد ارزیابی بیشتر قرار گیرد. برای ارزیابی، از اطلاعات قابل دسترسی و داده‌های اکتشافی استفاده می‌شود.

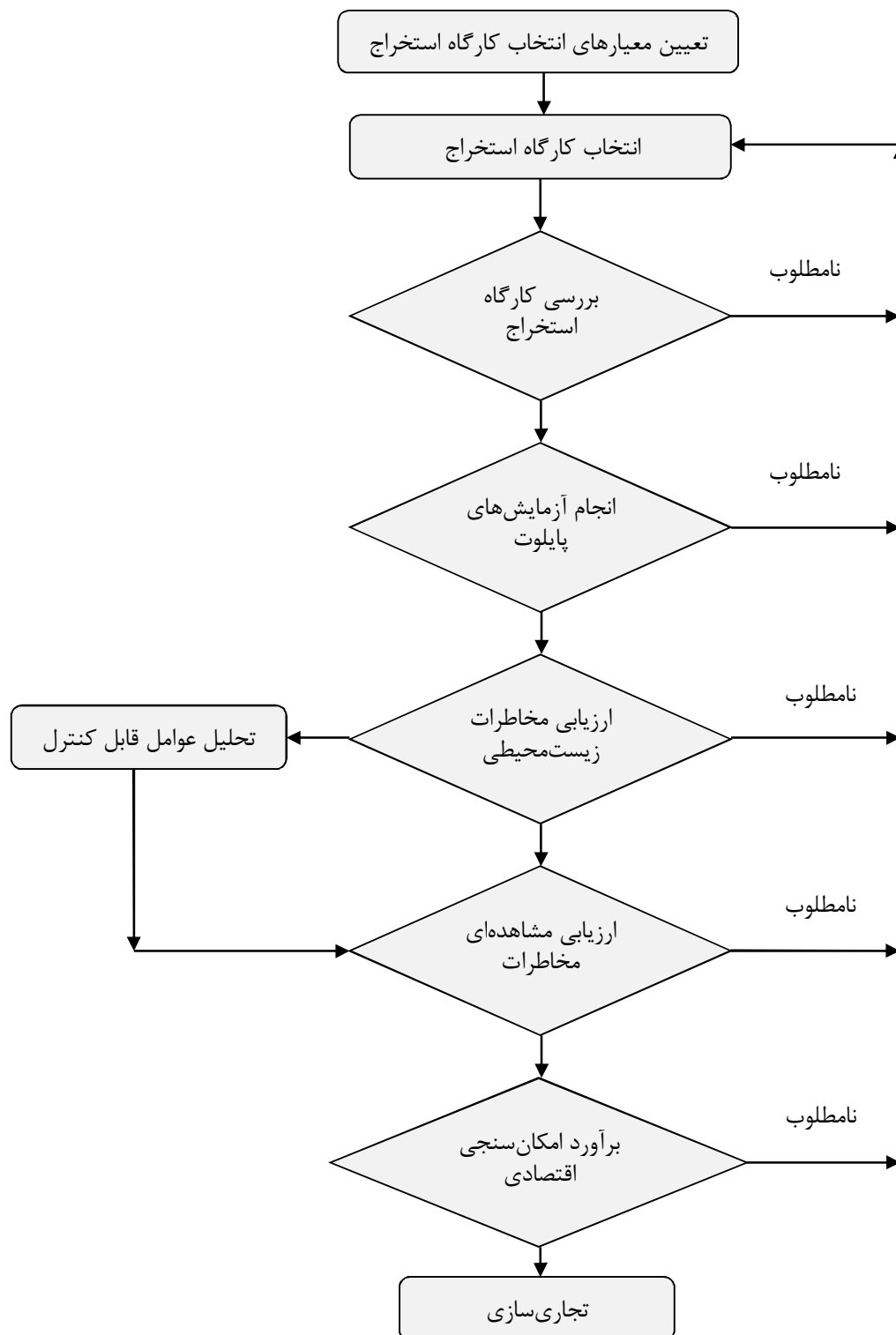
۴- پایش میدانی در مقیاس پایلوت: پس از انتخاب و مشخص کردن کارگاه استخراج، باید آزمایش‌های پایلوت طراحی و اجرا شود.

پس از انجام مراحل ۱ تا ۴، برآورد مخاطرات زیست‌محیطی و ارزیابی سود و هزینه را می‌توان با اطمینان بیشتری انجام داد. این ارزیابی‌ها تا رسیدن به نتایج مطلوب ادامه می‌یابد تا احتمال موفقیت در مقیاس تجاری افزایش یابد. روندنمای انتخاب کارگاه استخراج UCG در شکل ۱-۲ دیده می‌شود (Oliver and Covell, 1989).

۲-۳-۱- تعیین معیارهای انتخاب کارگاه استخراج

تعیین معیارهای انتخاب کارگاه UCG مسأله‌ی بسیار مهمی در روند انتخاب کارگاه استخراج است. معیارهای موجود در روش استخراج UCG متفاوت با استخراج زیرزمینی سنتی زغال‌سنگ است. معیارهای انتخاب کارگاه استخراج بستگی به نوع روش هم دارد. ارتباط فرآیندهای UCG با لایه‌ی زغال‌سنگ و سنگ‌های در برگیرنده، اساساً به دو بخش زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی تقسیم‌بندی می‌شود. معیارهای زمین‌شناسی با شرایط درون لایه‌های سنگی مانند گسل‌ها و شکستگی‌ها در ارتباط هستند. ولی معیارهای هیدروژئولوژی ناشی از ارتباط بین آب‌های زیرزمینی و لایه‌های سنگی مانند نفوذپذیری، نشت آب و ناهمسان‌گردی است. اگر چه ویژگی‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی جداگانه بحث خواهند شد، ولی در ارتباط نزدیک با همدیگر هستند (Oliver and Covell, 1989).

به عنوان نمونه، معیارهای انتخاب مورد استفاده در لایه‌های شیب‌دار با شیب متغیر در روش‌های مختلف استخراج، متفاوت است. با این حال بهتر است به طراحی فرآیند مناسب برای استخراج از لایه خاصی، به جای پیدا کردن کارگاه برای یک فرآیند استخراج مناسب اقدام شود (Oliver and Covell, 1989).



شکل ۲-۱: روندنمای انتخاب کارگاه استخراج UCG (Oliver and Covell, 1989).

مهم‌ترین عوامل اجتماعی-اقتصادی ملموس شامل ساختار مالیاتی، مشوق‌های توسعه‌ی اقتصادی، قابلیت دسترسی به نیروی کار، هزینه‌ی نیروی کار، هزینه‌ی حمل و نقل، تسهیلات، تقاضا برای فروش محصول تولید شده و مجوزهای مورد نیاز برای بهره‌برداری است. همه‌ی این معیارها همراه با معیارهای زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی روی سرمایه‌گذاری تجاری تأثیرگذارند (Oliver and Covell, 1989).

یک لایه‌ی زغال‌سنگ خشک با ضخامت متوسط، شیب مناسب و نفوذپذیری کم روباره در فصل مشترک با زغال‌سنگ و روباره دارای شرایط ایده‌آل است (Oliver and Covell, 1989). در این بخش نخست به بررسی محدودیت‌ها و معیارهای پیشنهاد شده برای انتخاب کارگاه استخراج UCG در برخی از مناطق جهان پرداخته می‌شود و در انتها هر کدام به طور جداگانه بررسی خواهد شد.

محدودیت‌ها و معیارهای ایده‌آل انتخاب کارگاه‌های استخراج UCG پیشنهادی ایالات متحده در جدول‌های ۱-۲ و ۲-۲، پژوهشگاه ملی زغال‌سنگ بریتانیا^۱ در جدول ۳-۲، دانشگاه پردوا^۲ برای لایه‌های زغال‌سنگ حوزه ایندیانا^۳ در جدول ۴-۲، دانشگاه کاردیف^۴ در جدول ۵-۲ و سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی استرالیا^۵ (CSIRO) در جدول ۶-۲ آورده شده است. سپس عوامل مؤثر در انتخاب کارگاه‌های استخراج UCG جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

^۱ - National Coal Board, UK

^۳ - Indiana

^۵ - Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization

^۲ - Purdue University

^۴ - Cardiff University

جدول ۲-۱: معیارهای ایده‌آل برای انتخاب کارگاه استخراج UCG در ایالات متحده
(Oliver and Covell, 1989; Ag Mohamed *et al.*, 2011).

ردیف	معیارها	مقدار	آحاد
۱	ضخامت زغال سنگ	۱/۵ تا ۱۵	متر
۲	شیب لایه‌ی (وابسته به نوع روش) زغال سنگ	۰ تا ۷۰	درجه
۳	حداکثر تغییرات شیب لایه‌ی زغال سنگ بر ۳۰ متر	۲	درجه
۴	حداکثر ضخامت هر رگه لیچه	۱	متر
۵	حداکثر ضخامت رگه‌های لیچه از ضخامت لایه‌ی زغال سنگ	۲۰	درصد
۶	حداکثر جابه‌جایی گسل	۲۵	درصد از ضخامت لایه
۷	حداکثر تعداد گسل‌ها در ۳۰ متر	۱	عدد
۸	حداکثر رطوبت زغال سنگ	۱۵	درصد
۹	حداکثر خاکستر زغال سنگ	۵۰	درصد
۱۰	ضخامت روباره	۱۰۰ تا ۵۰۰	متر
۱۱	حداقل ضخامت روباره تحکیم یافته	۱۵	متر
۱۲	نفوذپذیری لایه‌ی زغال سنگ	۵۰ تا ۱۵۰	میلی‌داریسی
۱۳	حداکثر نفوذپذیری سقف بلاواسطه	۵	میلی‌داریسی
۱۴	حداکثر فاصله تا نزدیک‌ترین ناحیه آبدار در لایه‌ی پوشان	۳۰	متر
۱۵	مقدار گاز مورد نظر برای ۲۰ سال عملیات پیوسته	۱۵	میلیارد مترمکعب
۱۶	مقدار تغییرات ضخامت لایه باید کمتر از ۲۵ درصد ضخامت کلی لایه باشد.		
۱۷	ضخامت کلی رگه‌های لیچه باید کمتر از ۲۰ درصد ضخامت لایه‌ی زغال سنگ باشد.		
۱۸	نوع زغال سنگ بهتر است کمتر از بیتومینه باشد.		

جدول ۲-۲: محدودیت‌های انتخاب کارگاه‌های استخراج UCG در ایالات متحده (Oliver and Covell, 1989).

ردیف	معیارها	مقدار	آحاد
۱	حداقل ضخامت لایه‌ی زغال سنگ	۰/۶	متر
۲	حداقل فاصله از مناطق مسکونی با جمعیت بیش از ۱۰۰ نفر	۱/۶	کیلومتر
۳	حداقل فاصله از گسل‌های بزرگ	۰/۸	کیلومتر
۴	حداقل فاصله از تأسیسات پالایش نفت و گاز	۱/۶	کیلومتر
۵	حداقل فاصله از بزرگراه‌ها و ریل‌ها	۰/۴	کیلومتر
۶	حداقل فاصله از رودخانه‌ها و دریاچه‌ها	۱/۶	کیلومتر
۷	حداقل فاصله از معادن فعال	۳/۲	کیلومتر
۸	سقف و کف لایه باید در برابر نشست گاز مقاوم باشند.		

جدول ۲-۳: محدودیت‌های پیشنهادی پژوهشگاه ملی زغال‌سنگ بریتانیا برای انتخاب کارگاه‌های استخراج UCG (Irwin et al., 2009).

ردیف	معیارها	مقدار	آحاد
۱	حداقل ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ	۱	متر
۲	حداکثر خاکستر زغال‌سنگ	۶۰	درصد
۳	ذخیره‌ی زغال‌سنگ	۵	میلیون تن برای عملیات ۲۰ ساله
۴	برای استخراج به روش سنتی مشخص نشده باشد.		
۵	باعث نشست غیرقابل قبول نشود.		
۶	ناحیه گسل‌های بسیاری نداشته باشد. باید توجه داشت که اگر کارگاه استخراج در نزدیکی معادن متروکه یا نواحی گسل‌دار باشد، ممکن است نشت گاز زیاد باشد.		

جدول ۲-۴: محدودیت‌های پیشنهادی دانشگاه پردو برای انتخاب کارگاه استخراج UCG (Shafirovich et al., 2008).

ردیف	معیارها	مقدار		آحاد
۱	ضخامت لایه	۱ تا ۱/۵	۱/۵ تا ۲	بیشتر از ۲ متر
		نامناسب	قابل قبول	مناسب
۲	عمق لایه	۶۰ تا ۲۰۰	(سنگ روباره با مقاومت تسلیم کم)	بیشتر از ۲۰۰ متر
		نامناسب	(سنگ روباره با مقاومت تسلیم زیاد)	مناسب
۳	زغال‌سنگ با مواد فرار بیشتر مناسب‌تر است.			
۴	لایه‌ی زغال‌سنگ با شیب کمتر مناسب‌تر است.			
۵	مقدار ذخیره‌ی زغال‌سنگ باید برای عمر پروژه (۲۰ تا ۴۰ سال) کافی باشد.			
۶	فاصله‌ی سفره آب زیرزمینی در لایه‌های پوشان لایه‌ی زغال‌سنگ بیشتر از ۲۵ برابر ضخامت لایه باشد.			

جدول ۲-۵: محدودیت‌های پیشنهادی دانشگاه کاردیف برای انتخاب کارگاه استخراج UCG (Couch, 2009).

ردیف	معیارها	مقدار	آحاد
۱	حداقل ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ	۱/۵	متر
۲	حداقل عمق لایه‌ی زغال‌سنگ	۵۰۰	متر
۳	حداقل فاصله از ساختارهای گسلی	۲۰۰	متر
۴	حداقل فاصله از ساختمان‌ها	۵۰۰	متر
۵	حداقل فاصله از معادن فعال و غیرفعال	۵۰۰	متر
۶	درجه‌ی زغال‌سنگ کمتر از بیتومینه باید باشد.		

جدول ۲-۶: محدودیت‌های پیشنهادی CSIRO برای انتخاب کارگاه‌های استخراج UCG (Irwin et al., 2009).

ردیف	معیارها	مقدار	آحاد
۱	حداقل ضخامت لایه‌ی زغال سنگ	۵	متر
۲	حداکثر شیب لایه‌ی زغال سنگ	۲۰	درجه
۳	عمق لایه‌ی زغال سنگ	۲۰۰ تا ۴۰۰	متر
۴	حداکثر خاکستر زغال سنگ	۴۰	درصد
۵	حداقل فشار آب	۲۰۰	متر
۶	لایه باید دارای حداقل گسل و فقدان سیل باشد.		
۷	سقف باید دارای کمترین نفوذپذیری باشد.		
۸	فعالیت انسانی در نزدیکی کارگاه باید محدود شود.		
۹	مسیر جریان آب به طرف کارگاه استخراج نباید باشد.		
۱۰	نشست در ناحیه مورد نظر باید قابل قبول باشد.		
۱۱	ذخیره‌ی زغال سنگ باید برای مدت زمان انجام عملیات کافی باشد.		

۲-۳-۲- عوامل مؤثر در انتخاب کارگاه‌های استخراج UCG

در این بخش به بررسی عوامل مؤثر در انتخاب کارگاه‌های استخراج UCG مانند نوع زغال سنگ، ضخامت، عمق و شیب لایه‌ی زغال سنگ، خاکستر زغال سنگ، وجود لیچه در زغال سنگ، نفوذپذیری زغال سنگ، گسل، درزه و شکاف، آب زیرزمینی، ضخامت روباره تحکیم نیافته، مقدار ذخیره‌ی زغال سنگ و محدودیت‌های منطقه‌ای و اقتصادی پرداخته خواهد شد.

۲-۳-۲-۱- نوع زغال سنگ^۱

تغییرات تدریجی و برگشت‌ناپذیر خواص فیزیکی و شیمیایی زغال سنگ در مراحل گوناگون تشکیل در شکل ۲-۲ نشان داده شده است (Couch, 2009). انواع گوناگون زغال سنگ از لیگنیت^۲ تا آنتراسیت^۳ در کارخانه‌ی SCG، قابلیت تبدیل به گاز را دارند (Burton et al., 2007). زغال سنگ با درجات گوناگون

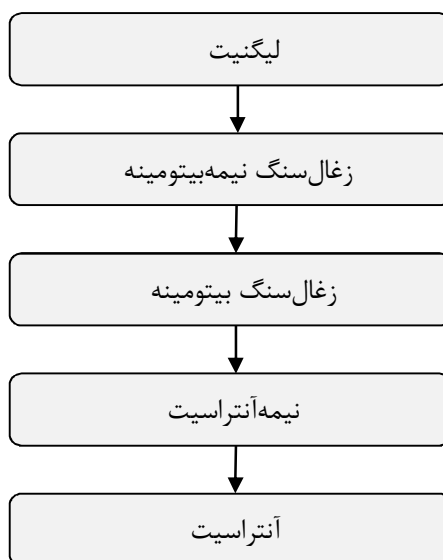
^۱ - Coal Rank

^۲ - Lignite

^۳ - Anthracite

شامل زغال‌سنگ قهوه‌ای تا آنتراسیت در جهان برای گاز کردن زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است (Białecka, 2009). نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که تقریباً هر نوع زغال‌سنگ قابلیت تبدیل به گاز در زیرزمین را دارد، ولی برخی از آن‌ها آسان‌تر به گاز تبدیل می‌شوند (Burton *et al.*, 2007).

لیگنیت و زغال‌سنگ‌های قهوه‌ای اغلب در اعماق کم (کمتر از ۳۰۰ متر) قرار داشته و با ماسه‌های ضعیف سیمانه شده و معمولاً نفوذپذیری زیادی دارند. این نوع زغال‌سنگ‌ها با مخاطرات زمین‌شناسی کمتری روبرو بوده و به راحتی مشتعل می‌شوند. آنتراسیت‌ها معمولاً در عمق بیشتر قرار داشته و با مخاطرات و پدیده‌های زمین‌شناسی مانند گسل‌ها و نفوذ سنگ‌های آذرین روبرو هستند. نفوذپذیری آنتراسیت کمتر از زغال‌سنگ با درجه‌ی پایین‌تر است (Couch, 2009).



شکل ۲-۲: تغییرات تدریجی خواص فیزیکی و شیمیایی زغال‌سنگ در مراحل مختلف تشکیل (Couch, 2009).

به نظر می‌رسد که زغال‌سنگ با درجه‌ی پایین‌تر مانند لیگنیت، نیمه‌بیتومینه^۱ و بیتومینه با مواد فرار بیشتر، نسبت به آن‌هایی که درجه‌ی بالاتری دارند برای گاز کردن زیرزمینی مناسب‌تر هستند (Couch, 2009). این امر به دلیل نفوذپذیری ذاتی این نوع زغال‌سنگ‌ها و افزایش نفوذپذیری آن‌ها در اثر

^۱ - Sub-bituminous Coal

حرارت است. لیگنیت و بیتومینه در اثر حرارت و خشک شدن، افزایش حجم پیدا کرده و نفوذپذیری آن‌ها تقریباً دو برابر می‌شود (Thorsness *et al.*, 2009)؛ در نتیجه اتصال بین چاه‌ها به راحتی صورت می‌گیرد (Burton *et al.*, 2007). محتوای رطوبت ذاتی زغال‌سنگ با درجه‌ی پایین‌تر زیاد است، بنابراین گاز سنتزی ممکن است حاوی مقدار قابل توجهی آب باشد (Couch, 2009). به عنوان نمونه، در جدول ۷-۲ نوع زغال‌سنگ و کارگاه‌های استخراج که در آن‌ها روش UCG کار شده، نشان داده شده است.

جدول ۷-۲: نوع زغال‌سنگ و نام کارگاه‌های استخراج (Couch, 2009; Gujarat Industries Power Co, 2009).

ردیف	نوع زغال‌سنگ	نام کارگاه‌های استخراج
۱	لیگنیت	Rockdale TX و Podmoskovnaya, Shatskaya, Angren
۲	نیمه‌بیتومینه	Rocky Mountain و Hanna, Rawlins, Hoe Creek
۳	بیتومینه	El Tremedal و Yuzhno-Abinskaya, Princetown, Lisichanskaya
۴	آنتراسیت	Thulin و Shatskaya

۲-۳-۲- ضخامت لایه

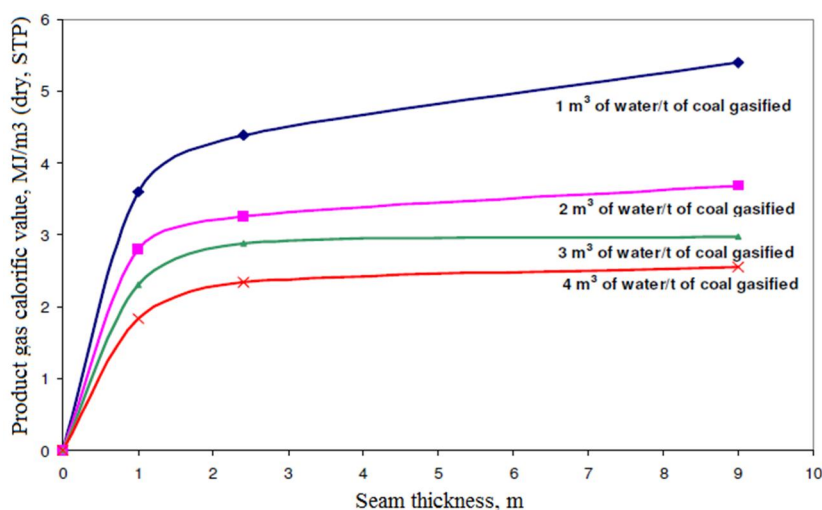
ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ به عنوان نخستین محدودیت در انتخاب لایه، پیشنهاد شده است. سپس عمق لایه‌ی زغال‌سنگ و دیگر پارامترها بر اساس لایه با ضخامت مناسب حائز اهمیت هستند (Irwin *et al.*, 2009). لایه‌ی زغال‌سنگ با ضخامت بیش از ۱۰ متر توسط شرکت GasTech در سال ۲۰۰۷ م. پیشنهاد شده. این گزارش برای حوزه‌های زغال‌دار ریور^۱ و وایومینگ^۲ که دارای زغال‌سنگ با ضخامت ۱۰ تا ۳۰ متر هستند، ارائه شده است (Shafirovich *et al.*, 2008). ولی شرکت Ergo Energy اجرای این روش در لایه‌هایی به ضخامت کمتر از ۰/۵ متر را نیز عملی می‌داند (Sathaiah *et al.*, 2010). همان طور که دیده می‌شود، درباره‌ی ضخامت لایه برای روش UCG موارد ضد و نقیضی وجود دارد. این روش در لایه‌های زغال‌سنگ با ضخامت ۰/۵ تا ۳۰ متر در شرایط زمین‌شناسی متفاوت اجرا

^۱ - River Coal Basin

^۲ - Wyoming

شده است (Kostúr and Kačúr, 2008). با این حال به نظر می‌رسد، گاز کردن لایه‌ها با ضخامت ۱ متر و بیشتر به صورت اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است (Burton *et al.*, 2007).

ارزش حرارتی گازهای تولید شده در لایه‌ها با ضخامت کمتر از ۲ متر به شدت کاهش می‌یابد (Mueller *et al.*, 2009). شکل ۳-۲ اثر توأم ضخامت لایه و تراوش آب بر ارزش حرارتی گازهای تولید شده را نشان می‌دهد. روش UCG در لایه‌ها با ضخامت بیش از ۲۰ متر با مسایلی مانند رشد غیرمنتظره راکتور، ناپایداری سقف و نشست گسترده در سطح زمین مواجه است (Couch, 2009). همچنین به عنوان نمونه، ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ در برخی از کارگاه‌های استخراج UCG در جدول ۲-۸ دیده می‌شود.



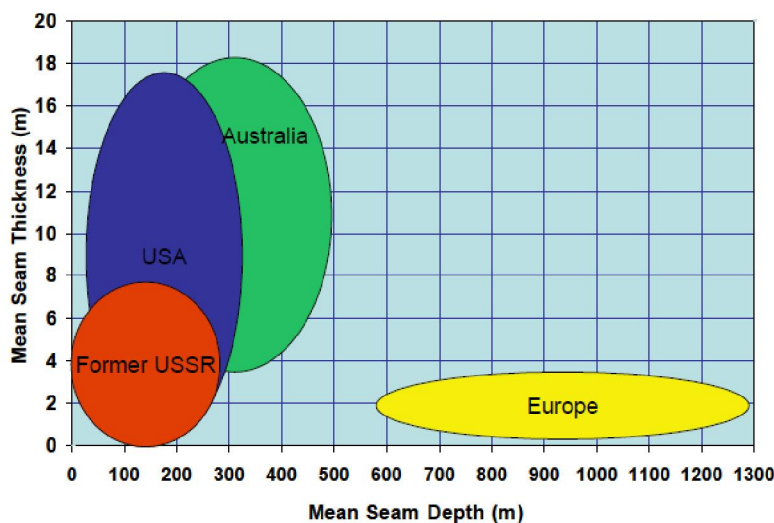
شکل ۳-۲: اثر ضخامت لایه و تراوش آب بر ارزش حرارتی گازهای تولید شده (Irwin *et al.*, 2009).

جدول ۲-۸: ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ در برخی از کارگاه‌های استخراج UCG (Burton *et al.*, 2007).

ردیف	نام کارگاه‌های استخراج	نام کشور	ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ (متر)
۱	Shakhta	روسیه	۰/۳۸
۲	Lisichansk	روسیه	۰/۴ تا ۲/۷
۳	Hoe Creek	ایالات متحده	۵
۴	Abinsk Yuzhno	روسیه	۲ تا ۹
۵	Hanna	ایالات متحده	۷
۶	Chinchilla	استرالیا	۸ تا ۱۰
۷	Angern	ازبکستان	۲ تا ۲۲

۳-۲-۳-۲- عمق لایه

با توجه به شکل ۴-۲ دیده می‌شود که گاز کردن زیرزمینی زغال‌سنگ در لایه‌هایی به اعماق مختلف انجام شده است. عمق لایه‌های در نظر گرفته شده برای روش UCG در اتحاد جماهیر شوروی سابق و کارگاه‌های آزمایشی در ایالات متحده بین ۳۰ تا ۳۵۰ متر و در اروپای غربی و کانادا در لایه‌های عمیق‌تر است (Burton *et al.*, 2007).



شکل ۴-۲: ضخامت و عمق لایه‌ها برای کارگاه‌های آزمایشی متفاوت (Burton *et al.*, 2007).

هر چند اکثر پژوهشگران فعلی آزمایش‌های گاز کردن را به طور معمول در محدوده‌ی ۱۵۰ تا ۳۰۰ متر انجام داده‌اند؛ ولی این آزمایش‌ها تا عمق ۱۴۰۰ متری نیز در اروپای غربی و کانادا انجام شده است (Couch, 2009). حداقل عمق لایه توسط کارشناسان آزمایشگاه ملی لورنس لیورمور^۱ (LLNL)، ۱۲ متر پیشنهاد شده است (Irwin *et al.*, 2009). ولی عمق بین ۳۰ تا ۸۰۰ متر برای گاز کردن با توجه به شرایط، بیشتر مورد توجه و اشاره پژوهشگران بوده است (Kostúr and Kačúr, 2008).

^۱ - Lawrence Livermore National Laboratory

لایه‌های عمیق‌تر کمتر در ارتباط با سفره‌های آب زیرزمینی قابل شرب هستند، بنابراین خطر آلودگی سفره‌ها در مدت زمان گاز کردن کاهش می‌یابد. به همین دلیل، لایه با عمق کمتر از ۶۰ متر به دلیل نزدیک بودن به سفره‌های آب زیرزمینی مناسب نیست (Couch, 2009). همچنین در عمق بیش از ۲۰۰ متر خطر نشست سطح زمین کاهش می‌یابد (Irwin *et al.*, 2009).

عمق بیش از ۳۰۰ متر نیاز به حفاری پیچیده‌تر و پرهزینه‌تر دارد (Shafirovich and Varma, 2009). ولی در عوض کاهش خطر نشست سطح زمین، کاهش خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی، اعمال فشار بیشتر به راکتور و تولید گاز با ارزش حرارتی بیشتر را در پی خواهد داشت (Shafirovich *et al.*, 2008). همچنین، راکتور ایجاد شده به وسیله‌ی فرآیند UCG در اعماق بیشتر از ۸۰۰ متر برای ذخیره‌سازی گاز دی‌اکسیدکربن و کاهش آلودگی ناشی از این گاز، مناسب است (Mueller *et al.*, 2009). در پروژه‌های CCS-UCG، انتشار گاز دی‌اکسیدکربن تا ۸۵ درصد کاهش یافته و قابل مقایسه با روش‌های مرسوم گاز کردن و احتراق زغال‌سنگ است (Burton *et al.*, 2007). به عنوان نمونه، عمق برخی از کارگاه‌های استخراج UCG در جدول ۲-۹ نشان داده شده است.

جدول ۲-۹: عمق برخی از کارگاه‌های استخراج UCG (Couch, 2009; Gujarat Industries Power Co, 2009).

ردیف	نام کارگاه‌های استخراج	نام کشور	عمق کارگاه استخراج (متر)
۱	Gorlovka	روسیه	۴۰
۲	Rocky Mountain	ایالات متحده	۷۵
۳	Hanna	ایالات متحده	۸۰
۴	Chinchilla	استرالیا	۱۳۰
۵	Angren	ازبکستان	۱۲۰ تا ۲۵۰
۶	Princetown	ایالات متحده	۳۰۰
۷	Lisichansk	روسیه	۴۰۰
۸	El Tremedal	اسپانیا	۵۳۰ تا ۵۸۰
۹	Thulin	بلژیک	۸۶۰
۱۰	Bruay en Artois	فرانسه	۱۲۰۰

۲-۳-۴- شیب لایه

در برخی از گزارش‌ها (به عنوان نمونه، ساری^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۰ م.) به برتری لایه‌های کم شیب اشاره شده است. زیرا آب درون راکتور از طریق زهکشی خارج شده و تعادل ایستایی راکتور حفظ می‌شود. مقایسه‌ی دو طرح UCG، یکی در لایه‌های افقی و دیگری در لایه‌های شیب‌دار، نشان می‌دهد که زاویه‌ی شیب به عنوان محدودیتی بحرانی در کارگاه‌های استخراج UCG مطرح نیست (Irwin *et al.*, 2009). هر چند شرکت GasTech در سال ۲۰۰۷ م.، لایه‌ی زغال‌سنگ با شیب بین ۰ تا ۲۰ درجه را پیشنهاد داده است (Shafirovich *et al.*, 2008)؛ ولی روش UCG در لایه‌های بسیار شیب‌دار، تا ۷۰ درجه هم اجرا شده است (Kostúr and Kačúr, 2008). بنابراین، شیب یک عامل محدود کننده نیست. تغییرات زاویه‌ی شیب لایه در حفاری درون لایه‌ی زغال‌سنگ، باعث انحراف مته از لایه می‌شود. انحراف مته منجر به کاهش مقدار زغال‌سنگ قابل بازیابی می‌شود (Oliver and Covell, 1989). به عنوان نمونه، شیب برخی از کارگاه‌های استخراج UCG در جدول ۲-۱۰ آورده شده است.

جدول ۲-۱۰: شیب برخی از کارگاه‌های استخراج UCG (Burton *et al.*, 2007؛ Couch, 2009).

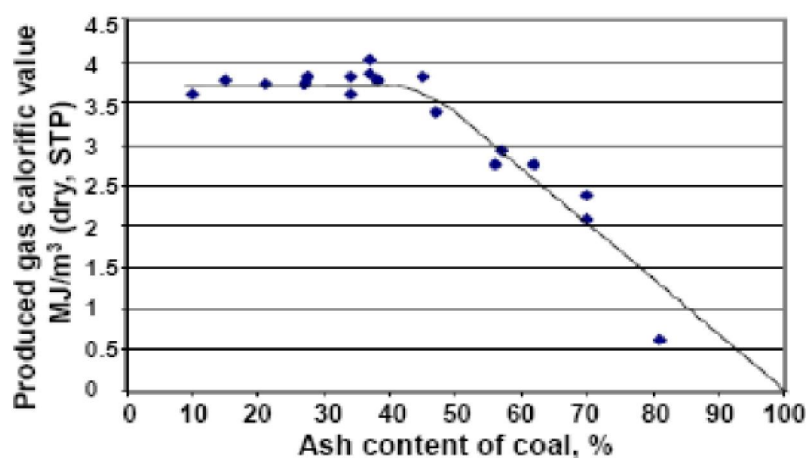
ردیف	نام کارگاه‌های استخراج	نام کشور	شیب کارگاه استخراج (درجه)
۱	Angren	ازبکستان	۵ تا ۱۵
۲	Lisichansk	روسیه	۲۰ تا ۶۰
۳	Rawlins	ایالات متحده	۶۰
۴	Abinsk Yuzhno	روسیه	۵۵ تا ۷۰
۵	Gorlovka	روسیه	۷۰

۲-۳-۵- خاکستر زغال‌سنگ

وجود مقدار اندکی ناخالصی و مواد معدنی در زغال‌سنگ، به ویژه زغال‌سنگ با درجه‌ی پایین‌تر،

^۱ - Sury

ممکن است مانند کاتالیست عمل کرده و باعث بهبود سینتیک واکنش‌های شیمیایی طی فرآیند گاز کردن شود (Sathaiah *et al.*, 2010). ولی همان طور که در شکل ۲-۵ دیده می‌شود؛ اگر مقدار خاکستر موجود در زغال سنگ (در این جا زغال سنگ بیتومینه با مواد فرار زیاد، مد نظر است) بیشتر از ۴۰ درصد باشد؛ ارزش حرارتی گازهای تولید شده به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد (Irwin *et al.*, 2009). به عنوان نمونه، خاکستر زغال سنگ در برخی از کارگاه‌های استخراج UCG در جدول ۲-۱۱ آورده شده.



شکل ۲-۵: رابطه‌ی مقدار خاکستر زغال سنگ و ارزش حرارتی گازهای تولید شده (Irwin *et al.*, 2009).

جدول ۲-۱۱: خاکستر زغال سنگ در برخی از کارگاه‌های استخراج UCG (Couch, 2009).

ردیف	نام کارگاه‌های استخراج	کشور	خاکستر زغال سنگ (درصد)
۱	Lisichansk	روسیه	۱/۶ تا ۶
۲	Abinsk Yuzhno	روسیه	۴ تا ۱۰
۳	El Tremedal	اسپانیا	۱۴
۴	Podmoskovnaya	روسیه	۲۷ تا ۶۰

۲-۳-۲-۶- وجود لیچه^۱ در لایه‌ی زغال سنگ

وجود لیچه با ضخامت زیاد درون لایه‌ی زغال سنگ و به ویژه در نزدیک نقطه‌ی تزریق، مسیر

^۱ - Parting

چاه‌های حفاری و مسیر گسترش راکتور UCG، از انتشار جبهه‌ی احتراق جلوگیری می‌کند. اگر ضخامت لیچه بیش از ۱ متر باشد، به احتمال زیاد باعث توقف عمل گاز کردن می‌شود. کاهش قابل توجهی در کیفیت گاز تولید شده می‌تواند حاکی از وجود لیچه در مسیر گاز کردن باشد. اگر لایه‌ی زغال‌سنگ محتوی بیش از ۲۰ درصد لیچه باشد، کیفیت گاز تا زیادی کاهش می‌یابد؛ به طوری که ممکن است عملیات UCG از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نباشد (Oliver and Covell, 1989).

۲-۳-۷- نفوذپذیری زغال‌سنگ^۱

زغال‌سنگ‌های جوان‌تر مانند لیگنیت و زغال‌سنگ قهوه‌ای دارای نفوذپذیری کافی هستند و توانایی برای اتصال بین چاه‌ها (۲۰ تا ۵۰ متر) را دارند. ولی زغال‌سنگ‌های قدیمی‌تر، فشرده شده و تغییر شکل داده؛ در نتیجه برای ایجاد مسیر جریان گاز نیاز به استفاده از روش‌های مصنوعی است (Couch, 2009). زغال‌سنگ در معرض حرارت، کاهش حجم پیدا می‌کند؛ در نتیجه نفوذپذیری آن افزایش یافته و به دنبال آن اتصال بین چاه‌های تزریق و تولید میسر شده و جریان گاز به راحتی صورت می‌گیرد (Irwin *et al.*, 2009). لایه‌ی زغال‌سنگ با نفوذپذیری و درزه و شکاف بیشتر باعث هدایت سریع‌تر واکنش‌دهنده‌ها و افزایش میزان گاز کردن می‌شود (Sathaiah *et al.*, 2010).

۲-۳-۸- گسل، درزه و شکاف

یکی از دلایل نشت گازهای تولید شده، وجود شکستگی‌های فراوان در روباره و یا خود لایه‌ی زغال‌سنگ است. گسل‌ها مانند مجرا عمل می‌کنند و باعث نشت گاز و ایجاد مخاطرات زیست‌محیطی می‌شوند. پس حتی‌الامکان گسل در کارگاه استخراج UCG نباید وجود داشته باشند. در هر صورت، تراکم

^۱ - Coal Permeability

گسل‌ها نباید بیش از یک گسل در هر ۳۰ متر باشد (Oliver and Covell, 1989).

گسل‌هایی که به سطح زمین راه دارند؛ ممکن است مسیری را برای نشت گاز به وجود آورند. چاهایی که به وسیله گسل‌ها قطع شده‌اند ممکن است غیرقابل استفاده باشند؛ زیرا باعث افزایش نفوذپذیری می‌شوند. اگر سطح گسل با مواد پرکننده نفوذناپذیر پر شده باشد؛ نفوذپذیری آن کاهش می‌یابد. ولی اگر نفوذپذیری زیادی داشته باشد، گازهای تولید شده از طریق این گسل‌ها به بیرون نشت می‌کنند (Oliver and Covell, 1989). به عنوان نمونه، در کارگاه استخراج راولین^۱ نشت گاز از درزه‌ها و شکاف‌های موجود در روباره زغال‌سنگ به وقوع پیوست، که باعث افزایش آلودگی هوا شد. یکی از مهم‌ترین مسایل در مسیر حفاری چاه‌های افقی، وجود گسل‌ها، چین‌خوردگی‌ها و لیچه با ضخامت زیاد است که باعث کاهش بهره‌وری فرآورده‌ها می‌شود.

۲-۳-۹- آب‌های زیرزمینی

نتایج آزمایش‌های انجام شده در CSIRO نشان می‌دهند که با افزایش نفوذ آب به درون راکتور، از خود لایه یا از طبقات در بر گیرنده، ارزش حرارتی گازهای تولید شده کاهش می‌یابد. بنابراین، انتخاب لایه‌ی زغال‌سنگ با مقدار رطوبت کمتر و دور از سفره‌های آب زیرزمینی، مناسب‌تر است. از طرف دیگر، پژوهش‌های انجام شده در این زمینه نشان می‌دهند که سفره‌هایی که به کارگاه‌های UCG نزدیکتر هستند، بیشتر در معرض آلودگی هستند (Irwin et al., 2009).

همچنین یکی از مهم‌ترین اثر آب در فرآورده‌های UCG، کاهش کیفیت گاز سنتزی است. کیفیت گاز و آغاز فرآورده‌ها متأثر از آب درون سازندها و نفوذپذیری زیاد سازند است. حضور آب زیاد در نزدیکی نقطه‌ی آغاز فرآیند گاز کردن باعث اختلال در فرآیند می‌شود (Oliver and Covell, 1989).

^۱ - Rawline

برای انتخاب کارگاه استخراج UCG، باید شرایط آب محیط را بررسی نمود. این شرایط شامل برآورد نفوذپذیری زغال سنگ، روباره و لایه‌های زیرین، سیستم جریان درون سفره آب زیرزمینی و طبقات آب‌دار است. شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی در ارتباط با هم هستند. گسل‌ها و شکستگی‌ها، سازندی با نفوذپذیری زیاد به وجود می‌آورند و همچنین باعث تغییر الگوی جریان گاز می‌شوند. گاهی اوقات نشست سقف کارگاه باعث حضور آب در راکتور می‌شود.

به عنوان نمونه، سفره‌های آب زیرزمینی در نزدیکی کارگاه‌های استخراج راکی مونتین^۱، هوکریک^۲ و پودموسکو^۳ به دلیل نشت آلاینده‌ها، آلوده شده است (Burton *et al.*, Oliver and Covell, 1989). (2007).

۲-۳-۱۰- ضخامت روباره‌ی تحکیم نیافته

نشست گاز از روباره‌ی تحکیم نیافته به دلیل تخلخل و نفوذپذیری، بیشتر است. ضخامت روباره‌ی تحکیم یافته باید حداقل ۱۵ تا ۲۰ متر باشد. به علاوه ۳۵ متر از ضخامت روباره‌ی بلاواسطه باید خشک و نسبتاً نفوذناپذیر باشد تا از تراوش کنترل نشده آب به درون راکتور و همچنین از نشست گاز جلوگیری شود. به عنوان نمونه، وجود تناوبی از لایه‌های تحکیم نیافته در لایه‌های پوشان کارگاه استخراج هوکریک، باعث نشست گسترده از کارگاه استخراج شده است (Oliver and Covell, 1989).

۲-۳-۱۱- مقدار ذخیره‌ی زغال سنگ

مقدار ذخیره‌ی زغال سنگ عاملی مهم برای اجرای این روش استخراج است. بازار فروش یا مصرف

^۱ - Rocky Mountain

^۲ - Hoe Creek

^۳ - Podmoskovo

گاز، عاملی دیگر برای گسترش تجاری این روش محسوب می‌شود. اگر بازار مصرف گاز در نزدیک کارگاه قرار گرفته باشد، هزینه‌ی انتقال گاز به حداقل می‌رسد (Khadse et al., 2007).

در انتخاب کارگاه استخراج، تعیین مقدار ذخیره‌ی زغال‌سنگ در دسترس برای گاز کردن، در ارتباط با کاربردهای گاز سنتزی است. عمر هر کارگاه باید به عنوان تابعی از گاز تولیدی باشد. به عنوان نمونه، برای ۲۰ سال عملیات پیوسته در نیروگاه سیکل ترکیبی ۳۰۰ مگاواتی بر اساس روش UCG با بهره‌وری ۵۰ درصد، تولید ۷۵/۶ میلیارد مترمکعب گاز سنتزی با ارزش حرارتی ۵ مگاژول بر مترمکعب نیاز است. برای تولید این مقدار گاز، ۳۳ میلیون تن زغال‌سنگ مورد نیاز است (Shafirovich and Varma, 2009). ولی به عنوان نمونه، حداقل ذخیره‌ی زغال‌سنگ قابل بهره‌برداری به روش UCG در بریتانیا ۵ میلیون تن و در ایالات متحده ۳/۵ میلیون تن برآورد شده است (Irwin et al., 2009).

هزینه‌ی انتقال گاز سنتزی با انتخاب کارگاه استخراج مناسب و نیروگاه تولید برق یا کارخانه‌های تولید محصولات شیمیایی در نزدیک کارگاه استخراج، کاهش می‌یابد. برای گسترش پایدار این روش، کارخانه باید در نزدیک کارگاه استخراج و به فاصله‌ی ۲۵ تا ۳۰ کیلومتری از آن احداث شود (Irwin et al., 2009).

۲-۳-۱۲- محدودیت‌های منطقه‌ای و اقتصادی

افزون بر معیارهای ذکر شده در بخش‌های پیشین، معیارهای اجتماعی-اقتصادی و سیاسی هم حائز اهمیت هستند. یک کارگاه استخراج ایده‌آل باید دور از مناطق پر جمعیت، جاده‌ها، خطوط راه آهن و خطوط انتقال برق باشد. همچنین کارگاه استخراج نباید نزدیک پارک‌های ملی، زیست‌گاه حیات وحش، پوشش گیاهی انبوه، مزارع کشاورزی، چاه‌های بهره‌برداری آب، میادین نفت و مخازن گاز قرار گرفته و دارای توپوگرافی مناسب باشد (Oliver and Covell, 1989).

عوامل اقتصادی که در انتخاب کارگاه استخراج باید مدنظر قرار داد، شامل مستعد بودن ناحیه مورد نظر، منابع دسترسی به نیروی کار، تجهیزات و مواد اولیه، ارزش بازاری فرآورده، هزینه‌های آماده‌سازی، راه‌اندازی و توزیع فرآورده، مالیات‌ها، مقبولیت عامه مردم و آیین‌نامه‌های زیست‌محیطی هستند.

۲-۳-۳- انتخاب کارگاه استخراج

پس از تعیین معیارهای انتخاب کارگاه استخراج، چند ناحیه مستعد شناسایی شده و با هم مقایسه می‌شوند. اطلاعات مورد نیاز زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی را می‌توان از سازمان زمین‌شناسی، شرکت‌های استخراج زغال‌سنگ، سازمان آب و نیز از طریق برداشت‌های صحرایی گردآوری کرد.

به طور کلی باید تمام اطلاعات زمین‌شناسی مانند چینه‌شناسی، زمین‌شناسی ساختمانی و اطلاعات مربوط به لایه‌ی زغال‌سنگ و روباره تعیین شود. اطلاعات چینه‌شناسی شامل تعیین حوزه‌ی رسوب‌گذاری زغال‌سنگ و طبقات در برگیرنده برای پیش‌بینی شکل کلی سازند نیاز است. اطلاعات زمین‌شناسی ساختمانی شامل گسل‌ها، چینه‌ها، شکستگی‌ها و ناپیوستگی‌ها است (Oliver and Covell, 1989).

اطلاعات هیدروژئولوژی برای تعیین سازندهای آب‌دار مانند جهت کلی جریان آب و مناطق تخلیه و شارژ مورد نیاز است. پس از اتمام گردآوری اطلاعات مورد نیاز از همه‌ی مناطق مستعد، با توجه به اطلاعات موجود و مقایسه‌ی مقادیر معیارهای تعیین شده، بهترین ناحیه برای ارزیابی بیشتر انتخاب می‌شود. ناحیه انتخاب شده باید با جزئیات بیشتری برای مراحل بعدی ارزیابی شود. برای این کار، برداشت‌های صحرایی مانند نقشه‌برداری سطحی، حفاری، چاه پیمایی ژئوتکنیکی و آزمایش‌های هیدروژئولوژی اضافی نیاز است. یکی از اهداف پایش‌های میدانی برداشت فاصله‌ی گسل‌ها از یکدیگر برای جانمایی کارگاه استخراج است.

در این مرحله هم شناسایی دقیق سازندهای آبدار و نفوذپذیری کلی نیاز است که با حفاری، چاه

پیمایی ژئوفیزیکی و آزمایش‌های تزریق تعیین می‌شود. برخی از مغزه‌ها برای تعیین مقاومت سنگ روباره استفاده می‌شوند.

پس از برداشتهای صحرایی، ارزیابی مخاطرات زیست‌محیطی مانند خطر نشت سطح زمین، آلودگی آب‌های زیرزمینی همراه با بازیابی فرآیند، بازگشت سرمایه و تجاری‌سازی کارگاه باید مورد مطالعه قرار گیرد. با استفاده از ارزیابی قابلیت تجاری‌سازی کارگاه استخراج، بهترین کارگاه برای ارزیابی بیشتر انتخاب می‌شود. مرحله‌ی بعدی، ارزیابی کارگاه استخراج است، که نیاز به مقدار قابل توجهی سرمایه‌گذاری دارد.

۲-۳-۴- طراحی کارگاه استخراج

برای ارزیابی دقیق بازگشت سرمایه، باید کارگاه استخراج در مقیاس پایلوت با جزئیات بیشتر طراحی شود. باید از اطلاعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی که قبلاً توضیح داده شده است، برای طراحی کارگاه استخراج استفاده نمود. این ارزیابی قبل از انجام بهره‌برداری واقعی از کارگاه باید انجام شود. همه‌ی این موارد باید در اختیار تیم طراحی (به عنوان نمونه، مهندس فرآوری، زمین‌شناس، متخصص هیدروژئولوژی و مهندسی محیط زیست) قرار گیرد؛ که ضمن بررسی دشواری‌های احتمالی، راه‌کارهای و راه‌حل‌های مورد نیاز را ارائه دهند (Oliver and Covell, 1989).

بر اساس استاندارد کشور آمریکا برای بررسی و پایش یک کارگاه استخراج آزمایشی، زمینی به ابعاد (۱۳۰ متر در ۱۳۰ متر) را می‌توان انتخاب نمود. تقریباً ۳۰ گمانه باید در این زمین حفر شود. از یکی یا دو تا از گمانه‌ها برای مغزه‌گیری لایه‌های تشکیل‌دهنده‌ی پوشان سنگ و ۸ تا ۱۰ تا برای مغزه‌گیری از لایه‌ی زغال‌سنگ و طبقات مجاور آن استفاده می‌شود. بقیه گمانه‌ها برای اندازه‌گیری کیفیت آب و چاه‌پیمایی استفاده می‌شود. توموکوپل برای اندازه‌گیری درجه حرارات درون راکتور و ابزارهای اندازه‌گیری

جابه‌جایی اطراف راکتور در برخی از گمانه‌ها نصب می‌شود.

اطلاعات ژئوفیزیکی و مغزه‌گیری برای ترسیم مقاطع زمین‌شناسی استفاده می‌شود. این مقاطع ارتباط بین لایه‌ی زغال‌سنگ، لیچه، روباره و همچنین ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ را در قسمت‌های مختلف نشان می‌دهد. همچنین از این مقاطع برای تعیین گسل‌ها، چین‌ها، ناپیوستگی‌ها و شیب و جهت شیب لایه استفاده می‌شود (Oliver and Covell, 1989).

از روی این مقاطع، شکل هندسی سه بعدی لایه‌ی زغال‌سنگ ترسیم شده و برای برآورد ذخیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای برآورد ذخیره، باید وزن لیچه را از وزن کلی کم کرد. با انجام موارد مطالعاتی و اکتشافی فوق برای تجاری‌سازی کارگاه استخراج، تنها یک حداقل بازبینی در آزمایش‌های پایلوت نیاز است. اگر اطلاعات موجود برای تجاری‌سازی کافی نباشد، بازبینی ویژگی زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی دوباره باید صورت گیرد (Oliver and Covell, 1989).

۲-۳-۵- آزمایش پایلوت و تجاری‌سازی

آزمایش پایلوت، یک آزمایش نیمه‌تجاری برای به دست آوردن اطلاعات ضروری برای تجزیه و تحلیل نهایی بازگشت سرمایه است. نظارت و ارزیابی فرآیندها برای افزایش بازیابی و پایش آب‌های زیرزمینی باید صورت گیرد. پس از انجام آزمایش و احتراق لایه‌ی زغال‌سنگ، مغزه‌گیری از راکتور تخلیه شده انجام شده و مقدار واقعی نشست، مخاطرات زیست‌محیطی و بازیابی زغال‌سنگ به دست می‌آید (Oliver and Covell, 1989).

منحنی کیفیت گازهای تولید شده برای تعیین بهره‌وری فرآیند رسم شده و اثر عوامل مؤثر بر آن مشخص می‌شود. نمونه‌گیری از آب‌های زیرزمینی برای مشخص کردن میزان و نوع آلاینده‌ها و مسیر حرکت آن‌ها نیاز است.

اگر نتایج این ارزیابی‌ها مناسب باشد، امکان تجاری‌سازی فراهم شده، ولی اگر مناسب نباشد، تعدیل عوامل عملیاتی برای بهبود ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی باید انجام شود و یا آزمایش‌های پایلوت دیگری باید انجام شود. در ادامه به معرفی تأسیسات سطحی مورد نیاز در این روش پرداخته می‌شود.

۲-۴- معرفی فرآیندهای پس از استحصال گاز سنتزی

تأسیسات سطحی در ناحیه‌ی تزریق شامل مخازن برودتی اکسیژن (برای فرآیند گاز کردن) و نیتروژن (برای ایمنی)، بخارسازها، پمپ‌های تزریق آب با فشار قوی و کمپرسرهای تزریق و در ناحیه‌ی تولید شامل خطوط لوله از سر چاه تولید تا مشعل درون کارگاه، خطوط لوله انتقال گاز سنتزی تولید شده تا پالایشگاه، پالایشگاه، اتاق کنترل و تجهیزات تولید برق یا کارخانه تولید سوخت‌های مایع هستند (Kamall, 1999). در این بخش به معرفی فرآیندهای تبدیل گاز سنتزی به محصول شیمیایی سودمند پرداخته خواهد شد.

به فرآیندهای پالایش برای تبدیل گاز طبیعی و دیگر هیدروکربن‌های گازی به هیدروکربن‌های مایع با زنجیره بلندتر، فرآیند تبدیل گاز به مایع^۱ (GTL) گفته می‌شود. فرآیند GTL در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله‌ی نخست، از واکنش زغال‌سنگ، گاز سنتزی تولید می‌شود. در مرحله‌ی دوم، گاز سنتزی در سنتز فیشر-تروپش^۲، در راکتوری به همین نام به محصول اولیه^۳ که مخلوطی از هیدروکربن‌ها است، تبدیل می‌شود. در ادامه، با استفاده از روش‌هایی مانند تقطیر و کراکینگ می‌توان محصولات نهایی مانند سوخت دیزل، سوخت جت، واکس‌ها، نفتا و میعانات نفتی^۴ (LPG) تولید کرد که قابلیت ذخیره‌سازی، انتقال و صادرات آن آسان بوده، از لحاظ مشخصات زیست‌محیطی و کاربردی جزء

^۱ - Gas To Liquid

^۲ - Fischer-Tropsch Synthesis

^۳ - Syncrude

^۴ - Liquefied Petroleum Gas

ایده‌آل‌ترین سوخت‌ها محسوب می‌شوند. گاز سنتزی مورد نیاز برای واحد GTL باید مخلوطی از هیدروژن و مونواکسیدکربن به نسبت ۱/۳ تا ۳ باشد (LincEnergy Report, 2006؛ دیدری، ۱۳۸۳).

یک واحد صنعتی کامل GTL، به غیر از واحد سرویس‌های جانبی، از واحدهای مجزای زیر تشکیل می‌شود (دیدری، ۱۳۸۳):

- واحد تولید گاز سنتزی با استفاده از اکسیژن؛
- واحد جذب CO₂ با حلال و جداسازی H₂؛
- واحد سنتز فیشر- تروپش در راکتور؛
- واحد هایدروکراکینگ و بهبود کیفیت گاز؛
- واحد جداسازی محصولات نهایی؛

برای تولید هیدروکربن‌ها با زنجیره کوتاه و بلند از گاز سنتزی (مخلوط مونواکسیدکربن و هیدروژن)، راه‌اندازی واحد سنتز فیشر- تروپش نیاز است. این واحد، واحد اصلی فرآیند GTL بوده و راکتور آن قلب کل فرآیند GTL محسوب می‌شود. سنتز فیشر- تروپش یک واکنش پلیمریزاسیون^۱ (بسپارش) است که با دخالت کاتالیست‌هایی مانند آهن، کبالت و روتنیم انجام می‌شود. شکل کلی واکنش این فرآیند به صورت رابطه‌ی شیمیایی ۱-۲ است (LincEnergy Report, 2006):



برای انجام این واکنش، راکتورهای مختلفی مانند بستر ثابت^۲، بستر سیال^۳ و ستون دوغابی حباب‌دار^۴ مورد استفاده قرار می‌گیرند. واکنش صورت گرفته به مقدار قابل توجهی آب تولید می‌نماید که این آب با جذب گرمای واکنش و بیرون از راکتور به صورت بخار، مقدار زیادی از گرمای تولید شده توسط واکنش را همراه با خود بیرون می‌کند که دارای انرژی فراوانی است. از طرف دیگر راکتور باید همواره در

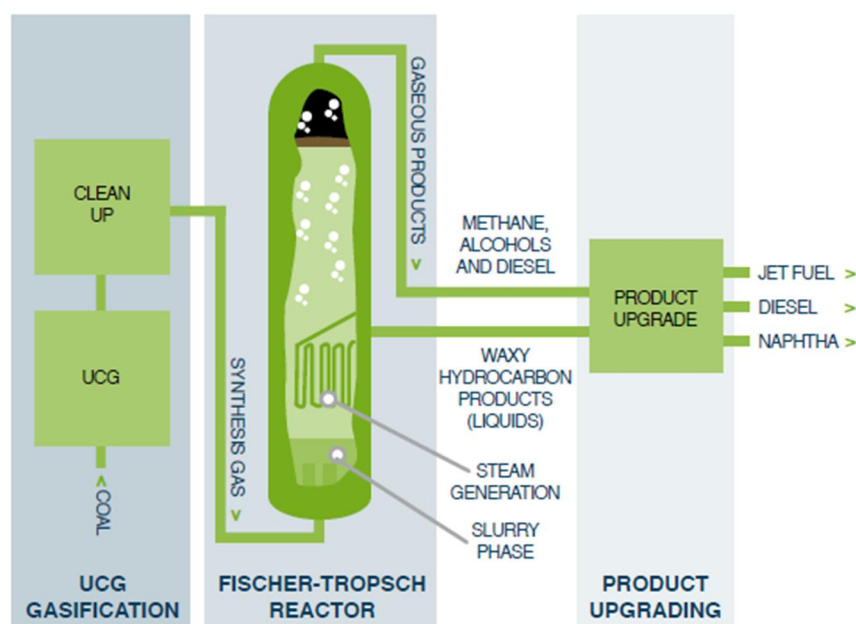
^۱ - Polymerization

^۲ - Fixed Bed

^۳ - Fluidized Bed

^۴ - Slurry Bubble Column

درجه حرارت ثابت بماند و این کار با چرخش آب درون یک پوسته به دور راکتور صورت می‌پذیرد. حرارت جریان خروجی از راکتور طی چند مرحله بازیابی شده و هیدروکربن‌های تولید شده، آب و گاز سنتزی که واکنش نداده از هم جدا می‌شود (عمیدپور و همکاران، ۱۳۸۷). فن‌آوری GTL برای تبدیل گاز سنتزی حاصل از روش UCG به سوخت‌های مایع به صورت صنعتی در شکل ۲-۶ نشان داده شده است.



شکل ۲-۶: شمای کلی از فرآیند UCG تا فرآیند GTL (LincEnergy Report, 2006).

۲-۵- اتصال چاه‌های تزریق و تولید

برای بهره‌برداری و استخراج با استفاده از روش استخراج UCG، بازکننده‌ها و چاه‌هایی برای دسترسی به لایه‌ی زغال‌سنگ باید حفر شوند. این بازکننده‌ها می‌تواند به شکل تونل‌ها و یا چاه‌هایی که با روش دستی و حفاری جهت‌دار حفر می‌شوند، باشند. سریع‌ترین و ساده‌ترین راه دسترسی و بهره‌برداری از لایه‌ی زغال‌سنگ در روش UCG استفاده از چاه‌های قائم است. حفر این چاه‌ها با استفاده از روش‌های

حفاری سطحی صورت می‌گیرد. در این روش به دو نوع چاه قائم نیاز است.

چاه تزریق که از آن اکسیدان تزریق می‌شود و تعداد آن یک یا چند چاه می‌تواند باشد. تعداد چاه‌های تزریق به موقعیت و شرایط زغال‌سنگ بستگی دارد. چاه تولید که تعداد آن نیز ممکن است بیش از یکی باشد (Burton *et al.*, 2007).

یکی از مسایل اساسی در روش استخراج UCG، چگونگی ایجاد نخستین ارتباط زیرزمینی بین چاه‌های تزریق و تولید برای افزایش نفوذپذیری زغال‌سنگ، جریان مطلوب گاز و بهره‌برداری بیشتر از منابع است. چندین روش برای اتصال چاه‌های تزریق و تولید وجود دارد. هر کدام از این روش‌ها دارای نقاط ضعف و قوتی هستند (Hartman, 1996).

روش‌های مختلف اتصال شامل روش‌های الکتریکی، آب‌شکافت^۱، احتراقی و حفاری جهت‌دار هستند. روش‌های اتصال آب‌شکافت و احتراقی هزینه‌ی کمتری نسبت به حفاری جهت‌دار دارند (Shafirovich and Varma, 2009).

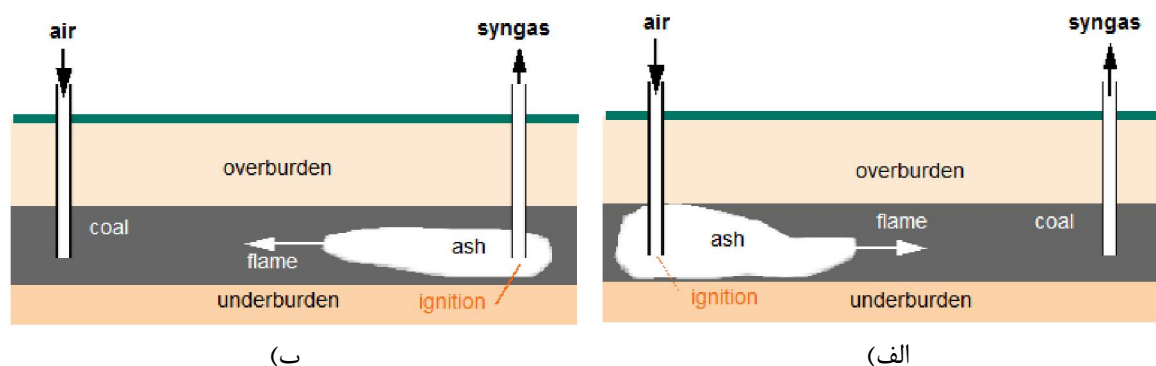
۲-۵-۱- شیوه‌ی اتصال چاه‌ها با استفاده از روش‌های احتراقی

دو نوع روش احتراقی برای اتصال چاه‌های تزریق و تولید وجود دارد که در شکل ۲-۷ دیده می‌شوند. این روش‌ها، شامل روش‌های احتراق پسرو^۲ (RCL) و احتراق پیشرو^۳ (FCL) هستند. در روش احتراق پسرو، جهت پیشروی جبهه‌ی احتراق به طرف چاه تزریق و در روش احتراق پیشرو، جهت پیشروی جبهه‌ی احتراق به طرف چاه تولید است. هر دو روش مستلزم فیلتراسیون اکسیدان‌ها از درون لایه‌ی زغال‌سنگ برجا هستند (Blinderman and Klimenko, 2007).

^۱ - Hydraulic Fracturing

^۲ - Reverse Combustion Linking

^۳ - Forward Combustion Linking



شکل ۲-۷: اتصال به کمک روش احتراق پسرو و پیشرو: (الف) پیشرو (ب) پسرو (Coach, 2009).

۲-۵-۱-۱- روش احتراق پسرو

روش احتراق پسرو نخست برای اتصال چاه‌ها با فاصله‌ی نسبتاً کوتاه (۱۸ متر) مورد استفاده قرار می‌گرفت. در وایومینگ^۱ در ایالات متحده اتصالاتی تا طول ۱۸ متر و در روسیه تا ۳۰ متر حفر شده است. میانگین این طول در معدن آنگرین^۲ در ازبکستان ۱۷ متر بوده است. اساس این روش، نیاز زغال سنگ به گاز اکسیژن برای گاز شدن است (Hartman, 1996). فاصله‌ی بین چاه‌ها وابسته به ضخامت لایه‌ی زغال سنگ گاز شده است (Kreinin and Zorya, 2009).

روش احتراق پسرو در روسیه، اوکراین انجام شده و بیش از ۵۰ سال است که در ازبکستان به کار می‌رود. RCL در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ م. در ایالات متحده استفاده شد. در سال‌های اخیر از این روش در کارگاه‌های چینچیللا^۳ (در استرالیا) و مجوبا^۴ (در آفریقای جنوبی) به صورت موفقیت‌آمیز استفاده می‌شود. در روش احتراق پسرو، گاز به درون یکی از چاه‌ها (چاه تزریق)، تزریق می‌شود، در حالی که احتراق در چاه دیگر (چاه تولید) صورت می‌گیرد. احتراق زغال سنگ از چاه تولید به طرف منبع اکسیدان گسترش می‌یابد (Blinderman and Klimenko, 2007).

^۱ - Wyoming

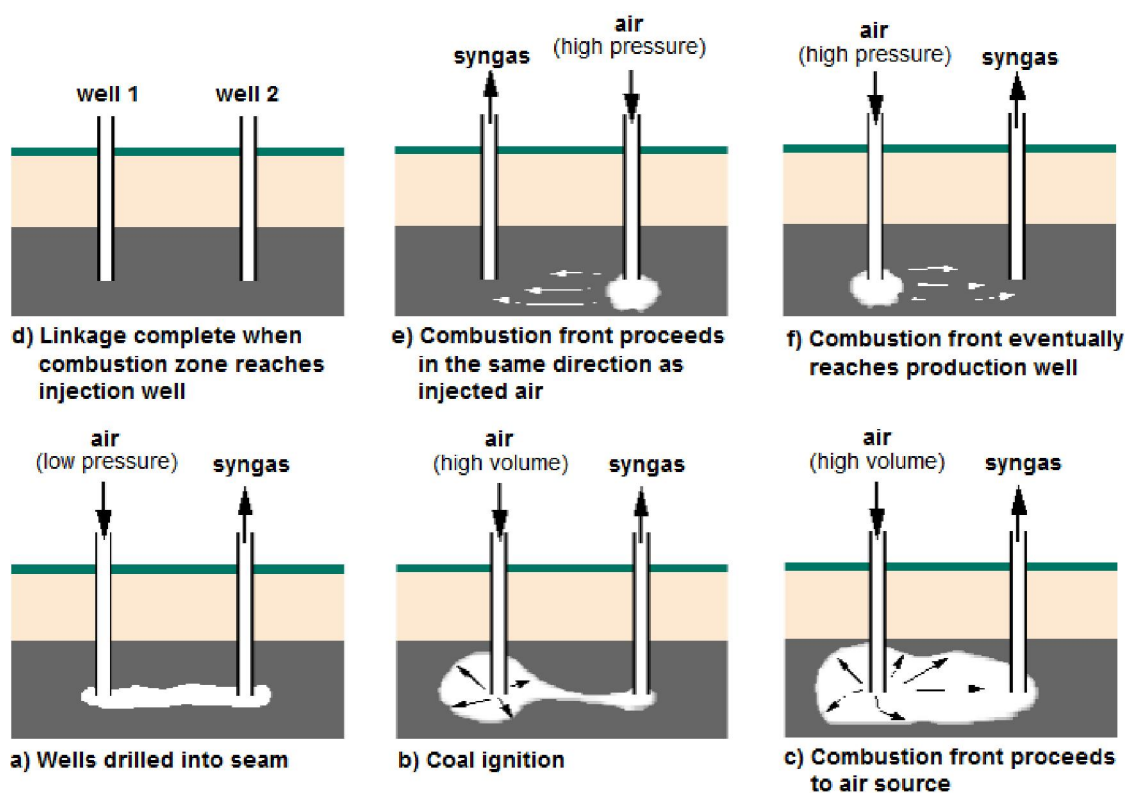
^۲ - Angren

^۳ - Chinchilla

^۴ - Majuba

با توجه به شکل ۸-۲ نخست هوای داغ با فشار زیاد به درون چاه تولید، تزریق می‌شود. سپس هوا با احتراق زغال سنگ به طرف چاه تزریق از بین لایه‌ی زغال سنگ عبور کرده و مقدار اندکی باعث پیشروی اتصال می‌شود. بار دیگر همانند مرحله‌ی قبل، هوا با فشار زیاد به درون چاه دیگر تزریق می‌شود. افت ناگهانی فشار خط لوله نشان دهنده‌ی ایجاد اتصال بین دو چاه است (Fischer *et al.*, 1977).

پس از ایجاد اتصال، هوا با فشار کم برای آماده کردن کارگاه به درون چاه تزریق می‌شود. سپس اکسیدان‌ها که می‌توانند مخلوط اکسیژن و بخار آب باشد، با حجم زیاد تزریق می‌شوند. جبهه‌ی احتراق در جهت جریان تزریق هوا تا چاه تولید پیشروی کرده و باعث تولید گاز می‌شود (Fischer *et al.*, 1977).



شکل ۸-۲: مراحل اتصال چاه‌ها با روش احتراق پسر در روش UCG (Couch, 2009).

برای آغاز احتراق در چاه، گرمکن الکتریکی و چاشنی شیمیایی استفاده می‌شود. تزریق هوا با فشار زیاد (۲/۵ مگاپاسکال) منجر به تشکیل کانالی به طول ۰/۸ متر در روز می‌شود. مصرف هوای فشرده،

حدوداً ۶۸۰۰ مترمکعب بر واحد طول کانال‌های اتصال دهنده است. هزینه‌ی این روش تقریباً نصف هزینه‌ی حفاری جهت‌دار است (Hartman, 1996).

در این روش چاه‌های تزریق و تولید به فاصله‌ی ۲۰ تا ۳۰ متر از یکدیگر حفر می‌شوند. این چاه‌ها در پایان احتراق پسرو به وسیله‌ی کانالی به قطر ۰/۶ تا ۱/۲ متر به همدیگر وصل می‌شوند که حتی بدون استفاده از فشار تزریق زیاد، گاز با دبی زیاد جریان می‌یابد. اکسیدان‌ها، مخلوط اکسیژن و بخار آب هستند. این روش در لایه‌های زغال‌سنگ با درجه‌ی کم و تا عمق ۴۰۰ متر استفاده شده (Kempka et al., 2009) و برای لایه‌های زغال‌سنگ عمیق‌تر پیشنهاد نمی‌شود (Irwin et al., 2009).

مهم‌ترین معایب روش احتراق پسرو، غیرقابل کنترل و تا اندازه‌ای غیرقابل پیش‌بینی بودن مسیر کانال حفر شده است (Kempka et al., 2009). ولی مهم‌ترین مزیت آن عدم انسداد حفرات درون لایه‌ی زغال‌سنگ در اثر گاز چگالیده و افزایش سرعت احتراق نسبت به روش احتراق پیشرو است (Blinderman and Klimenko, 2007).

۲-۵-۱-۲- روش احتراق پیشرو

روش احتراق پیشرو یا FCL همانند روش احتراق پسرو است، ولی با این تفاوت که در این روش جهت جریان هوا و انتشار جبهه‌ی احتراق در یک راستا هستند. در احتراق پیشرو گازهای داغ با فشار زیاد به درون لایه تزریق و متراکم شده که این عمل باعث تبدیل زغال‌سنگ به گاز می‌شود. گازهای تولید شده از بین حفرات درون زغال‌سنگ به طرف چاه تولید هدایت می‌شوند (Hartman, 1996).

معمولاً روش احتراق پیشرو برای لایه‌های زغال‌سنگ تا عمق ۳۰۰ متر مناسب است. در اعماق زیادتر، به دلیل کاهش نفوذپذیری، فشار مورد نیاز راکتور باید بیشتر باشد که این امر ممکن است باعث خودسوزی زغال‌سنگ و ایجاد ارتباط ناقص می‌شود (Ray et al., 2010). برای اتصال چاه‌ها به روش

FCL، زمان نسبتاً زیادی نیاز است (Blinderman *et al.*, 2008).

اگر هوا با دبی ۲۰۰۰ مترمکعب بر ساعت در شرایط متعارفی تزریق شود، زمان مورد نیاز برای اتصال دو چاه به فاصله‌ی ۳۰ متر و لایه با ضخامت ۲ متر، تقریباً ۱۱۸ روز برآورد می‌شود که برای عملیات UCG طولانی است (Blinderman *et al.*, 2008).

۲-۵-۱-۳- مقایسه‌ی روش احتراق پیشرو و پسرو

تفاوت‌های دو روش احتراق پیشرو و پسرو عبارتند از (Blinderman and Klimenko, 2007):

- در روش پیشرو اکسیدان بیشتری در واحد طول چاه مصرف می‌شود.
- حرارت احتراق در روش پیشرو به دلیل اثر سوپرآدیاباتیک خیلی بیشتر از روش پسرو است.
- سرعت احتراق و بازیابی در روش پیشرو نسبت به روش پسرو کمتر است.
- مهم‌ترین عیب روش پیشرو، انسداد حفرات درون لایه‌ی زغال‌سنگ در اثر گاز چگالیده است که باعث کاهش نفوذپذیری می‌شود.
- مهم‌ترین تفاوت این دو روش این است که در روش احتراق پسرو، معمولاً یک گالری باریک با قطر ثابت و در روش احتراق پیشرو، معمولاً یک گالری پهن‌تر ایجاد می‌شود (Yang *et al.*, 2007).

۲-۵-۲- شیوه‌ی اتصال چاه‌ها با استفاده از روش حفاری جهت‌دار

برای نخستین بار در سال ۱۹۴۰ م. در اتحاد جماهیر شوروی سابق با برگرفتن از حفاری چاه‌های نفت، از روش حفاری جهت‌دار به عنوان ابزاری برای حل دشواری‌های روش RCL، اتصال کامل‌تر و کنترل

شده چاه‌های تزریق و تولید در کارگاه UCG در کوهل موگورسک^۱ استفاده شد (Hartman, 1996). نخستین آزمایش آب‌شکافت در فرانسه از سال ۱۹۸۰ تا ۱۹۸۱ م. در لایه‌ی زغال‌سنگ با ضخامت ۱/۲ متر و عمق ۱۱۷۰ متر به دلیل اتصال ضعیف بین چاه‌ها با شکست مواجه شد. به دلیل عمق زیاد مجبور به استفاده از روش RCL با فشار زیاد شد؛ که نتیجه آن خودسوزی لایه‌ی زغال‌سنگ و ناموفق بودن روش بود. همچنین روش RCL در کارگاه‌های آزمایشی در زولین^۲ بلژیک در سال ۱۹۸۲ م. ناموفق بود (Shafirovich and Varma, 2009). به همین دلیل، آزمایش‌های صحرایی روش حفاری جهت‌دار در اروپا، نخست در زولین بلژیک و سپس در ال‌ترمدال^۳ اسپانیا انجام شده و امکان استفاده از آن در کارگاه‌های UCG عمیق به اثبات رسید (Chai, 2004).

از مزایای این روش می‌توان به حفر چاه افقی با طول بیش از ۶۰۰ متر در کف لایه‌ی زغال‌سنگ با عمق بیش از ۱۰۰۰ متر، مستقل از هندسه‌ی لایه و افزایش سرعت حفاری نسبت به روش RCL اشاره کرد. قسمتی از چاه که درون لایه‌ی زغال‌سنگ قرار دارد، نخستین راکتور گاز کردن است (Hartman, 1996). برای حفاری از موتورهای هدایت شونده درون چاهی^۴ استفاده می‌شود (DTI, 2005). در این نوع حفاری نیاز به پیشروی سر مته در کف لایه‌ی زغال‌سنگ به طور هدایت شونده است. سر مته ممکن است به طرف بالا یا پایین درون لایه منحرف شود. بنابراین حفاری روی یک مسیر خطی در لایه‌ی زغال‌سنگ با مشکلات فنی مواجه است.

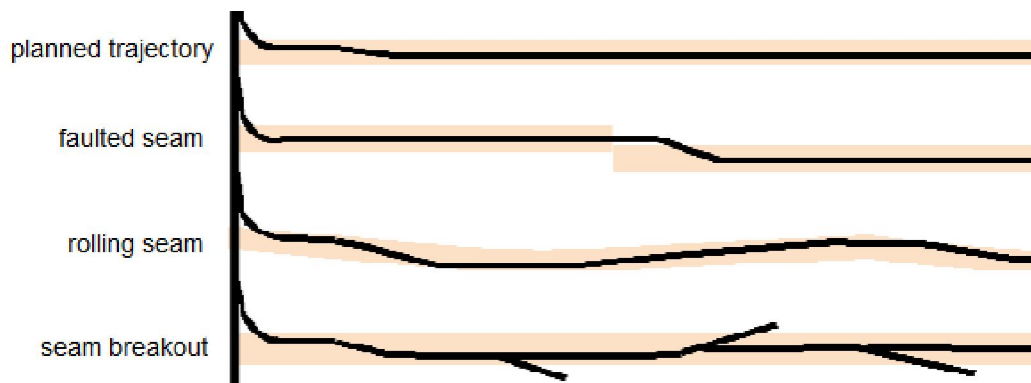
همان طور که در شکل ۲-۹ دیده می‌شود، فصل مشترک لایه‌ی زغال‌سنگ و کمر بالا و پایین لایه‌ی زغال‌سنگ ممکن است نامنظم باشد. زمانی که شرایط لایه‌ی زغال‌سنگ و لایه‌های در برگیرنده به صورت قابل توجه تغییر کند؛ حفاری با مشکلات فنی مواجه می‌شود (Couch, 2009).

^۱ - Kohlmogorsk

^۲ - Thulin

^۳ - El Tremedal

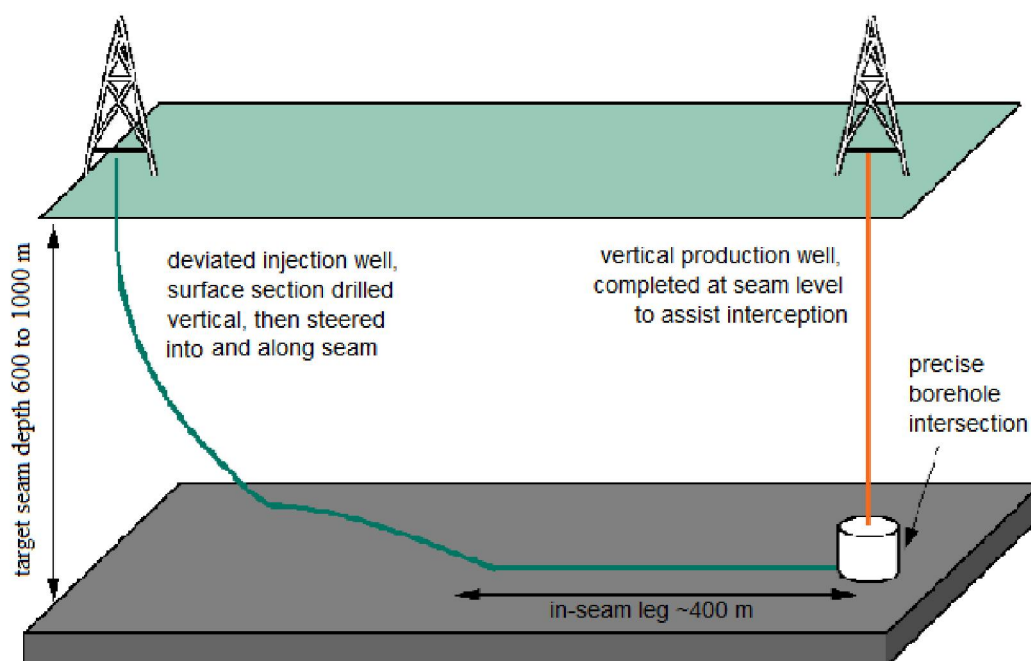
^۴ - Down The Hole (DHM)



شکل ۲-۹: خط مسیر چاه افقی درون لایه‌ی زغال‌سنگ (Couch, 2009).

۲-۵-۱- حفاری جهت‌دار با یک ترانشه^۱

همان طور که در شکل ۲-۱۰ دیده می‌شود اساس این روش، حفر یک ترانشه درون لایه‌ی زغال‌سنگ است. این ترانشه از سمت چاه تزریق به طرف چاه تولید و در کف لایه‌ی زغال‌سنگ حفر می‌شود (DTI, 2005).

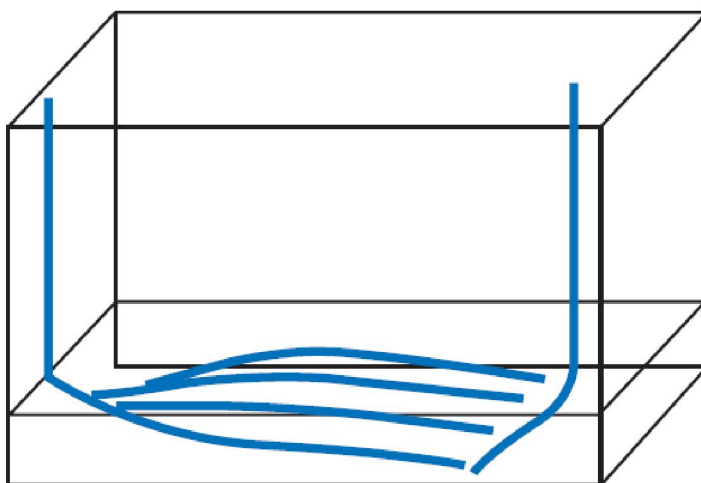


شکل ۲-۱۰: حفاری جهت‌دار با یک ترانشه در لایه‌ی زغال‌سنگ (Couch, 2009).

^۱ - Single Channel Drilling

۲-۵-۲- حفاری جهت‌دار با چند ترانشه^۱

در شکل ۲-۱۱، حفاری جهت‌دار با چند ترانشه در لایه‌ی زغال‌سنگ نشان داده شده است. افزایش مقیاس حفاری چاه‌های تولید از تک ترانشه به چند ترانشه تجاری، مستلزم حفاری سنگین‌تری است. همزمان از چندین چاه (۲۰ چاه برای کارخانه ۳۰۰ مگاواتی) بهره‌برداری می‌شود (DTI, 2005).



شکل ۲-۱۱: حفاری جهت‌دار با چند ترانشه (DTI, 2005).

۲-۶- روش‌های مختلف گاز کردن زیرزمینی زغال‌سنگ

روش‌های مختلفی برای گاز کردن زیرزمینی زغال‌سنگ (UCG) وجود دارد. این روش‌ها شامل روش اتاقی^۲، روش گمانه‌ای^۳، روش Long-tunnel, Large-section, Two-stage (تونلی)، روش گالری شیب‌دار^۴، روش چاه قائم^۵ (روسی) و روش منبع احتراق قابل کنترل به کمک لوله‌ی مغزی سیار^۶ (CRIP) هستند.

^۱ - Multi-Channel Drilling

^۲ - Chamber Method

^۳ - Borehole Method

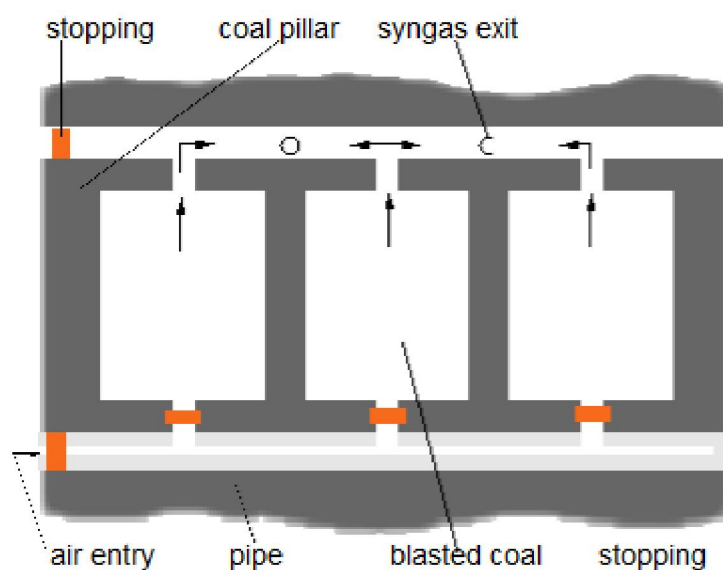
^۴ - Steeply Dipping Method

^۵ - Vertical Well Method (Soviet Method)

^۶ - CRIP: Controlled Retraction Injection Point Method

۲-۶-۱- روش اتاقی

روش اتاقی برای نخستین بار در اتحاد جماهیر شوروی سابق مورد استفاده قرار گرفت. همان طور که در شکل ۲-۱۲ دیده می‌شود؛ لایه‌ی زغال‌سنگ به چند پهنه تقسیم می‌شود. بین پهنه‌ها، فضای کارگاه و در دو سمت آن تونل تزریق و تولید حفر شده و چال‌هایی از تونل اصلی حفر می‌شوند که نقش میان‌برها را ایفا می‌کنند. هوای داغ از تونل اصلی یا تونل تزریق هوا به درون این چال‌ها تزریق شده و از آنجا به بخش‌های مختلف کارگاه جریان پیدا می‌کند. پس از تبدیل زغال‌سنگ به گاز، گاز تولید شده از طریق تونل تولید به مخازن از پیش تعیین شده هدایت می‌شوند (Couch, 2009).



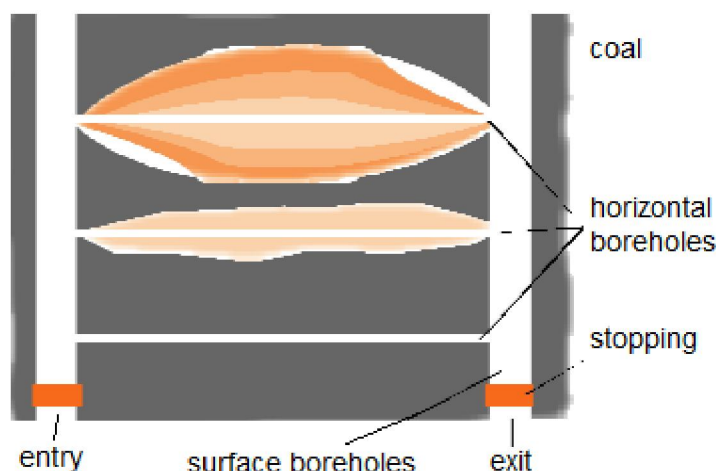
شکل ۲-۱۲: روش استخراج اتاقی (Couch, 2009).

۲-۶-۲- روش گمانه‌ای

نتایج عملی روش اتاقی نشان داد که به دلیل بزرگ بودن قطعات زغال‌سنگ و فعل و انفعالات ضعیف، گازهای تولید شده عمدتاً از نوع گازهای هیدروکربنی با ارزش حرارتی کم بوده و ارزش حرارتی آن‌ها بین ۱۴۵ تا ۲۰۰ واحد حرارت بریتانیایی در هر فوت مکعب گاز متغیر است. مطالعات بعدی موجب

ابداع روش گمانه‌ای شد (Hartman, 1996).

در این روش، نخست لایه‌ی زغال‌سنگ به پهنه‌هایی با قطعات کوچک‌تر تقسیم می‌شود. همانند روش اتاقی، دو تونل برای تزریق هوا و تولید گاز حفر می‌شوند. از هر تونل به تونل دیگر گمانه‌هایی حفر شده و با تزریق هوا، زغال‌سنگ بین آن‌ها تبدیل به گاز می‌شود (Couch, 2009). شکل ۲-۱۳ نمونه‌ای از کارگاه استخراج UCG به روش گمانه‌ای را نشان می‌دهد.

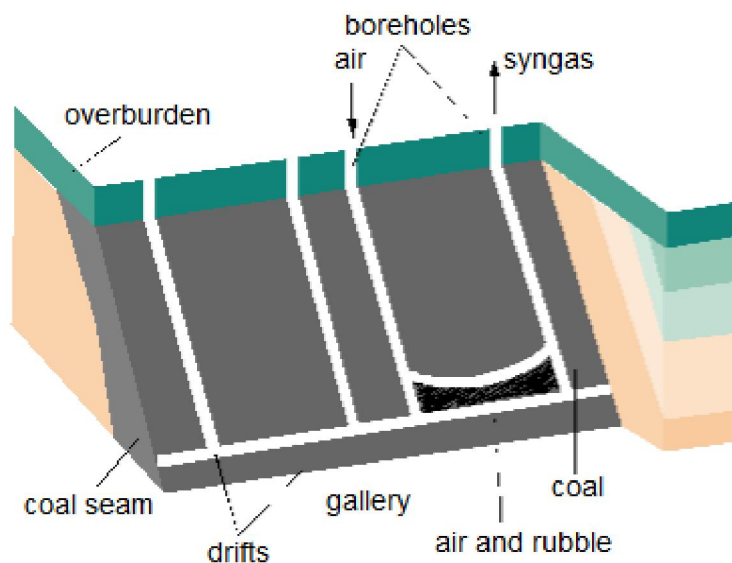


شکل ۲-۱۳: روش گمانه‌ای (Couch, 2009).

۲-۶-۳- روش گالری شیب‌دار

این روش برای مواردی که لایه‌ی زغال‌سنگ به صورت شیب‌دار و رو به پایین قرار گرفته است، به کار می‌رود. با توجه به شکل ۲-۱۴، در این روش یک سری گمانه در امتداد شیب لایه حفر شده و همگی به چاه‌های افقی که در قسمت پایینی لایه شیب‌دار حفر شده‌اند، متصل می‌شوند. سپس هوای گرم از چاه تزریق جریان یافته و از چاه تولید گازهای تولید شده، خارج می‌شوند. هنگامی که زغال‌سنگ بالای چاه‌های افقی تحت تأثیر هوای تزریق شده قرار گیرند، به گاز تبدیل شده و قسمت‌های بالایی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. جبهه‌ی احتراق به سمت بالای کارگاه استخراج

پیشروی می‌کند. سپس قطعات زغال‌سنگ بالایی به درون راکتور سقوط کرده و تبدیل به گاز می‌شوند (Hartman, 1996). این روش در لایه‌ی زغال‌سنگ با شیب بیش از ۵۰ درجه در اتحاد جماهیر شوروی سابق اجرا شده (Couch, 2009).



شکل ۲-۱۴: روش گالری شیب‌دار (Couch, 2009).

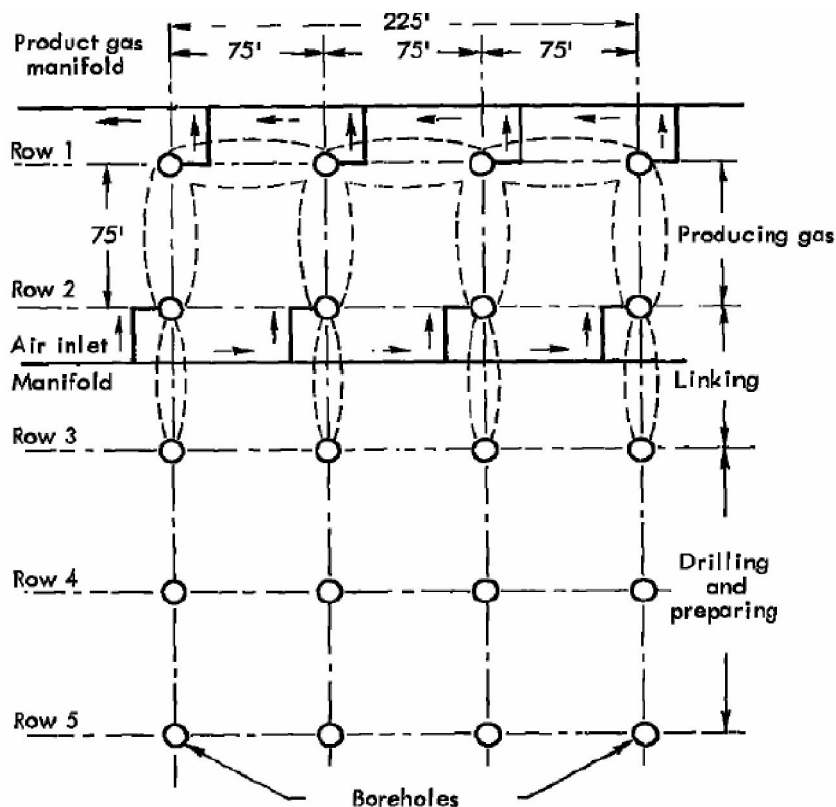
۲-۶-۴- روش چاه قائم

روش چاه قائم برای لایه‌های زغال‌سنگ با عمق کمتر از ۳۰۰ متر کاربرد دارد. چاه‌هایی در شبکه‌ای با فاصله‌های منظم در این روش حفر می‌شوند (Carbon Energy Report, 2009). شکل ۲-۱۵ پلانی از روش چاه قائم در لایه‌ای افقی را نشان می‌دهد. خط‌چین‌ها مسیر اتصال زیرزمینی را نشان می‌دهند که مرحله به مرحله با استفاده از روش احتراق پسرو حفر شده است (Burton et al., 2007). مراحل انجام فرآیند گاز کردن زیرزمینی در این روش به صورت زیر است.

(الف) گاز کردن: بین ردیف‌های اول و دوم؛

(ب) اتصال: بین ردیف‌های دوم و سوم؛

(ج) حفاری و تکمیل چاه‌ها: بین ردیف‌های بعدی.



شکل ۲-۱۵: روش چاه قائم یا روسی (Burton et al., 2007).

روش چاه قائم در اتحاد جماهیر شوروی سابق و استرالیا برای لایه‌های زغال‌سنگ با عمق کم،

استفاده شده است. این روش در مقیاس بزرگ تا ۲۰۰ مگاوات اجرا می‌شود (Khadse et al., 2007).

نوع دیگری از این فن‌آوری، روش εUCG است که توسط شرکت Ergo Energy ارائه شده است.

در این روش از مجراهای طبیعی درون لایه‌ی زغال‌سنگ یا در صورت لزوم از روش احتراق پسرو برای

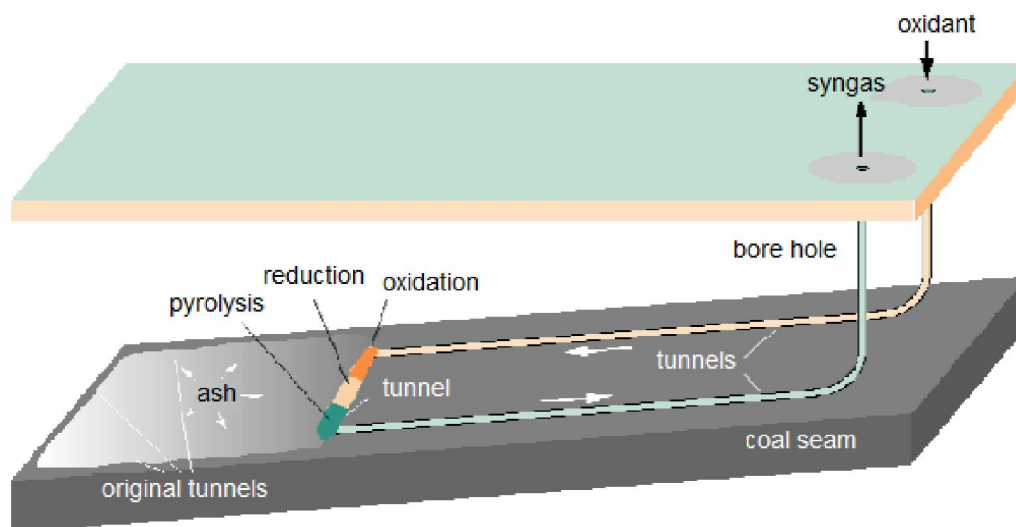
اتصال بین چاه‌ها استفاده می‌شود (Shedden Uhde Australia, 2009).

۲-۶-۵- روش تونلی

این روش برای نخستین بار توسط پرفسور لی^۱ با الگوبرداری از روش چاه قائم ارائه شد و هم اکنون

^۱ - Li

در کشور چین اجرا می‌شود. از تونل‌های معادن زغال‌سنگ زیرزمینی متروکه به عنوان راکتورهای UCG استفاده می‌شود (Chai, 2004). این روش استخراج، همانند روش استخراج جبهه‌کار طولانی است؛ ولی با این تفاوت که در انتهای تونل‌های معدنی، باید گمانه‌های تزریق و تولید حفر شوند (Li et al., 2007). شکل ۱۶-۲ روش استخراج تونلی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶-۲: روش استخراج تونلی (Couch, 2009).

راکتور UCG شامل یک تونل معدن زغال‌سنگ متروکه با طول تقریباً ۲۰۰ متر و سطح مقطع تقریباً ۳ تا ۴ متر است. فرآیند تزریق به این صورت است که نخست هوا با درجه حرارت زیاد برای گرم کردن راکتور تزریق شده و به دنبال آن گاز اکسیژن برای گاز کردن زغال‌سنگ داغ شده، تزریق می‌شود (Chai, 2004).

در لایه‌های کم عمق و نزدیک فشار جو، برای تولید گاز با ارزش حرارتی کم (۳/۵ تا ۵ مگاژول بر مترمکعب) کاربرد دارد. گازهای تولید شده اکثراً در مصارف شهری (گرمایش و پخت و پز) استفاده می‌شوند (Irwin et al., 2009).

۲-۶-۶- روش منبع احتراق قابل کنترل به کمک لوله‌ی مغزی سیار

در لایه‌های زغال‌سنگ با عمق کمتر از ۳۰۰ متر، نیاز به چاه‌های قائم ساده و یک دمنده اکسیدان برای گاز کردن است (Praski *et al.*, 2004). ولی در لایه‌های زغال‌سنگ عمیق‌تر نیاز به حفاری جهت‌دار و یک نقطه‌ی تزریق سیار در طول چاه‌ها برای کنترل فرآیند گاز کردن احساس می‌شود. برای نخستین بار در سال ۱۹۸۱ م، روش CRIP توسط LLNL پیشنهاد شده و در کارگاه استخراج راک‌ی مونتین و سپس در کارگاه‌های آل‌ترمیدال و زولین مورد استفاده قرار گرفت (Burton *et al.*, 2007).

گاز تولید شده در روش CRIP در مقایسه با روش‌های دیگر کیفیت بهتری داشته و بازده کلی فرآیند بیشتر است (Nourozieh *et al.*, 2010B). ولی در روش CRIP ترکیب گاز در هر مرحله متغیر است (SSL, 2009).

فاصله‌ی بین چاه‌ها تا بیش از ۶۰۰ متر می‌تواند باشد. بنابراین با افزایش فاصله‌ی بین چاه‌ها، تعداد چاه‌های حفر شده کاهش یافته و به دنبال آن هزینه‌های حفاری به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد (Harkins, 2011). هنگام استفاده از روش CRIP، تکرار فرآیند گاز کردن با تغییر مکان نقطه‌ی تزریق اکسیدان‌ها به راحتی صورت می‌گیرد (LincEnergy Report, 2012B).

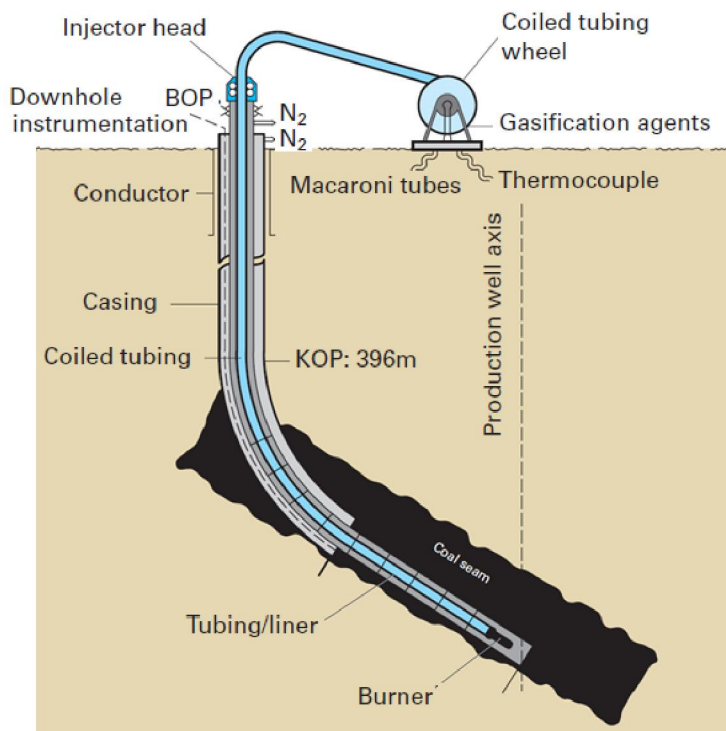
چاه تزریق، با روش آستری مشبک شده^۱ تکمیل شده و منبع احتراق به کمک لوله‌ی مغزی^۲ سیار به درون چاه رانده می‌شود. یکی از ویژگی‌های برجسته‌ی این روش، قابل کنترل بودن موقعیت نقطه‌ی تزریق به کمک لوله‌ی مغزی است. در واقع اکسیدان از طریق این نقطه به درون راکتور تزریق می‌شود. در این روش، یک لوله‌ی جدار فلزی، درون لوله‌ی جداری چاه و قسمتی از چاه که بدون جدار است، تعبیه شده می‌شود. یک مشعل^۳ متصل به لوله‌ی مغزی به درون لوله‌ی جدار فلزی رانده شده و با کمی فاصله از قسمت انتهای جدار فلزی قرار می‌گیرد (Dennis, 2006). شکل ۲-۱۷ سیستم تزریق به کمک لوله‌ی

^۱ - Casing

^۳ - Burner

^۲ - Coiled Tubing (CT)

مغزی سیار در روش CRIP را نشان می‌دهد.

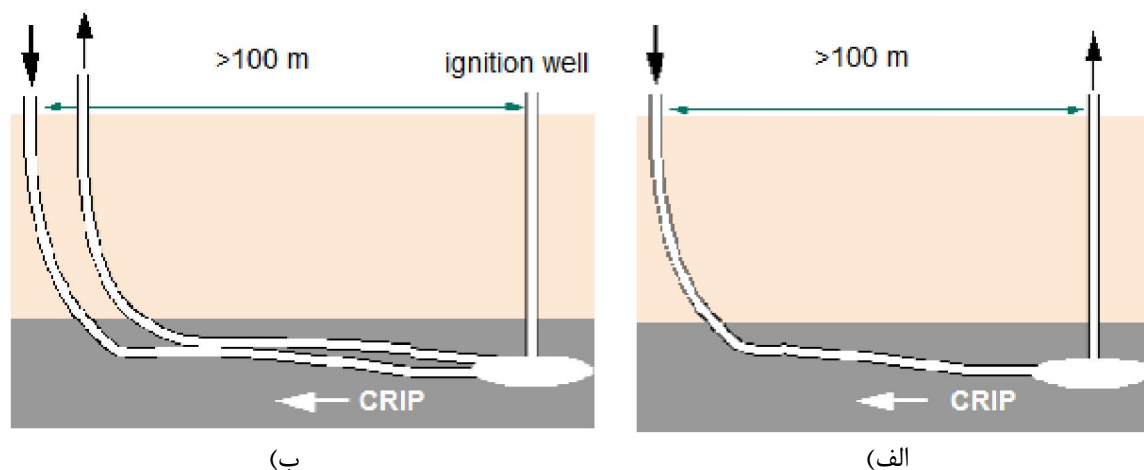


شکل ۲-۱۷: سیستم تزریق به کمک لوله‌ی مغزی سیار در روش CRIP (DTI, 2005).

هنگام گاز کردن، مخلوط اکسیژن و بخار آب، به نسبت‌های یک به یک تا سه به یک، به درون راکتور تزریق می‌شود. همراه با تزریق اکسیدان، ترکیب‌های آتش‌زای بوران تری- اتیل^۱ برای مشتعل کردن مشعل بر پایه متان یا پروپان در انتهای لوله‌ی مغزی تزریق می‌شود. گاز کردن آغاز شده و تا افت ارزش حرارتی گاز سنتزی ادامه می‌یابد. هنگامی که بازده راکتور کاهش یافت، لوله‌ی مغزی بر روی طبلیک تعبیه شده روی سطح زمین جمع شده و مشعل متصل به لوله‌ی مغزی سیار به بیرون از ناحیه‌ی نشست (زغال سنگ جامد و دست نخورده) که قبلاً تعیین شده است، انتقال می‌یابد. گاز سنتزی تولید شده، برای پالایش و فرآوری به سطح زمین منتقل می‌شود (Dennis, 2006).

^۱ - Tri-Ethyl-Borane

دو روش CRIP خطی^۱ و CRIP موازی^۲ برای گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ با استفاده از روش CRIP وجود دارد (Couch, 2009). این دو روش در شکل ۱۸-۲ دیده می‌شوند.



شکل ۱۸-۲: روش CRIP: (الف) خطی (ب) موازی (Couch, 2009).

۲-۶-۶-۱- روش CRIP خطی

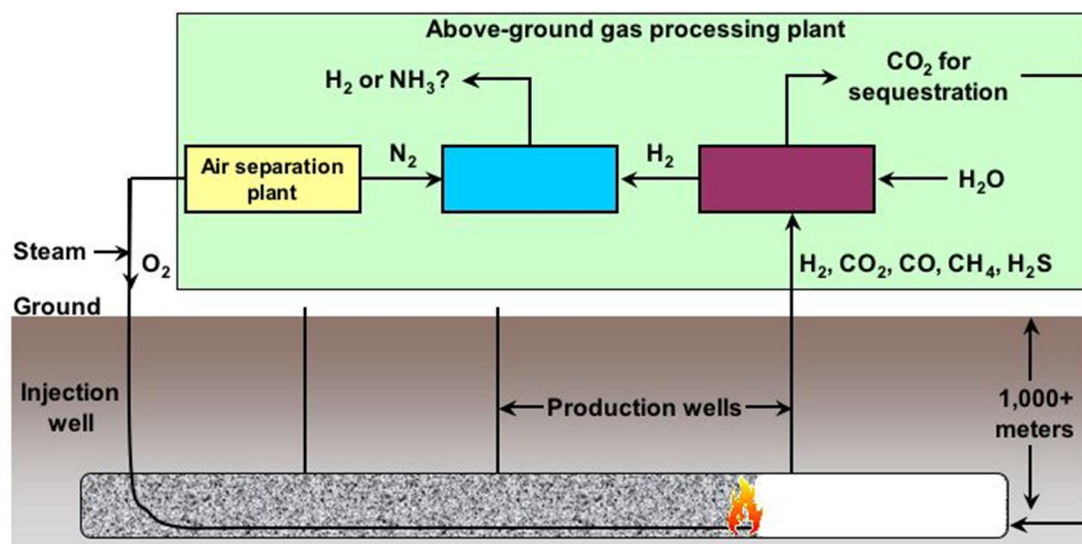
در روش CRIP خطی نخست یک چاه با استفاده از روش حفاری جهت‌دار حفر می‌شود. این چاه در کف لایه‌ی زغال سنگ و به طول زیاد تا ۶۰۰ متر حفر می‌شود (Harkins, 2011). سپس چاه قائمی از سطح زمین حفر می‌شود که انتهای چاه جهت‌دار را قطع می‌کند. چاه تزریق برای انتقال اکسیدان به درون راکتور، همان چاه حفر شده با حفاری جهت‌دار است؛ در حالی که چاه تولید به صورت قائم حفر شده و به چاه افقی وصل می‌شود (Couch, 2009).

با آغاز گاز کردن زغال سنگ در هر نقطه‌ی تزریق، راکتور UCG به شکل یک گلابی گسترش یافته و راکتور با ارتفاع ضخامت لایه‌ی زغال سنگ و طولی به اندازه‌ی فاصله‌ی نقاط گاز کردن ایجاد می‌شود. عرض راکتور بستگی به عملکرد آن دارد. یعنی با کاهش عملکرد، راکتور گاز کردن در آن نقطه‌ی متوقف

^۱ - Liner CRIP Method

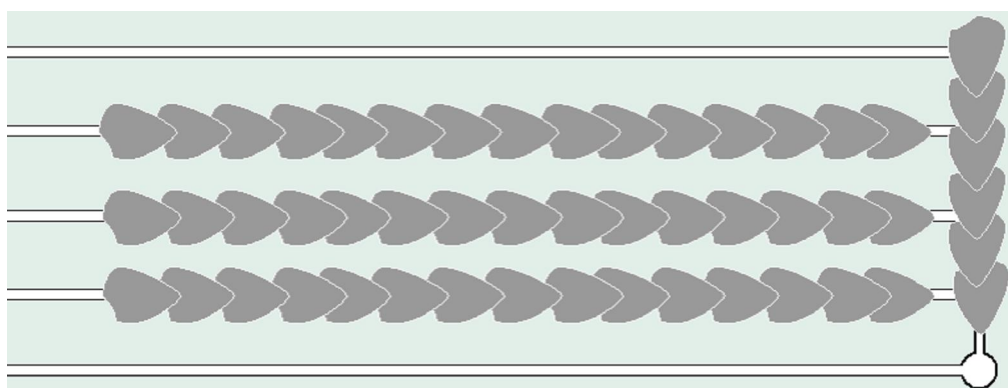
^۲ - Parallel CRIP Method

شده و نقطه‌ی تزریق به نقطه‌ی تازه دیگری انتقال می‌یابد (Burton *et al.*, 2007). روش CRIP در شکل ۱۹-۲ دیده می‌شود.



شکل ۱۹-۲: روش استخراج CRIP (Burton *et al.*, 2007)

همان طور که در شکل ۲۰-۲ مشاهده می‌شود برای بهره‌برداری در مقیاس تجاری، باید چاه‌های هم‌راستا با استفاده از روش حفاری جهت‌دار حفر شوند. برای جلوگیری از تأثیر کارگاه‌های مجاور بر هم، پایه‌ای از زغال‌سنگ بین کارگاه‌ها باقی گذاشته می‌شود (Couch, 2009).



شکل ۲۰-۲: ترانشه‌های چندگانه راکتور CRIP خطی برای گاز کردن در مقیاس تجاری (Couch, 2009).

با توجه به تجربه کسب شده در پایش‌های میدانی، برای تولید ۱/۵ تا ۲ مگاوات برق، باید اکسیژن با دبی ۱۰۰ مترمکعب بر ساعت (۱۴۳ کیلوگرم بر ساعت) در شرایط متعارفی (STP) تزریق شود. از تزریق هر کیلوگرم اکسیژن، ۲ تا ۳ کیلوگرم زغال‌سنگ تبدیل به گاز می‌شود. نسبت مخلوط بخار آب به اکسیژن، بستگی به میزان رطوبت لایه‌ی زغال‌سنگ و طبقات در برگیرنده داشته و این میزان از ۲ تا ۳ تغییر می‌کند (Stealth Ventures Ltd, 2011).

در عمل، این فرآیند بسیار پیچیده است، زیرا با گاز کردن، حجم و شکل هندسی راکتور در حال واکنش تغییر می‌کند. در آغاز گاز کردن، راکتور کوچک بوده و کاملاً درون لایه‌ی زغال‌سنگ است، ولی در پایان با نشست جزئی سقف، راکتور با قطعات خورد شده سنگ پر می‌شود. این پدیده ممکن است منجر به تغییر الگوی جریان و تغییر شکل هندسی راکتور شود.

۲-۶-۶-۲- روش CRIP موازی

در حالی که روش حفاری جهت‌دار همراه با روش CRIP برای لایه‌های عمیق‌تر مناسب هستند، به دلیل کاهش تعداد چاه‌های حفر شده در روش CRIP موازی، هزینه‌ی حفاری به مقدار زیادی کاهش می‌یابد (Carbon Energy Report, 2009). تنها روش مناسب در مقیاس صنعتی برای گاز کردن لایه‌های عمیق زغال‌سنگ، روش CRIP موازی است (Kempka et al., 2009).

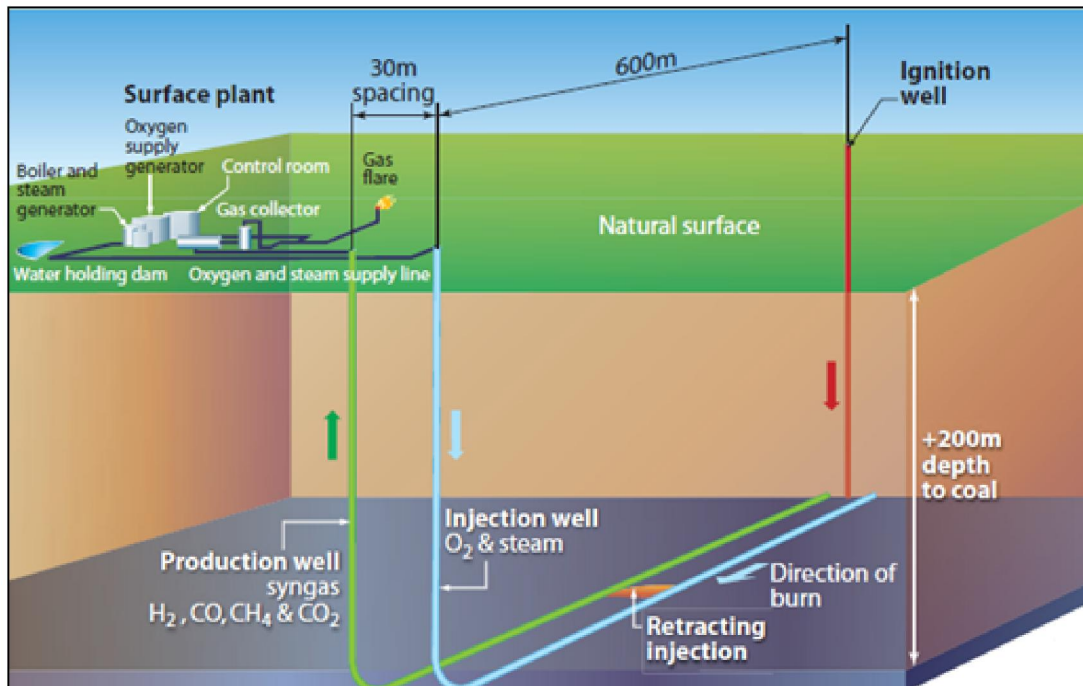
در روش CRIP موازی، دو چاه هم‌راستا در کف لایه‌ی زغال‌سنگ به طول ۱۰۰ تا ۷۰۰ متر حفر می‌شود، سپس انتهای آن‌ها به هم وصل می‌شود. جایی که چاه‌ها به هم متصل می‌شوند، یک چاه قائم به نام چاه افروزش^۱ برای تسهیل آغاز فرآیند UCG حفر می‌شود. یکی از چاه‌های افقی به عنوان چاه تزریق و دیگری به عنوان چاه تولید است. فاصله‌ی بین چاه‌های افقی ۲۰ تا ۳۰ متر است

^۱ - Ignition Well

(Couch, 2009).

در نوع CRIP موازی، مشعل به صورت پسر و حرکت کرده و اکسیدان به صورت پیوسته و یکنواخت به درون راکتور تزریق می‌شود. این روش نسبت به نوع خطی دارای هزینه‌ی آماده‌سازی اولیه بیشتری است؛ ولی هزینه‌های جاری کمتری داشته و نیز بازده آن بیشتر است (Couch, 2009).

شکل ۲-۲۱ یکی از پیشرفته‌ترین کارخانه‌های نیمه‌تجاری بر مبنای روش CRIP موازی در بلادوود کریک^۱ استرالیا را نشان می‌دهد (Couch, 2009). در این کارگاه نخست دو چاه عمودی با فاصله‌ی ۳۰ متر حفر شده است. سپس این دو چاه در کف لایه‌ی زغال‌سنگ با استفاده از حفاری جهت‌دار به طول ۶۰۰ متر پیشروی کرده و در انتها متصل می‌شوند. چاه افروزش از سطح زمین به صورت قائم تا محل اتصال دو چاه تزریق و تولید حفر می‌شود.



شکل ۲-۲۱: کارخانه‌ی نیمه‌تجاری UCG از نوع CRIP موازی در بلادوود کریک استرالیا (Fergusson, 2009).

^۱ - Bloodwood Creek

برای گاز کردن، مخازن آب، اکسیژن و متان مورد نیاز است. بخار آب و اکسیژن در سطح زمین در محفظه‌ای مخلوط شده و به درون راکتور تزریق می‌شوند (Dennis, 2006). از چاه افروزش، گاز متان برای آغاز فرآیند گاز کردن تزریق شده و گاز کردن آغاز می‌شود. زغال‌سنگ بین چاه‌ها تبدیل به گاز شده و جبهه‌ی احتراق به سمت چاه تزریق گسترش می‌یابد. گاز کردن تا گاز شدن کامل بلوک زغال‌سنگ بین دو چاه ادامه می‌یابد (Fergusson, 2009).

۷-۲- جمع‌بندی

در این فصل، نخست به بررسی مطالعات مورد نیاز برای انتخاب محل مناسب کارگاه‌های استخراج UCG و تعیین معیارها و محدودیت‌های انتخاب کارگاه‌ها استخراج پرداخته شده است. همچنین روش‌های مختلف اتصال چاه‌های تزریق و تولید، مانند روش‌های احتراقی و حفاری جهت‌دار تشریح شده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده استنتاج می‌شود که می‌توان از روش‌های احتراقی برای اتصال چاه‌های کم عمق (تا ۳۰۰ متر) و روش حفاری جهت‌دار برای اتصال چاه‌ها در اعماق زیاد (بیش از ۳۰۰ متر) و حتی در اعماق کم استفاده کرد. در پایان، روش‌های مختلف گاز کردن زیرزمینی زغال‌سنگ مانند اتاقی، گمانه‌ای، گالری شیب‌دار، تونلی، چاه قائم و منبع احتراق قابل کنترل به کمک لوله‌ی مغزی سیار (CRIP) مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

متداول‌ترین روش برای گاز کردن در اعماق کم، روش چاه قائم و در اعماق زیاد، روش CRIP است. روش CRIP به دو دسته خطی و موازی تقسیم‌بندی می‌شود که نوع موازی در مقیاس صنعتی متداول‌تر است. روش‌های حفاری جهت‌دار و CRIP، دارای هزینه‌های زیادی هستند؛ به همین علت از مخلوط اکسیژن و بخار آب (با نسبت‌های کنترل شده) به عنوان اکسیدان، همراه با چاشنی‌های قابل احتراق، مانند گاز متان برای تزریق درون راکتور برای تولید گاز سنتزی با ارزش حرارتی بیشتر استفاده می‌شود.

فصل سوم:

سینتیک واکنش های شیمیایی در فرآیند UCG

۳-۱- مقدمه

ساختار شیمیایی زغال‌سنگ بسیار پیچیده بوده و شامل ترکیب‌های گوناگون آلی و غیرآلی است. ترکیب‌های آلی زغال‌سنگ معمولاً واکنش‌پذیر هستند. زغال‌سنگ در حضور اکسیژن داغ، واکنش داده و به ترکیب‌های قابل احتراق تبدیل می‌شود. در روش استخراج UCG، زغال‌سنگ درجا در زیرزمین با تزریق هوا، و یا مخلوط اکسیژن بخارآب به درون لایه‌ی زغال‌سنگ از طریق چاه تزریق تبدیل به گاز می‌شود. گازهای تولید شده داغ و پر انرژی از طریق چاه تولید بیرون کشیده می‌شوند.

با تزریق اکسیدان به درون لایه‌ی زغال‌سنگ، نخست راکتوری در درون لایه‌ی زغال‌سنگ به وجود آمده و با تداوم تزریق، راکتور گسترش می‌یابد. به دلیل ایجاد تنش‌های حرارتی ناشی از واکنش‌های شیمیایی و ناپایداری راکتور، ممکن است سقف راکتور ریزش کرده و بر عملکرد آن تأثیر بگذارد.

در این فصل، نخست به بررسی عوامل مؤثر بر انجام واکنش‌های شیمیایی درون راکتور UCG، مانند نوع اکسیدان‌ها، دما و فشار اکسیدان‌ها، تراوش آب و نیز دیگر شرایط لایه‌ی زغال‌سنگ و لایه‌های در برگیرنده پرداخته خواهد شد. تغییر این عوامل بر ترکیب شیمیایی گاز سنتزی تولید شده اثر می‌گذارد. در پایان به عنوان نمونه، به ترکیب شیمیایی و ارزش حرارتی گاز سنتزی حاصل از فرآیند UCG در چند کارگاه استخراج اشاره خواهد شد.

۳-۲- فرآیند گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ

گاز کردن به فرآیندهای شیمیایی سوخت‌های جامد و مایع با اکسیدان‌هایی مانند هوا، اکسیژن و بخار آب در درجه حرارت و فشار زیاد و تبدیل آن‌ها به محصولات گازی قابل استفاده در تولید برق و کاربرد در صنایع شیمیایی گفته می‌شود (Higman and Burgt, 2003). گاز کردن زغال سنگ به دو دسته، سطحی و زیرزمینی تقسیم‌بندی می‌شود. در گاز کردن سطحی، زغال سنگ استخراج شده با استفاده از روش‌های سنتی در راکتورهای سطحی تبدیل به گاز می‌شود. ولی در نوع زیرزمینی یا UCG، زغال سنگ درجا تبدیل به گاز می‌شود. واکنش‌های شیمیایی اساسی گاز کردن سطحی و زیرزمینی همانند هم بوده و ترکیب شیمیایی گاز سنتزی نیز شباهت زیادی دارند (Creedy *et al.*, 2001).

زغال سنگ در حضور اکسیژن واکنش کامل داده و گاز دی‌اکسیدکربن تولید می‌شود که به آن واکنش سوختن زغال سنگ گفته می‌شود. ولی گاز کردن متفاوت از سوختن است، زیرا واکنش در محیطی با اکسیژن محدود انجام شده و گازهای پیرانرژی مانند متان، هیدروژن و مونواکسیدکربن تولید می‌شود (Shedden Uhde Australia, 2009).

۳-۳- واکنش‌های شیمیایی اساسی در روش UCG

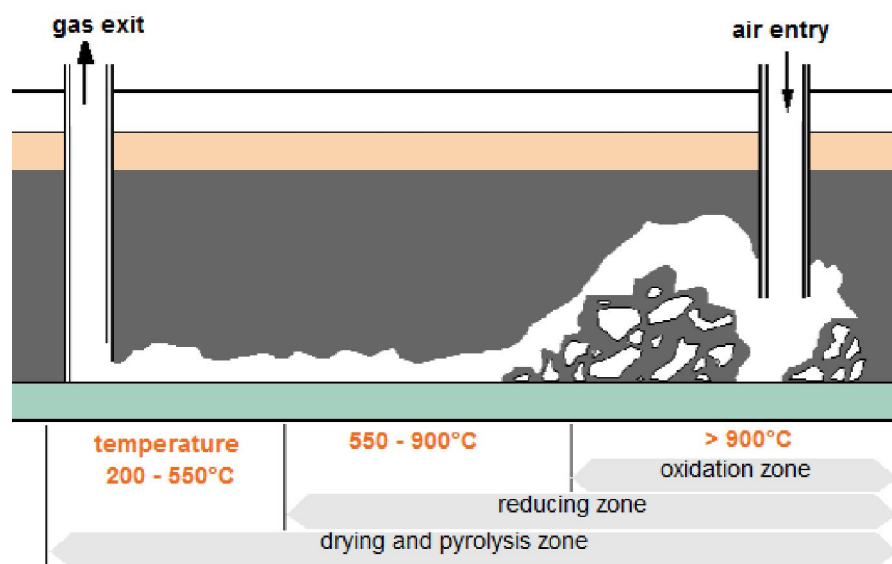
راکتور UCG، یک کاواک تجزیه حرارتی زغال سنگ در زیرزمین است. در درون این راکتور سه ناحیه حرارتی یا سه سری فرآیندهای وابسته به هم شامل نواحی خشک‌کن^۱، تفکافت^۲ (تجزیه شدن در اثر حرارت) و گاز کردن (شامل نواحی اکسیداسیون^۳ یا اکسایش و کاهش^۴ یا احیا) به وجود می‌آید. شکل ۳-۱ واکنش‌های شیمیایی اساسی در راکتور UCG و تغییرات دما در طول راکتور را نشان می‌دهد.

^۱ - Drying Zone

^۲ - Pyrolysis

^۳ - Oxidation Zone

^۴ - Reducing Zone



شکل ۳-۱: واکنش‌های شیمیایی اساسی در راکتور UCG و تغییرات دما در طول راکتور (Couch, 2009).

۳-۳-۱- ناحیه‌ی خشک‌کن و تفکافت زغال‌سنگ

خشک شدن زغال‌سنگ و فرآیند تفکافت یا تغییر شیمیایی زغال‌سنگ همزمان با آغاز تزریق اکسیدان‌ها یا همراه با دیگر واکنش‌ها در طول راکتور رخ می‌دهند. خشک شدن زغال‌سنگ از زمانی که درجه حرارت زغال‌سنگ به ۱۰۰ درجه افزایش می‌یابد، آغاز می‌شود. در فرآیند خشک شدن، رطوبت موجود در زغال‌سنگ به بخار آب تبدیل می‌شود (Nourozieh *et al.*, 2010A).

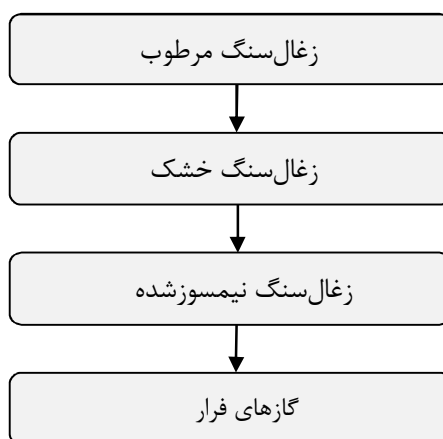
اگر زغال‌سنگ تا دمای بیش از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شود، فرآیند تفکافت زغال‌سنگ آغاز شده و ساختار شیمیایی زغال‌سنگ تغییر می‌کند. تفکافت زغال‌سنگ تقریباً تا دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد ادامه می‌یابد. بیشترین محصولات فرآیند تفکافت در دمای زیر ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد تولید می‌شود (GasTech, 2007).

در عمل تفکافت، زغال‌سنگ به زغال‌سنگ خشک، زغال‌سنگ خشک به زغال‌سنگ نیمسوزشده^۱ و زغال‌سنگ نیمسوزشده به گازهای فرار تبدیل می‌شود (Nourozieh *et al.*, 2010A). فرآیند نیمسوز شدن

^۱ - Char

از نزدیک چاه تزریق آغاز شده و به طرف چاه تولید گسترش می‌یابد (GasTech, 2007).

در روش UCG، فرآیند تفکافت زغال‌سنگ با تزریق اکسیدان به درون راکتور انجام شده و گازهایی شامل H_2 ، CO ، CO_2 ، H_2S ، N_2 و هیدروکربن‌های سبک با زنجیره کوتاه مانند CH_4 و C_2H_6 از پیکره‌ی^۱ زغال‌سنگ متخلخل آزاد می‌شود (Nourozieh *et al.*, 2010A). البته ترکیب‌های دیگری به صورت جزئی مانند ترکیب‌های نیتروژن و سولفور، آروماتیک‌ها، قطران، ترکیب‌های آلی فلزی و هیدروکربن‌های دیگر نیز تشکیل می‌شوند (Shedden Uhde Australia, 2009). شکل ۲-۳ روند تبدیل زغال‌سنگ مرطوب به گازهای فرار را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳: روند تبدیل زغال‌سنگ به گازهای فرار در فرآیند UCG (Shedden Uhde Australia, 2009).

۲-۳-۲- ناحیه‌ی گاز کردن زغال‌سنگ

فرآیند گاز کردن زمانی آغاز می‌شود که زغال‌سنگ به زغال‌سنگ نیم‌سوز تبدیل شده باشد. در فرآیند گاز کردن، زغال‌سنگ نیم‌سوز شده با اکسیژن و بخار آب واکنش داده و به گازهای دی‌اکسیدکربن، مونواکسیدکربن، هیدروژن، متان و بخار آب تبدیل می‌شود (Creedy *et al.*, 2001).

اکسیدان تزریق شده به دلیل داشتن گاز اکسیژن باعث گاز کردن زغال‌سنگ طی یک فرآیند

^۱ - Matrix

گرماده می‌شود. گازی‌های تولید شده‌ی پرانرژی، به طرف چاه تولید حرکت کرده و با عبور از ناحیه‌ی کاهش در غیاب اکسیژن به گازهای قابل احتراق در اثر برخی واکنش‌های شیمیایی دیگر تبدیل می‌شوند (GasTech, 2007).

۳-۲-۱- ناحیه‌ی اکسیداسیون

اکسیژن، برای آغاز واکنش مورد نیاز است. اگر واکنش آغاز شده و به یک حد بهینه برسد، مقداری از حرارت مورد نیاز برای واکنش‌های گرماگیر از واکنش‌های گرماده تأمین می‌شود. تزریق اندکی الکل آلیفاتیک مانند اتانول ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) همراه با اکسیدان برای تولید ترکیب‌های بسیار واکنش‌پذیری از هیدروژن برای گاز کردن زغال‌سنگ سودمند است (Sathaiah *et al.*, 2010).

زغال‌سنگ نیم‌سوزشده، یک ماده جامد پرکربن است که در واکنش‌های اکسیداسیون شرکت می‌کند. دما در ناحیه‌ی اکسیداسیون بیش از ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد است. واکنش‌های شیمیایی ناحیه‌ی اکسیداسیون شامل واکنش‌های زیر است (GasTech, 2007).



واکنش‌های ناحیه‌ی اکسیداسیون گرماده هستند و حرارت تولید شده در این ناحیه، در واکنش‌های گرماگیر ناحیه‌ی کاهش مصرف می‌شود. گازهای تولید شده، از این ناحیه عبور کرده و وارد ناحیه‌ی کاهش می‌شوند.

۳-۲-۲- ناحیه‌ی کاهش

در این ناحیه به دلیل دمای زیاد (۵۵۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد) راکتور UCG، گازهای تولید شده در ناحیه‌ی اکسیداسیون و تفکافت، تجزیه شده و با بخار آب و هیدروژن ناشی از تجزیه آب واکنش

می‌دهند. آب نقش مهمی در سراسر ناحیه‌ی واکنش زیرزمینی UCG ایفا می‌کند. آب عامل تولید هیدروژن در ناحیه‌ی کاهش است که با کربن طی یک واکنش گرماگیر احیا می‌شود. واکنش کاهش آب ارزش حرارتی محصولات گازی را افزایش می‌دهد؛ به همین دلیل مهم‌ترین واکنش گاز کردن زغال‌سنگ محسوب می‌شود. واکنش‌های ناحیه‌ی کاهش به صورت زیر است (GasTech, 2007).



واکنش دیگری که در ناحیه‌ی کاهش انجام می‌شود، واکنش مونواکسیدکربن با آب است که روی غلظت گازهای H_2 ، CO و CO_2 اثر می‌گذارد (GasTech, 2007).



مقداری از آب مورد نیاز برای واکنش ۶-۳ از اکسیداسیون ترکیب‌های هیدروژن‌دار زغال‌سنگ تأمین می‌شود. در حالت عادی نیاز به آب اضافی وجود دارد که از طریق رطوبت موجود در زغال‌سنگ، لایه‌های مجاور و یا همراه تزریق بخار آب تأمین می‌شود (Couch, 2009).

گاز متان، بیشتر در فرآیند تفکافت تولید می‌شود. ولی در ناحیه‌ی کاهش هم گاز متان از واکنش کربن با هیدروژن به صورت واکنش زیر تولید می‌شود (Burton *et al.*, 2007).



گاز متان در راکتور به دو صورت زیر واکنش می‌دهد (GasTech, 2007).



گازها با عبور از ناحیه‌ی کاهش و حرکت به طرف چاه تولید از ناحیه‌ی تفکافت زغال‌سنگ خارج می‌شوند. درجه حرارت گاز خروجی از ناحیه‌ی کاهش بین ۲۰۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد است (Hartman, 1996).

۳-۴- انتخاب اکسیدان

زغال سنگ در غیاب اکسیژن نه می‌سوزد و نه تبدیل به گاز می‌شود، بنابراین استفاده از اکسیژن برای گاز کردن مورد نیاز است. در دو روش UCG و SCG می‌توان از هوا، اکسیژن و یا بخار آب به عنوان گاز خوراک استفاده کرد. گرایش به استفاده از اکسیژن به جای هوا در راکتورهای سطحی به دلیل کاهش اندازه راکتورها و کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری بیشتر است؛ ولی نیاز به راه‌اندازی کارخانه‌ای برای جداسازی اکسیژن از هوا وجود دارد. ولی در روش UCG به دلیل کمتر بودن هزینه‌های آماده‌سازی راکتور، استفاده از اکسیژن تا حد زیادی بستگی به نوع گاز تولید شده دارد (Carbon Energy Report, 2009).

معمولاً از هوا برای گاز کردن لایه‌های زغال سنگ کم عمق (۱۰۰ تا ۲۰۰ متر) استفاده می‌شود که در این شرایط گاز با ارزش حرارتی کم (تا ۵ مگاژول بر مترمکعب) تولید می‌شود که در نیروگاه‌ها می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. این روش هم اکنون در آنگرین استفاده می‌شود. استفاده از این روش برای تولید برق در کارگاه استخراج مجوباً در آفریقای جنوبی در حال بررسی است. موفقیت‌هایی در تزریق هوا برای تولید گاز برای استفاده در فرآیند فیشر- تروپش در کارخانه‌ای در کوئینزلند استرالیا حاصل شده است (Fergusson, 2009). اگر ارزش حرارتی گاز برای توربین‌های گاز نیروگاه کافی باشد؛ وجود نیتروژن در گاز سنتزی اهمیتی ندارد (Carbon Energy Report, 2009).

به دلیل افزایش هزینه‌های حفاری در لایه‌های زغال سنگ با عمق زیاد (بیشتر از ۵۰۰ متر)، بهترین اکسیدان برای تزریق، اکسیژن است که در این شرایط گاز با ارزش حرارتی تا ۱۲ مگاژول بر مترمکعب تولید می‌شود که جوابگویی هزینه‌ها خواهد بود (Fergusson, 2009). برای تولید گاز سنتزی غنی از گاز هیدروژن می‌توان تنها از بخار آب به عنوان اکسیدان استفاده کرد (Stanczyk *et al.*, 2010).

تزریق هوا هزینه‌ی کمتری نسبت به تزریق اکسیژن دارد؛ ولی به دلیل غلظت زیاد نیتروژن در گاز

سنتزی، ارزش حرارتی گاز کمتر است. به عنوان نمونه، در کارگاه هوکریک ارزش حرارتی گاز تولید شده با تزریق هوا، ۴۰ درصد ارزش حرارتی گاز با تزریق اکسیژن برآورد شده است (Yeary, 1987).

۳-۵- عملکرد راکتور UCG در تعادل شیمیایی اتوترمال^۱

چاپل^۲ در سال ۱۹۹۸ م. در ارزیابی نظری از فرآیندهای گاز کردن، تعادل شیمیایی اتوترمال (ACE) را مطرح کرده. ACE شرایطی است که در آن بهره‌وری فرآیند UCG (انرژی شیمیایی زغال سنگ به انرژی شیمیایی گاز سنتزی) و ارزش حرارتی گاز بیشینه می‌شود (Creedy *et al.*, 2001). در درجه حرارت و فشار زیاد (به عنوان نمونه، در فشار ۵ مگاپاسکال و درجه حرارت ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد)، شرایط ACE با سرعت به تعادل نزدیک می‌شود. ولی در فشار و درجه حرارت کمتر، زمان مورد نیاز برای رسیدن به تعادل تا حد زیادی از زمان ماندگاری گاز در راکتور بیشتر شده و در نتیجه ACE به پایان نمی‌رسد.

با افزایش نسبت بخارآب به اکسیژن در اثر تراوش کنترل نشده آب، دمای تعادل ACE افت می‌کند. به عنوان نمونه، این پدیده حین گاز کردن در کارگاه ال‌ترم‌دال به وقوع پیوست.

۳-۶- عوامل مؤثر بر سینتیک واکنش‌های شیمیایی

عوامل زیادی بر انجام واکنش‌های شیمیایی درون راکتور UCG و ترکیب گاز سنتزی اثر می‌گذارند. این عوامل را می‌توان به دو دسته، عوامل قابل کنترل و غیرقابل کنترل تقسیم‌بندی کرد. اثر توأم این عوامل بر سینتیک واکنش‌های شیمیایی حاکم است.

^۱ - Autothermal Chemical Equilibrium

^۲ - Chappel

۳-۶-۱- عوامل غیرقابل کنترل

عوامل غیرقابل کنترل به عوامل گفته می‌شود که وابسته به خواص زغال‌سنگ و هندسه‌ی لایه مانند نوع زغال‌سنگ، خاکستر، لیچه، ضخامت و عمق لایه هستند. این عوامل در حین عملیات UCG به صورت کنترل نشده بر روی سینتیک واکنش‌های شیمیایی اثر می‌گذارند. در ادامه به بررسی عوامل غیرقابل کنترل پرداخته می‌شود.

۳-۶-۱-۱- نوع زغال‌سنگ

زغال‌سنگ با درجه پایین‌تر، مانند لیگنیت و نیمه‌بیتومینه برای روش UCG مناسب‌تر است؛ زیرا با افزایش حرارت، متورم شده و نفوذپذیری آن‌ها افزایش یافته و واکنش‌های شیمیایی بهتر انجام می‌شوند (Burton *et al.*, 2007). لیگنیت در مقایسه با دیگر زغال‌سنگ‌ها دارای محتوای کربن کمتر، مواد فرار بیشتر، رطوبت بیشتر و ارزش حرارتی کمتر بوده و بیشتر برای استخراج به روش‌های معدن‌کاری سنتی مناسب نیستند و معمولاً برای احتراق مستقیم کاربرد دارد (Liu *et al.*, 2009). میزان واکنش‌پذیری زغال‌سنگ‌ها در شرایط یکسان بستگی به نوع آن‌ها دارد. به عنوان نمونه، لیگنیت بیشترین واکنش‌پذیری و آنتراسیت کمترین واکنش‌پذیری را دارد (DTI, 2004).

۳-۶-۱-۲- خاکستر

وجود مقداری خاکستر و مواد معدنی در زغال‌سنگ برای گاز کردن سودمند است؛ زیرا مانند کاتالیست عمل کرده و باعث بهبود سینتیک گاز کردن می‌شود (Couch, 2009). ولی اگر مقدار ناخالصی‌ها بیشتر از ۴۰ درصد باشد، گاز کردن با مشکل مواجه شده و ارزش حرارتی گازها به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد (Irwin *et al.*, 2009).

۳-۶-۱-۳- لیچه

وجود لیچه در نزدیک نقطه‌ی تزریق و مسیر گسترش راکتور از انتشار جبهه‌ی احتراق جلوگیری می‌کند. وجود لیچه با ضخامت بیش از یک متر به احتمال زیاد باعث توقف فرآیند گاز کردن می‌شود. همچنین، اگر زغال‌سنگ بیش از ۲۰ درصد لیچه داشته باشد، کیفیت گاز تا مقدار زیادی کاهش یافته؛ به طوری که ممکن است گاز کردن از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نباشد (Oliver and Covell, 1989).

۳-۶-۱-۴- ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ

ضخامت لایه بهتر است بیش از یک متر باشد؛ زیرا در لایه‌ها با ضخامت کم به دلیل انتقال حرارت گاز به لایه‌های مجاور، درجه حرارت راکتور UCG کاهش یافته، سرعت واکنش‌های شیمیایی آهسته‌تر شده و فرآیندهای گاز کردن به خوبی انجام نمی‌شود (Mueller *et al.*, 2009). به دلیل گسترش کنترل نشده راکتور در راکتورهای عمیق، ممکن است مقداری از اکسیدان‌ها بدون شرکت در واکنش‌های شیمیایی وارد گاز سنتزی شده و بر روی ترکیب گاز اثر بگذارند.

۳-۶-۱-۵- عمق لایه‌ی زغال‌سنگ

در راکتورهای کم عمق به دلیل کم بودن فشار راکتور و همچنین نفوذ اکسیژن به درون راکتور، احتمال تولید گاز دی‌اکسیدکربن افزایش می‌یابد (Creedy *et al.*, 2001).

۳-۶-۲- عوامل قابل کنترل

در این بخش عوامل قابل کنترل بر سینتیک واکنش‌های شیمیایی مانند نوع اکسیدان، آب، درجه حرارت راکتور و فشار راکتور UCG بررسی خواهد شد.

۳-۶-۲-۱- نوع اکسیدان

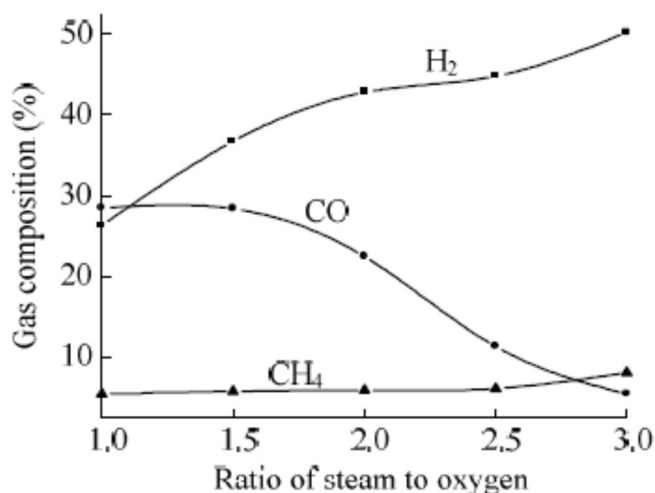
جدول ۱-۳ ترکیب شیمیایی گازهای سنتزی مختلف و ارزش حرارتی آن‌ها را بسته به نوع اکسیدان تزریق شده با ثابت ماندن دیگر عوامل نشان می‌دهد.

جدول ۱-۳: ترکیب گازهای سنتزی مختلف بر اساس اکسیدان تزریق شده (Białecka, 2009).

ردیف	نوع اکسیدان تزریق شده	ترکیب گاز سنتزی (درصد)							ارزش حرارتی گاز سنتزی (MJ/m^3)
		C_nH_m	N_2	O_2	CO_2	CH_4	H_2	CO	
۱	اکسیژن	-	۱۴/۸	۱/۷	۲۴/۶	۵/۴	۳۱/۶	۲۱/۹	۸/۳
۲	اکسیژن با بخار آب	-	۰/۱	-	۲۴/۵	۲/۸	۴۱/۲	۳۱/۴	۹/۴
۳	هوا	-	۶۲/۰	۱/۰	۹/۹	۱/۶	۱۰/۹	۱۴/۶	۳/۳
۴	هوای گرم شده	-	۵۸/۳	۰/۵	۱۱/۶	۱/۶	۱۳/۳	۱۴/۷	۳/۸
۵	هوای غنی شده با اکسیژن	۰/۶	۴۷/۰	۱/۸	۳۰/۰	۱/۸	۱۳/۲	۱۱/۹	۵/۴

۳-۶-۲-۲- آب

آب نقش مهمی در سراسر ناحیه‌ی واکنش ایفا می‌کند. آب عامل تولید هیدروژن در ناحیه‌ی واکنش است که با کربن طی یک واکنش گرماگیر احیا می‌شود. آب اضافی به عنوان یک مخزن حرارتی قابل تبخیر عمل نموده و باعث تعدیل دمای درون راکتور می‌شود. مقداری از بخار آب از اکسیداسیون ترکیب‌های هیدروژن‌دار زغال‌سنگ و تبخیر رطوبت موجود در خود لایه‌ی زغال‌سنگ و یا لایه‌های مجاور تأمین می‌شود. ولی معمولاً نیاز به بخار آب اضافی است که همراه با اکسیژن تزریق می‌شود (Hartman, 1996). شکل ۳-۳ اثر نسبت مخلوط بخار آب و اکسیژن بر تغییر ترکیب گازهای H_2 ، CO و CH_4 را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مناسب‌ترین نسبت مخلوط بخار آب و اکسیژن، ۲ به ۱ برای گاز کردن، لیگنیت است (Liu et al., 2009). حداکثر آب مورد نیاز برای گاز کردن زغال‌سنگ، ۰/۵ کیلوگرم آب به ازای ۱ کیلوگرم زغال‌سنگ است. بنابراین در شرایط خاص، آب اضافی راکتور باید به بیرون پمپاژ شود (Białecka, 2009).



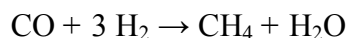
شکل ۳-۳: اثر نسبت مخلوط بخار آب و اکسیژن بر تغییر ترکیب گاز تولید شده (Liu, 2009).

۳-۲-۶-۳- درجه حرارت راکتور

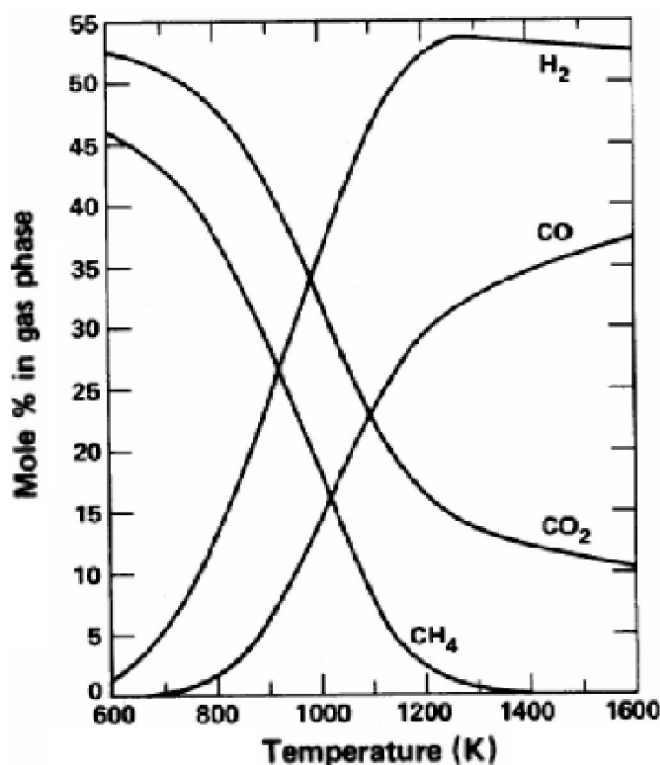
دما یکی از عوامل مؤثر در گاز کردن زغال‌سنگ است که به طور مستقیم بر انجام واکنش‌های شیمیایی و تولید گاز اثر می‌گذارد (Stanczyk *et al.*, 2010). درجه حرارت راکتور معمولاً بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ سانتی‌گراد است (Perkins, 2005). شکل ۳-۴ نقش درجه حرارت در تولید گازهای CO، CO₂، CH₄ و H₂ را نشان می‌دهد. گاز کردن با درجه حرارت زیاد باعث تولید گاز سنتزی غنی از H₂ و CO و با درجه حرارت کم باعث تولید گاز سنتزی غنی از CH₄ می‌شود (Shedden Uhde Australia, 2009).

۳-۲-۶-۴- فشار راکتور

یکی از عوامل مؤثر بر سینتیک واکنش‌های شیمیایی، فشار است. افزایش فشار راکتور باعث افزایش درجه نیمسوز شدن زغال‌سنگ برای تولید گاز متان شده و در نتیجه بهره‌وری راکتور افزایش می‌یابد (Creedy *et al.*, 2001). واکنش تولید گاز متان در راکتور UCG به صورت رابطه‌ی شیمیایی ۳-۱۰ است (Shafirovich and Varma, 2009).



۱۰-۳



شکل ۳-۴: نقش درجه حرارت در تولید گاز سنتزی در روش استخراج UCG (Burton *et al.*, 2007).

در جریان واکنش ۳-۱۰، با افزایش فشار راکتور، طبق اصل لوشاتلیه^۱ تعادل به سمت راست (یعنی افزایش تولید گاز متان) جابه‌جا می‌شود. این را می‌توان در نتایج آزمایش صحرایی روش UCG در ایالات متحده (در فشار ۰/۴ مگاپاسکال) و در اسپانیا (فشار ۵/۳ مگاپاسکال) که در هر دو مورد اکسیژن تزریق شده است، نیز دید. گازهای حاصل در فشار ۰/۴ مگاپاسکال شامل ۴/۷ درصد CH₄، ۲۰/۸ درصد CO و ۳۸/۱ درصد H₂ است؛ درحالی که گازهای به دست آمده در فشار ۵/۳ مگاپاسکال شامل ۱۳/۲ درصد CH₄، ۱۲/۸ درصد CO و ۲۴/۸ درصد H₂ هستند (گازهای CO₂ و H₂S متعادل هستند). ارزش حرارتی گازهای حاصل به ترتیب ۸/۷۳ و ۱۰/۹ مگاژول بر مترمکعب برآورد شده است (Shafirovich and Varma, 2009). همچنین در کارگاه‌های پرایس‌تون^۲ و چینچیللا^۳ در فشار ۱ مگاپاسکال به ترتیب ۷/۵ تا ۸ و ۱۳

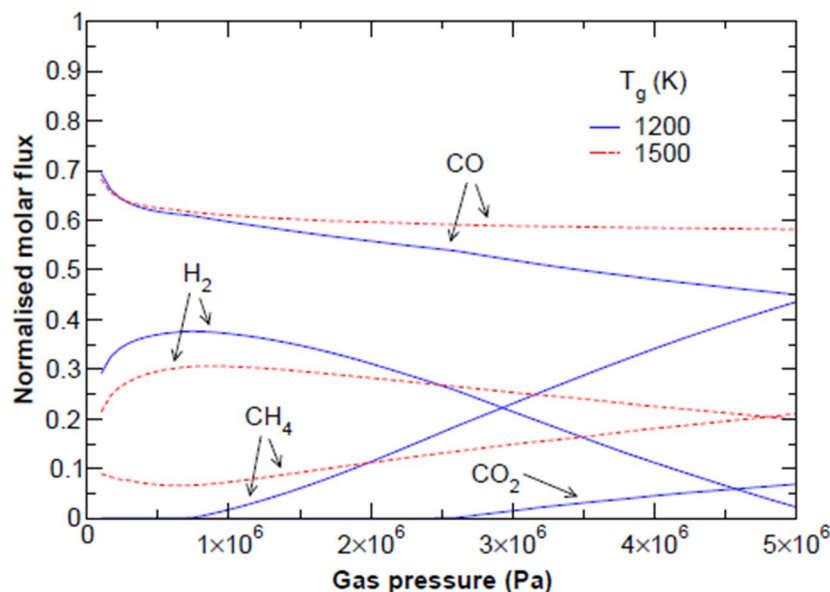
^۱ - Le Chatelier's principle

^۲ - Pricetown

^۳ - Chinchilla

درصد گاز متان تولید شده است (Perkins, 2005).

شکل ۳-۵ مدل‌سازی عددی اثر فشار گاز بر ترکیب گاز در دمای ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ کلوین را نشان می‌دهد که با نتایج داده‌های گزارش شده از مناطق مختلف سازگاری خوبی دارد (Perkins, 2005).



شکل ۳-۵: اثر فشار گاز بر ترکیب گاز در دمای ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ کلوین (Perkins, 2005).

۳-۷- ترکیب گاز سنتزی

همان‌طور که پیش از این بیان شد، گاز سنتزی حاصل از فرآیند UCG شامل هیدروژن، دی‌اکسیدکربن، مونواکسیدکربن، متان و بخار آب است (LincEnergy Report, 2006). ترکیب گاز سنتزی UCG شباهت زیادی به گاز سنتزی SCG داشته و نیز دما و فشار گاز سنتزی شباهت زیادی دارند (Friedmann *et al.*, 2009).

همان‌طور که ذکر شد، ترکیب گاز سنتزی به عوامل قابل کنترل و غیرقابل کنترل وابسته است. با تغییر در عوامل قابل کنترل مانند نوع اکسیدان، فشار راکتور، درجه حرارت و آب، می‌توان برای بهبود

ترکیب گاز سنتزی برای افزایش ارزش حرارتی گاز سنتزی یا برای تعدیل نسبت هیدروژن به مونواکسیدکربن استفاده کرد (Carbon Energy Report, 2009).

جدول ۳-۲ نتایج مدل‌سازی CFD از ترکیب گاز تولید شده در آزمایشگاه ملی لورنس لیورمور و میانگین اندازه‌گیری شده از کارگاه راکی‌مونت با استفاده از روش استخراج CRIP را نشان می‌دهد. همچنین به عنوان نمونه، ترکیب گاز سنتزی در چند کارگاه استخراج UCG مختلف در جهان در جدول ۳-۳ و شکل ۶-۳ دیده می‌شود.

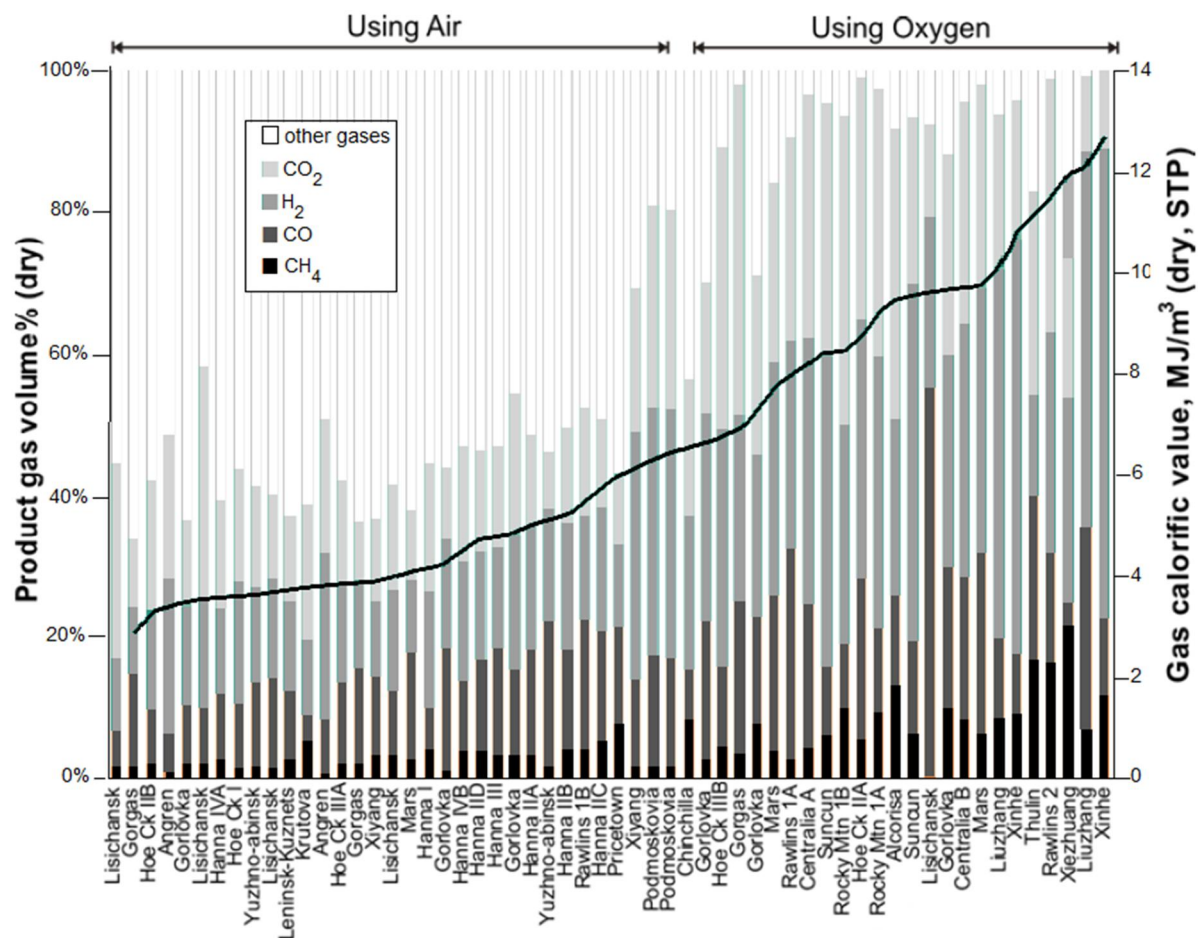
جدول ۳-۲: نتایج مدل‌سازی CFD ترکیب گاز سنتزی (Friedmann *et al.*, 2006).

ترکیب‌های گاز سنتزی تولید شده در کارگاه استخراج (درصد)						
H ₂ O	CO ₂	CH ₄	H ₂	CO	مدل	ردیف
۳۳/۰	۱۹/۴	۷/۴	۲۷/۲	۱۳/۰	مدل CFD	۱
۳۳/۰	۲۷/۲	۶/۴	۲۷/۳	۶/۴	اندازه‌گیری شده	۲

جدول ۳-۳: ترکیب گاز سنتزی چندین کارگاه استخراج UCG در جهان

(Batenburg, 1992; Khadse *et al.*, 2007; Kostur and Kačur, 2008; Gujarat Industries Power Co, 2009).

ارزش حرارتی (MJ/m ³)	ترکیب گاز سنتزی تولید شده در چند کارگاه استخراج UCG (درصد)									
	C _m H _n	H ₂ S	N ₂	O ₂	CO ₂	CH ₄	H ₂	CO		
۳/۵۲	۰/۳	۰/۴	۵۴/۸	۰/۶	۱۹/۵	۲	۱۷	۳/۵۲	Angrenskaya	۱
۳/۳۶	۰/۲	۱/۲	۵۷/۸	۰/۵	۱۷/۶	۱/۸	۱۵/۲	۳/۳۶	Podmoskovnaya	۲
۶/۳۹	-	۳/۵	۱۵/۷	-	۲۸/۴	۱/۸	۳۵	۶/۳۹		
۳/۳۵	۰/۲	۱/۲	۵۸/۵	۰/۵	۱۶/۹	۱۵/۱	۱۵/۱	۳/۳۵	Shatskaya	۳
۳/۸	۰/۲	۰/۰۳	۵۸/۳	۰/۲	۱۴/۳	۲/۳	۱۴/۱	۳/۸	Yuzhno-Abinskaya	۴
۳/۵۲	۰/۳	۰/۴	۵۴/۸	۰/۶	۱۹/۵	۲	۱۷	۳/۵۲	Lisichanskaya	۵
۲/۶	۰/۱	۰/۳	۶۳/۶	۰/۵	۲۰/۵	۱/۳	۱۱/۶	۲/۶	Sinelnikovsky	۶
۷	-	-	۳۱	-	۵۰	۱۷	۲	۷	Thulin	۷
۶/۶	-	-	۴۳	-	۱۹	۸	۲۲	۶/۶	Chinchilla	۸
-	۰/۸	۰/۱	۵۱/۶	-	۱۲/۴	۳/۳	۱۷/۳	-	Hanna-2	۹
۴/۷۰	-	-	۶۱/۳	-	۸/۶	۳/۴	۹/۸	۴/۷۰	Pricetown	۱۰
۹/۵	-	-	۲	-	۳۷	۹	۴۰	۹/۵	Rocky Mountain-1	۱۱
۹/۲	-	-	۲/۲	-	۲۷/۱	۳/۹	۴۰/۹	۹/۲	Centralia LKB-1	۱۲



شکل ۳-۶: ترکیب گاز سنتزی در کارگاه‌های مختلف UCG در جهان (Couch, 2009).

۳-۸- ارزش حرارتی گاز سنتزی

ارزش حرارتی گاز سنتزی به محتوای انرژی گاز بر واحد حجم گاز در شرایط استاندارد گفته می‌شود. گاز سنتزی حاصل از فرآیند UCG دارای ارزش حرارتی کم تا متوسط (۳ تا ۱۶ مگاژول بر مترمکعب) است (Couch, 2009). در حجم برابر، ارزش حرارتی هیدروژن و مونواکسیدکربن تقریباً برابر بوده، ولی ارزش حرارتی متان تقریباً ۳ برابر آن‌ها است. بنابراین ارزش حرارتی گاز سنتزی به شدت وابسته به محتوای متان موجود در آن است (Glaser and Johanson, 1985). با تزریق هوا، گاز سنتزی با ارزش حرارتی کم (۳/۳ تا ۴/۳ مگاژول بر مترمکعب) حاصل می‌شود (Shafirovich *et al.*, 2008). ولی

هنگام تزریق اکسیژن و یا بخار آب به عنوان اکسیدان، ارزش حرارتی گاز به ۱۰ تا ۱۲ مگاژول بر مترمکعب افزایش می‌یابد (Shafirovich and Varma, 2009). تزریق هوا به درون راکتور هزینه‌ی کمتری نسبت به تزریق اکسیژن دارد؛ ولی به دلیل غلظت نیتروژن در گاز، ارزش حرارتی آن کمتر است.

در شرایطی مانند لایه‌ی زغال‌سنگ با ضخامت کم، خاکستر و لیچه زیاد، تراوش کنترل نشده آب‌های زیرزمینی و افزایش زمان ماندگاری گاز در درون راکتور ارزش حرارتی گازهای سنتزی کاهش می‌یابد (Thorsness *et al.*, 1980).

۳-۹- جمع‌بندی

عوامل مؤثر بر انجام واکنش‌های شیمیایی و ترکیب گاز سنتزی شامل عوامل غیرقابل کنترل مانند نوع زغال‌سنگ، خاکستر، لیچه، ضخامت و عمق لایه و عوامل قابل کنترل مانند نوع اکسیدان، آب، درجه حرارت و فشار راکتور است. با انتخاب لایه‌ی زغال‌سنگ با ضخامت بیشتر از ۱ متر، عمق مناسب، خاکستر کمتر از ۴۰ درصد، انتخاب اکسیدان مناسب، کنترل درجه حرارت و فشار راکتور و کنترل آب زیرزمینی آب می‌توان گاز با ارزش حرارتی مطلوب و یا غنی از گازهای سودمند مانند CH_4 ، CO و H_2 تولید کرد.

بسته به نوع کاربرد گاز سنتزی، نوع اکسیدان انتخاب می‌شود. به علت افزایش هزینه‌های راکتورهای عمیق (بیش از ۳۰۰ متر) بهترین اکسیدان، مخلوط بخار آب و اکسیژن با نسبت ۲ به ۱ است. گاز تولید شده با تزریق هوا حاوی مقدار زیادی نیتروژن بوده؛ ولی گاز سنتزی حاصل از تزریق مخلوط اکسیژن و بخار آب، حاوی مقدار زیادی بخار آب و هیدروژن است. با افزایش بخار آب در راکتور غلظت گاز H_2 افزایش، CO کاهش و CH_4 تقریباً ثابت است. با افزایش درجه حرارت، غلظت گازهای CO و H_2 افزایش و غلظت گازهای CH_4 و CO_2 کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش فشار، غلظت گاز CH_4 افزایش و غلظت گازهای CO و H_2 کاهش می‌یابد.

فصل چهارم:

امکان سنجی استفاده از UCG در معادن زغال سنگ طبس

۴-۱- مقدمه

نواحی چهارگانه حوزه‌ی زغال‌دار طبس (پروده، نایبند، مزینو و آبدوگی) با داشتن انواع زغال‌سنگ کک‌شو و حرارتی از نظر وسعت و میزان ذخایر، مقام نخست را در کشور داراست. به همین دلیل در این فصل، نخست مناسب‌ترین ناحیه از حوزه‌ی زغال‌دار طبس از لحاظ نوع زغال‌سنگ برای استخراج با روش UCG انتخاب خواهد شد. سپس به بررسی زمین‌شناسی، تکتونیک و ساختمان زمین‌شناسی، وضعیت هیدروژئولوژی، زغال‌خیزی و مشخصات کیفی زغال‌سنگ ناحیه انتخاب شده پرداخته خواهد شد. بخش‌ها و لایه‌های زغال‌دار موجود در ناحیه‌ی مورد مطالعه همراه با ضخامت لایه‌ها، عمق لایه‌ها، شیب لایه‌ها و کیفیت زغال‌سنگ مشخص خواهد شد. در پایان از بین لایه‌های موجود در ناحیه، لایه‌ی امیدبخش برای استخراج با روش UCG با استفاده از معیارهای انتخاب کارگاه استخراج اشاره شده در فصل دوم تعیین خواهند شد. لایه‌ی امیدبخش، با توجه به عمق و شیب لایه‌های موجود در ناحیه، انتخاب شده، روش آماده‌سازی چاه‌های تزریق و تولید و نوع روش استخراج با توجه به روش‌های استخراج UCG اشاره شده در فصل دوم پیشنهاد خواهد شد.

۴-۲- حوزه‌ی زغال‌دار طبس

حوزه‌های زغال‌دار ایران در دو ناحیه ساختاری عمده، یعنی البرز و ایران مرکزی گسترش دارد. حوزه‌ی زغال‌دار ایران مرکزی در گستره‌ی رسوبات تریاس از سازند شمشک تشکیل شده است. این حوزه‌ی زغال‌دار شامل چهار پهنه‌ی اصفهان- کاشان، لوت، کرمان و طبس است. زغال‌سنگ‌های پهنه‌ی اصفهان- کاشان و پهنه‌ی لوت از نظر معدنی از اهمیت چندانی برخوردار نیستند. این در حالی است که دو پهنه‌ی دیگر از نظر معدنی مهم بوده و دارای معادن فعال و قابل توجهی هستند (امینی و همکاران، ۱۳۸۹). نواحی چهارگانه حوزه‌ی زغال‌دار طبس با داشتن انواع زغال‌سنگ کک‌شو و حرارتی از نظر وسعت و میزان ذخایر مقام نخست را در کشور داراست. جدول ۴-۱ ذخایر و نوع زغال‌سنگ در حوزه‌ی زغال‌دار طبس را نشان می‌دهد. حوزه‌ی زغال‌دار طبس به وسعت ۳۰۰۰۰ کیلومتر مربع شامل چهار ناحیه (پروده، نایبند، مزینو و آبدوغی) است. همان‌طور که دیده می‌شود ناحیه‌ی مزینو از حوزه‌ی طبس با دارا بودن زغال‌سنگ حرارتی از نوع آنتراسیت و نیمه‌آنتراسیت دارای اهمیت است (خلاصه گزارشات، ۱۳۷۹). از آنجا که آنتراسیت و نیمه‌آنتراسیت قابلیت کک‌شوندگی برای استفاده در صنایع فولاد کشور را ندارد، به همین منظور در این تحقیق ناحیه‌ی زغال‌دار مزینو انتخاب شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۴-۱: ذخایر و نوع زغال‌سنگ در حوزه‌ی زغال‌دار طبس (خلاصه گزارشات، ۱۳۷۹).

ردیف	نواحی زغال‌دار	نوع زغال‌سنگ	میزان ذخیره‌ی اکتشافی (میلیون تن)
۱	پروده	کک‌شو	۱۱۰۰
۲	نایبند	کک‌شو	۲۵۰
۳	مزینو	حرارتی	۱۴۳۰

۴-۳- ناحیه‌ی زغال‌دار مزینو

ناحیه‌ی مزینو ۸۸۰۰ کیلومتر مربع از حوزه‌ی زغال‌دار طبس را شامل می‌شود (خلاصه گزارشات،

(۱۳۷۳). این ناحیه در ۸۵ کیلومتری غرب طبس در استان یزد و در عرض جغرافیایی $33^{\circ}09'$ تا $33^{\circ}17'$ و طول جغرافیایی $56^{\circ}10'$ تا $56^{\circ}16'$ قرار دارد. این ناحیه دارای آب و هوای کویری گرم و خشک، با پوشش گیاهی بسیار کم، با میزان بارندگی کم (۲۵ میلی‌متر در سال)، تغییرات درجه حرارت 4° تا 49° درجه سانتی‌گراد و بالاترین نقطه ارتفاعی ۱۵۰۰ متر است. رودخانه‌ها در این ناحیه جریان دائمی نداشته و معمولاً جریان آب در آن‌ها فصلی است. قرار گرفتن این شهرستان در مجاورت استان‌های صنعتی و معدنی کشور مانند یزد، کرمان، سمنان و اصفهان بر اهمیت آن افزوده است (گزارش اکتشاف، ۱۳۷۷). شکل ۴-۱ موقعیت ناحیه‌ی مزینو از حوزه‌ی زغال‌دار طبس را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱: موقعیت ناحیه‌ی مزینو از حوزه‌ی زغال‌دار طبس (گزارش اکتشاف، ۱۳۷۷).

۴-۴- زمین‌شناسی ناحیه‌ی مزینو

ناحیه‌ی مزینو از دید جایگاه زمین‌ساختی در بخش ایران مرکزی واقع شده است. واحدهای زغال‌دار

سازند مزینو (سازند هجدک) در دوره ژوراسیک میانی تشکیل شده‌اند. این سازند شامل تناوبی از زغال‌سنگ، سیلت‌استون، شیل، ماسه‌سنگ با دانه‌بندی مختلف و به ندرت میان‌لایه‌های نازک آهکی است (یزدی، ۱۳۸۶). سازند مزینو از سه بخش زغال‌دار تحتانی، میانی و فوقانی تشکیل شده است (گزارش اکتشاف، ۱۳۷۷). میانگین ضخامت رسوبات زغال‌دار مزینو در ناحیه (از آهک بادامو تا آهک طبس) ۱۲۰۰ متر است (خلاصه گزارشات، ۱۳۷۳).

رسوبات بخش فوقانی شامل ماسه‌سنگ‌های دانه ریز تا دانه درشت با ضخامت کم، سیلت‌های ماسه‌ای کربن‌دار و نیز شیل‌های کربن‌دار با ضخامت قابل توجه است که در قسمت شرق ناحیه گسترش دارد. این قسمت دارای مرفولوژی بسیار آرام بوده و توسط شن‌های روان در برخی مناطق پوشیده شده است. ضخامت لایه‌های زغال‌سنگ این بخش از ۱۰ سانتی‌متر تا ۱ متر است (گزارش اکتشاف، ۱۳۷۷). ضخامت این بخش ۱۱۵ متر است (گزارش اکتشاف کمرمهدی، ۱۳۷۷).

رسوبات بخش میانی با ضخامت ۳۰۰ تا ۳۴۰ متر بین ماسه‌سنگ‌های S1 تا S2 شامل ماسه‌سنگ‌های دانه ریز تا دانه درشت، سیلت‌استون، شیل و شیل‌های زغال‌دار و باندهای متعدد زغال‌سنگ از چند سانتی‌متر تا ۴ متر است (گزارش اکتشاف، ۱۳۷۷).

رسوبات بخش تحتانی با ضخامت ۱۵۰ تا ۱۸۰ متر (به جز کوارتزیت کف) شامل باندهای متعدد ماسه‌سنگ دانه ریز تا دانه متوسط کواتزیتی با ضخامت ۱ تا ۱۵ متر است. در حد فاصل این باندهای ماسه‌سنگی، شیل و سیلت‌های کربن‌دار و نیز باندهای زغال‌سنگ با ضخامت‌های چند سانتی‌متر تا ۵ متر قرار دارد (گزارش اکتشاف، ۱۳۷۷). ضخامت بخش‌های زغال‌دار تحتانی و میانی از کوارتزیت تحتانی تا ماسه‌سنگ S2 حداکثر ۵۴۰ متر است (خلاصه گزارشات، ۱۳۷۳).

سازند مزینو با آهک بادامو آغاز می‌شود. پس از آهک بادامو لایه‌های ماسه‌سنگ و ماسه‌سنگ کوارتزیتی به ضخامت ۱۵۰ متر تشکیل شده است. حداکثر ضخامت آهک بادامو در ناحیه ۶۰ متر است.

بالای سازند مزینو، لایه‌های آهک پروده (طبس) قرار دارد. این سازند متشکل از حدوداً ۴۰ متر آهک تخریبی است (خلاصه گزارشات، ۱۳۷۳؛ گزارش اکتشاف، ۱۳۷۷).

جنس رسوبات بین لایه‌های زغال‌دار عمدتاً شیل-سیلت‌استون بوده و در جهت امتداد از جنوب به شمال همراه با تغییر ضخامت همراه است، در عمق هم این موضوع تأیید می‌شود. امتداد لایه‌های زغال‌دار به طور کلی شمال شرقی- جنوب غربی است. شیب عمومی لایه‌ها به سمت شرق، مقدار آن متغیر (۱۰ تا ۵۵ درجه) و شیب متوسط حدوداً ۲۰ درجه است. شیب لایه‌ها هر چه به سمت آهک طبس در شرق نزدیک‌تر شوند، بیشتر می‌شود (گزارش اکتشاف، ۱۳۷۷؛ خلاصه گزارشات، ۱۳۷۹).

۴-۵- تکتونیک و ساختمان زمین‌شناسی ناحیه‌ی مزینو

ناحیه مزینو به صورت مجموعه‌ای از چین‌خوردگی‌ها با محور شمالی- جنوبی است. ناحیه تحت تأثیر فشارهای تکتونیکی از سمت شرق و غرب قرار گرفته و رسوبات زغال‌دار نرم به علت قرار گرفتن بین دو لایه سخت و مقاوم (آهک بادامو در زیر و آهک طبس در بالا) از میزان چین‌خوردگی‌های بیشتری متأثر شده‌اند. این ناحیه از نظر ساختمانی یک تاقدیس با شیب عمومی و آرام است (خلاصه گزارشات، ۱۳۷۳؛ خلاصه گزارشات، ۱۳۷۹).

از نظر ساختمان زمین‌شناسی و نوع رسوبات و به طور کلی سرگذشت زمین‌شناسی، ناحیه‌ی مزینو و نواحی غرب آن به سه بخش زمین‌ساختاری رسوبی غربی، مرکزی و شرقی تقسیم‌بندی می‌شود. این بخش‌ها را سه گسل بزرگ نایینی، کلمرد و گسلی که حد فاصل بین دو ناحیه‌ی پروده و مزینو است به ترتیب از غرب به شرق از یکدیگر جدا می‌سازد (خلاصه گزارشات، ۱۳۷۳). گسل بزرگ و قدیمی کلمرد در غرب ناحیه‌ی قرار دارد. گسل F.N در شمال و گسل F.S در جنوب عمل نموده‌اند (خلاصه گزارشات، ۱۳۷۹).

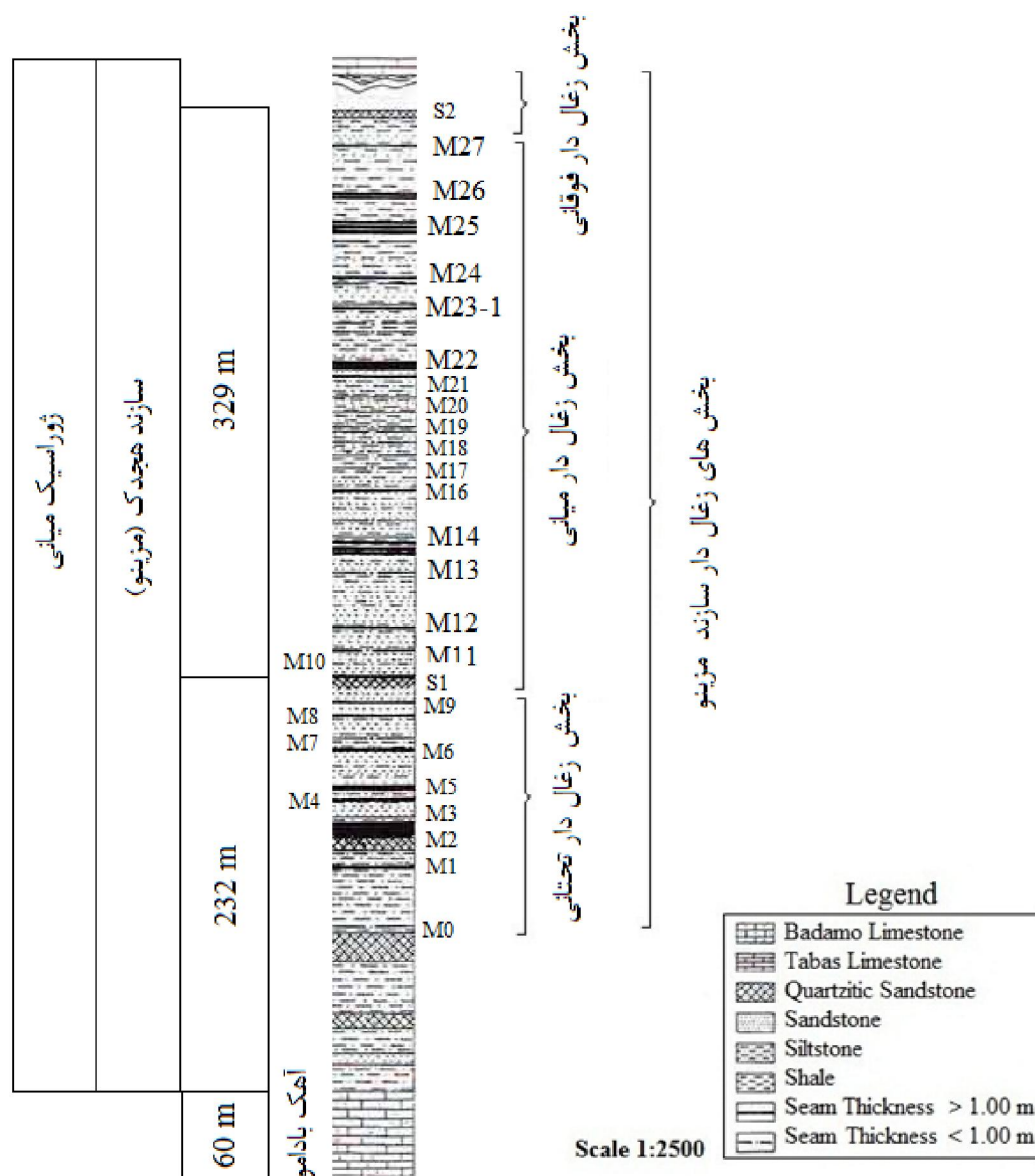
ناحیه‌ی مزینو دارای ساختمان پیچیده‌ای بوده و دستخوش عوامل تکتونیکی شده است. فعالیت گسل‌ها در برخی نقاط شدید و در برخی نقاط ضعیف است (خلاصه گزارشات، ۱۳۷۹). با توجه به جهت اصلی (شرقی- غربی)، بیشتر گسل‌ها به صورت بین لایه‌ای عمل می‌کنند. همچنین عکس‌ها و پیمایش سطحی نشان دهنده‌ی این است که گسل‌های بزرگ در ناحیه کمتر است (گزارش اکتشاف، ۱۳۷۷).

۴-۶- وضعیت هیدروژئولوژی ناحیه‌ی مزینو

به طور کلی سفره‌های آب زیرزمینی در قسمت‌های آبدار آبرفتی و آهکی با ضخامت مناسب تشکیل می‌شود. ضخامت آبرفت در ناحیه کم بوده و حدوداً ۲ تا ۲۰ متر است. این آبرفت در وضعیت آب‌های زیرزمینی تأثیر چندانی ندارد. بیشترین روندهای آبدار در محدوده‌های ماسه‌سنگی که دارای شکستگی‌های زیادی می‌باشد، وجود دارد. به عنوان نمونه، میانگین ضخامت بخش آبدار و عمق لایه‌ی نفوذناپذیر در محدوده کوچکعلی (تقریباً ادامه بخش زغال‌دار ناحیه‌ی مزینو) به ترتیب ۵۵ متر و ۱۲۰ متر است (گزارش اکتشاف، ۱۳۷۷).

۴-۷- زغال‌خیزی ناحیه‌ی مزینو

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 زغال‌دار 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 زغال‌دار قابل توجهی است؛ ولی اکتشاف نشده است (خلاصه گزارشات، ۱۳۷۹). شکل ۴-۲ یکی از ستون‌های چینه‌شناسی ناحیه‌ی مزینو را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲: یکی از ستون‌های چینه‌شناسی ناحیه‌ی مزینو (خلاصه گزارشات، ۱۳۷۹).

لایه‌های اصلی زغال‌سنگ در بخش تحتانی با بیشترین ضخامت (مجموع متوسط ۱۳/۲۲ متر) از لایه‌ی M1 تا M9 در تمام ناحیه اکتشافی تداوم دارد. لایه‌های زغال‌دار بخش میانی اگر چه از نظر تعداد بیشتر هستند؛ ولی تعداد ۵ لایه (M9، M14، M22، M25 و M26) دارای تداوم بیشتر از ۹۰ درصد بوده و سایر لایه‌های زغال‌دار تداوم بین ۵۰ تا ۹۰ درصد دارند (خلاصه گزارشات، ۱۳۷۹). در جدول ۴-۲ فاصله‌ی تقریبی بین لایه‌های زغال‌سنگ و جنس رسوبات در بخش‌های مختلف آورده شده است.

جدول ۴-۲: فاصله‌ی بین لایه‌های مختلف و جنس رسوبات در بخش‌های مختلف ناحیه‌ی مزینو.

ردیف	لایه‌های مهم	فاصله لایه‌ها (متر)	میانگین فاصله (متر)	جنس لایه	نام بخش	ضخامت بخش (متر)
	سطح زمین	-	۴۰	آهک و آبرفت	آهک پروده و آبرفت	۴۰
۱	آهک پروده	-	۱۱۵	شیل و سیلت‌استون	بخش زغال‌دار فوقانی	۱۱۵
۲	S2	ناچیز	ناچیز	سیلت‌استون	بخش زغال‌دار میانی	۳۰۸
۳	M27	۱۰ تا ۲۹	۱۹/۵	سیلت‌استون		
۴	M26	۱۵/۵ تا ۲۱/۴	۱۸/۵	سیلت‌استون		
۵	M25	۵ تا ۳۵/۶	۲۰/۳	سیلت‌استون		
۶	M24	۲۹ تا ۵۴/۵	۴۱/۷۵	سیلت‌استون		
۷	M22	۷۴/۷۵ تا ۹۱/۴	۸۳	سیلت‌استون		
۸	M17	۳۶/۳ تا ۵۷/۳	۴۶/۸	سیلت‌استون		
۹	M16	۱۶/۴ تا ۳۱/۸	۲۴/۱	سیلت‌استون		
۱۰	M14	۱۲ تا ۳۹	۲۵/۵	سیلت‌استون		
۱۱	M12	۱۷ تا ۳۴	۲۵/۵	ماسه‌سنگ		
۱۲	M10	۳۰ تا ۵۰	۴۰	ماسه‌سنگ		
۱۳	S1	-	۴۳	سیلت‌استون	بخش زغال‌دار تحتانی	۱۳۲
۱۴	M6	۰ تا ۶	۳	ماسه‌سنگ		
۱۵	M5	۱۲ تا ۲۲	۱۷	سیلت‌استون		
۱۶	M3-4	۲۰ تا ۲۱	۲۰/۵	ماسه‌سنگ		
۱۷	M2	۰ تا ۷	۳/۵	سیلت و ماسه‌سنگ		
۱۸	M1	۴۰ تا ۵۰	۴۵	سیلت‌استون		
۱۹	M0	-	۱۵۰	ماسه‌سنگ	لایه‌های کوارتزیتی	۱۵۰
۲۰	لایه‌های کوارتزیتی	-	۶۰	آهک	آهک بادامو	۶۰
۲۱	آهک بادامو	-				

۴-۸- مشخصات هندسی و کیفی زغال سنگ ناحیه‌ی مزینو

زغال سنگ‌های ناحیه‌ی مزینو از بقایای لیگنین و سلولزهای گیاهان تشکیل شده‌اند. این زغال سنگ‌ها از نوع آنتراسیت و نیمه‌آنتراسیت بوده و در زمره زغال سنگ‌های حرارتی محسوب می‌شوند. زغال سنگ‌های ناحیه‌ی مزینو به دلیل ماسرال‌های ویتترینیتی از ارزش حرارتی نسبتاً خوبی (۴۸۰۰ تا ۶۵۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم) برخوردار هستند (خلاصه گزارشات، ۱۳۷۳). مشخصات هندسی و کیفی لایه‌های زغال دار در ناحیه‌ی مزینو در جدول ۴-۳ آورده شده است.

جدول ۴-۳: مشخصات هندسی و کیفی لایه‌های ناحیه‌ی مزینو (خلاصه گزارشات، ۱۳۷۳؛ خلاصه گزارشات، ۱۳۷۹).

ردیف	نام لایه	ضخامت لایه (متر)	شیب لایه (درجه)	خاکستر (درصد)	مواد فرار (درصد)	رطوبت (درصد)	وزن مخصوص	ذخیره‌ی کل لایه (میلیون تن)
۱	M27	۰/۵۲	-	-	-	-	-	-
۲	M26	۱/۲۱	۱۸	۳۹/۱	۱۲/۹۰	۰/۹	۱/۷۰	۱۵/۸
۳	M25	۱/۱	۲۰	۳۸/۳	۱۳/۱۵	۰/۷	۱/۵۷	۲۵/۸
۴	M23-1	۰/۶۸	-	۳۵/۷	-	۰/۶	-	۸/۵
۵	M23	۰/۶۴	-	۲۸/۷	-	۰/۷	-	۳۸/۸
۶	M22-1	۰/۵۸	۲۶	۲۱/۴	-	۰/۷	۱/۴۶	۷/۵
۷	M17	۰/۵۸	۲۶	۳۸/۱	۱۲/۲۷	۰/۶	۱/۶۰	۱۲/۸
۸	M14-1	۰/۸۷	-	۳۵/۴	-	۰/۹	-	۲۲/۴
۹	M10-2	۰/۶۷	-	۳۲/۹	-	-	-	۱۴/۵
۱۰	M10-1	۰/۵۸	-	۳۷/۹	-	-	-	۱۰/۶
۱۱	M10	۰/۵۲	۲۵	۲۵/۲	۸/۶۸	۰/۹	۱/۵۸	۱۱/۵
۱۲	M9	۰/۸۵	-	۳۴/۷	۹/۴۵	۰/۶	-	۲۶/۴
۱۳	M8	۰/۶۸	-	۳۴/۸	۹/۹۰	۰/۶	-	۱۵/۳
۱۴	M6	۰/۹۸	۲۳	۳۸/۱	۱۰/۰۸	۰/۷	۱/۵۸	۲۶/۹
۱۵	M5	۱/۸۸	۲۰	۳۶/۰	۹/۲۹	۰/۶	۱/۵۸	۸۰/۳
۱۶	M4	۱/۶۸	۱۵	۳۳/۰	۸/۶۳	۰/۸	۱/۵۵	۶۰/۸
۱۷	M2-1	۱/۵۱	-	۳۶/۲	-	۰/۸	-	۴۴/۴
۱۸	M2	۳/۵۷	۲۵	۳۶/۴	۸/۳۳	-	۱/۵۸	۱۳۹/۶
۱۹	M1	۲/۵۰	۱۵	۳۵/۰	۹/۲۳	-	۱/۵۶	۱۰۰/۵

نتایج بررسی عملیات آزمایشگاهی بر روی ۶۶۳ نمونه و انجام ۵۰۵۳ آنالیز نشان می‌دهد که میانگین خاکستر لایه‌های زغال‌دار در ناحیه ۳۲ درصد، مواد فرار بین ۶/۵ تا ۱۵/۵ درصد، رطوبت کمتر از ۱ درصد و گوگرد ۰/۸ تا ۴/۳ درصد است (گزارش اکتشاف، ۱۳۷۷). مقدار مواد فرار لایه‌های زغال‌دار مزینو به میزان متوسط و مقدار خاکستر به دلیل مرکب بودن لایه‌ها به میزان زیاد اعلام شده و در زمره لایه‌های زغال‌دار پرخاکستر قرار می‌گیرند. همچنین، لایه‌های زغال‌دار دارای وزن مخصوص نسبتاً زیاد (۱/۵۰ تا ۱/۷۵) هستند (خلاصه گزارشات، ۱۳۷۹).

۴-۹- تعیین لایه‌ی امیدبخش

نخستین معیار در انتخاب لایه‌های امیدبخش، ضخامت لایه است. نخست، لایه‌ها با ضخامت بیش از ۱ متر یعنی لایه‌های M1، M2، M4، M5، M25 و M26 با توجه به جدول ۴-۳ انتخاب می‌شوند. این لایه‌ها از لحاظ شیب و خاکستر برای استخراج با روش UCG مناسب بوده و دارای مواد فرار با مقدار متوسطی هستند.

اگر لایه‌هایی که در تراز پایین‌تر قرار دارند برای استخراج انتخاب شده و استخراج شوند؛ امکان استخراج لایه‌های بالایی به طور کلی از بین خواهد رفت و یا آن را بسیار دشوار خواهد نمود. بنابراین در مرحله‌ی نخست، بالاترین لایه یعنی لایه‌ی M26 به عنوان لایه‌ی امیدبخش برای استخراج به روش UCG انتخاب می‌شود.

ناحیه‌ی مورد مطالعه (ناحیه‌ی زغال‌دار مزینو) با توپوگرافی مناسب، پوشش گیاهی کم، دور از مناطق پرجمعیت، پارک‌های ملی، مزارع کشاورزی، چاه‌های آب، سفره‌های زیرزمینی با آب قابل شرب و میادین نفت و گاز واقع شده و از لحاظ محدودیت‌های ناحیه‌ای مناسب است. برخی از مشخصات هندسی و کیفی لایه‌ی M26 در جدول ۴-۴ آورده شده است.

جدول ۴-۴: مشخصات هندسی و کیفی لایه‌ی M26.

ردیف	مشخصات هندسی و کیفی لایه	مقدار	آحاد
۱	ضخامت لایه	۱/۲۱	متر
۲	میانگین عمق لایه	۱۵۰	متر
۳	شیب لایه	۱۸	درجه
۴	خاکستر زغال‌سنگ	۳۹/۱	درصد
۵	مواد فرار زغال‌سنگ	۱۲/۹۰	درصد
۶	رطوبت زغال‌سنگ	۰/۹	درصد
۷	ذخیره‌ی لایه	۱۵/۸	میلیون تن

۴-۱۰- روش استخراج پیشنهادی

از آنجا که لایه‌ی امیدبخش M26 در اعماق کم قرار دارد برای آماده‌سازی چاه‌های تزریق و تولید، روش‌های احتراقی و حفاری جهت‌دار و برای گاز کردن زغال‌سنگ روش‌های چاه قائم و CRIP پیشنهاد می‌شود. در گاز کردن زیرزمینی زغال‌سنگ با روش CRIP بهترین اکسیدان مخلوط اکسیژن و بخار آب است. بهترین نسبت مخلوط بخار آب و اکسیژن ۲ به ۱ در این روش استخراج است. از آنجا که رطوبت زغال‌سنگ ناحیه‌ی مزینو کم (۰/۹ درصد) است، به نظر می‌رسد نیاز به بخار آب بیشتری برای تزریق باشد. اگر روش استخراج چاه قائم استفاده شود، می‌توان از هوای داغ به عنوان اکسیدان استفاده کرد.

۴-۱۱- جمع‌بندی

در این فصل، نخست ناحیه‌ی مزینو از حوزه‌ی زغال‌دار طبس به دلیل داشتن زغال‌سنگ حرارتی از نوع آنتراسیت و نیمه‌آنتراسیت که قابلیت کک‌شوندگی برای استفاده در صنایع فولاد کشور را ندارد به عنوان ناحیه مورد مطالعه انتخاب شده است. سپس کلیاتی درباره‌ی ناحیه‌ی مزینو، زمین‌شناسی،

تکتونیک و ساختمان زمین‌شناسی، وضعیت هیدروژئولوژی، زغال‌خیزی، مشخصات هندسی و کیفی زغال‌سنگ این ناحیه گفته شده است.

در پایان، لایه‌ی M26 با توجه به معیارها و محدودیت‌های ذکر شده در فصل دوم، به عنوان لایه‌ی امیدبخش انتخاب شده است. از آنجا که لایه‌ی امیدبخش در عمق کم (۱۵۰ متر) قرار دارد؛ برای آماده‌سازی چاه‌های تزریق و تولید روش‌های احتراقی و حفاری جهت‌دار و برای گاز کردن زیرزمینی زغال‌سنگ روش‌های چاه قائم و CRIP پیشنهاد شده است.

فصل پنجم:

بررسی عوامل مؤثر بر نشت گاز از راکتور UCG

۵-۱- مقدمه

همان طور که استخراج و مصرف زغال سنگ قدمت تاریخی دارد؛ مشکلات زیست محیطی آن نیز ریشه‌ی تاریخی دارد. در قرون گذشته که کاربرد زغال سنگ به عنوان سوخت رواج بیشتری داشت؛ مسایل زیست محیطی آن نیز در همین محدوده بود. ولی امروزه به دلیل کاربردهای متعدد و وسیع زغال سنگ، مخاطرات زیست محیطی آن نیز متنوع است. به طور کلی زغال سنگ در طی مراحل متعدد، از استخراج تا فرآوری و کاربرد، محیط زیست را به صورت‌های مختلف تحت تأثیر قرار می‌دهد.

در روش استخراج UCG، در مراحل نظیر احداث تأسیسات و کارخانه‌ها، گاز کردن زغال سنگ و رفت و آمد، همگی ممکن است باعث بر هم زدن تعادل حیات وحش، پوشش گیاهی و مراتع، آلودگی محیط زیست و تخریب سطح زمین شوند. مهم‌ترین مخاطرات زیست محیطی ناشی از استخراج زغال سنگ به روش UCG را آلودگی هوا، آلودگی آب‌های زیرزمینی و سطحی، خودسوزی کنترل نشده لایه‌ی زغال سنگ و نشست سطح زمین تشکیل می‌دهند.

در این فصل نخست به بررسی مخاطرات زیست محیطی ناشی از کاربرد روش استخراج UCG اشاره خواهد شد. سپس از آنجا که یکی از مهم‌ترین مخاطرات زیست محیطی روش استخراج UCG، نشت گاز از درون راکتور زیرزمینی و آلودگی‌های ناشی از آن است؛ به بررسی عوامل مؤثر بر نشت گاز پرداخته خواهد شد.

۵-۲- مخاطرات زیست محیطی روش استخراج UCG

مخاطرات زیست محیطی ناشی از روش استخراج UCG که در این جا بررسی خواهند شد شامل نشست سطح زمین، خودسوزی کنترل نشده لایه ی زغال سنگ، آلودگی آب و آلودگی هوا است.

۵-۲-۱- نشست سطح زمین

یکی از مخاطرات مرتبط با روش استخراج UCG، نشست سطح زمین است. همزمان با گسترش راکتور UCG، سقف راکتور در اثر بار روباره ناپایدار می شود. سقف ممکن است تخریب شده و به صورت کلی یا جزئی به درون راکتور ریزش کند. اثر این تخریب ممکن است تا سطح زمین گسترش یافته و باعث نشست سطح زمین شود. نشست سطح زمین باعث آسیب رساندن به سازه های موجود در سطح زمین، تغییر وضعیت خاک، تغییر جریان آب های زیرزمینی و افزایش امکان نشت گاز و انتشار آلاینده ها می شود (Evans, 1986). نشست سطح زمین در روش استخراج UCG بستگی به عمق لایه، ضخامت لایه، خصوصیات ژئومکانیکی سنگ ها، هندسه ی راکتور، شیوه ی تخریب راکتور و تنش حرارتی دارد.

۵-۲-۲- خودسوزی کنترل نشده لایه ی زغال سنگ

کاهش ارزش حرارتی گازهای استخراج شده نشان دهنده پایان عمر راکتور است. پس از به پایان رسیدن عمر راکتور، تزریق اکسیدان به درون راکتور قطع شده و راکتور به آرامی خاموش می شود. اگر راکتور به منبع اکسیژن دسترسی داشته باشد، راکتور خاموش نشده و سوختن و یا گاز شدن زغال سنگ ادامه می یابد که به آن خودسوزی زغال سنگ گفته می شود. دسترسی راکتور به منبع اکسیژن از طریق مجراهای مانند گسل ها، گالری ها، تونل ها، چاه های معادن متروکه مجاور و گمانه ها می تواند باشد.

آتش‌سوزی لایه‌ی زغال‌سنگ خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی و سطحی و آلودگی هوا را افزایش می‌دهد (Evans, 1986). خطر خودسوزی لایه‌های عمیق‌تر کم‌تر است (Dennis, 2006). سیستم‌های حفاظتی با تزریق آب و یا نیتروژن برای اطفاء حریق راکتور به کار می‌رود (Gujarat Industries Power Co, 2009).

۵-۲-۳- آلودگی آب‌های زیرزمینی

یکی دیگر از اثرهای زیان‌بار استخراج با روش UCG، تخریب سفره‌های آب زیرزمینی از نظر کیفیت آب و حجم سفره آب زیرزمینی است. آلودگی آب‌های زیرزمینی در این روش به دو صورت نشت گاز و انتشار پساب است (Evans, 1986). پساب‌ها از انحلال مواد تولید شده در اثر فرآیند گاز کردن و مواد معدنی همراه زغال‌سنگ (شامل کمپلکس فلزات و آنیون‌ها) تشکیل می‌شوند. این آلاینده‌ها ممکن است وارد چرخه محیط زیست شده و سلامت انسان‌ها و موجودات دیگر را به خطر بیندازند (DTI, 2004). برای نمونه، در کارگاه استخراج هوکریک، فنول با غلظت زیاد در ۴ کیلومتری راکتور مشاهده شده است (Evans, 1986). آتش‌سوزی کنترل نشده لایه‌ی زغال‌سنگ، نشست سطح زمین، نشت از طریق گسل‌ها و دیگر مجراها، آلودگی آب‌های زیرزمینی را تشدید می‌کنند. به هر حال، برای کاهش آلودگی سفره‌های آب زیرزمینی، به ویژه سفره‌های آب شرب، از جانمایی راکتور استخراج در نزدیکی آن‌ها باید اجتناب کرد.

۵-۲-۴- آلودگی آب‌های سطحی

آب‌های سطحی در نزدیکی راکتور UCG ممکن است از طریق رخنمون‌ها و چشمه‌های موجود در نزدیکی راکتور UCG که از سفره‌های زیرزمینی آلوده تغذیه می‌شوند و پمپاژ آب آلوده و انتقال آن به سطح زمین آلوده شوند (Evans, 1986).

۵-۲-۵- آلودگی هوا

امروزه یکی از مسایل زیست‌محیطی جهان، آلودگی هوا و به دنبال آن گرم شدن کره زمین است. مصرف زغال‌سنگ از دیرباز به عنوان سوخت بیشترین اثر را در آلودگی محیط زیست و به ویژه هوا به دلیل تولید دود داشته است. انتشار گاز در هر دو روش UCG و SCG وجود دارد که بیشتر در نوع SCG، گازهای خروجی دودکش‌ها سهم عمده‌ای دارند و در روش UCG نشت گاز از راکتور زیرزمینی و همچنین آلودگی‌های کارخانجات سطحی دارای بیشترین اثر هستند. همان طور که اشار شد، نشت گاز از راکتور UCG باعث آلودگی آب‌هایی زیرزمینی، هوا و کاهش تولید گاز می‌شود. مهم‌ترین ترکیبات قابل انتشار در هوا در فرآیندهای UCG شامل CH_4 ، CO_2 ، CO و NH_3 هستند (Gujarat Industries Power Co, 2009).

۵-۳- عوامل مؤثر بر نشت گاز از راکتور استخراج UCG

از عوامل مؤثر بر نشت گاز از راکتور UCG می‌توان به تخلخل و نفوذپذیری سنگ، شیوه‌ی گسترش راکتور و تخریب سقف راکتور، اثر راکتورهای‌های مجاور، ضخامت لایه، عمق لایه، آب‌های زیرزمینی، فشار راکتور و درجه حرارت گاز اشاره کرد. از عوامل فوق فشار و درجه حرارت راکتور برای جلوگیری از نشت گاز قابل کنترل هستند. در ادامه به بررسی عوامل مؤثر بر نشت گاز از راکتور UCG پرداخته می‌شود.

۵-۳-۱- تخلخل و نفوذپذیری سنگ

محیط متخلخل^۱، ماده‌ای شامل پیکره جامد با فضاهای خالی است. پیکره، ماده‌ی جامد و صلبی است که دگرشکلی بسیار ناچیزی را تحمل می‌کند. جریان یک یا چند سیال و در یک یا دو فاز (مایع و گاز) از طریق ارتباط بین فضاهای خالی در محیط متخلخل میسر است. توزیع اندازه و شکل خلخل و فرج

^۱ - Porous Media

در یک محیط متخلخل، نامنظم است. زمانی که مقیاس مسأله کوچک است، ناظر تنها یک یا چند مجرا، بازشدگی و حفره را مشاهده می‌کند که در این مورد علم مکانیک سیالات معمولی برای انتقال جرم و حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرد. ولی اگر مقیاس مسأله بسیار بزرگ باشد، مجراها و حفرات زیادی در محیط ممکن است وجود داشته باشند؛ بنابراین قانون جریان سیال با استفاده از روش‌های متداول بسیار پیچیده خواهد بود. به همین برای، یک میانگین حجمی و اندازه‌گیری کلی (نفوذپذیری یا هدایت هیدرولیکی) برای توصیف جریان سیال و ساده‌سازی مدل استفاده می‌شود (Nield and Bejan, 2006). نفوذپذیری مهم‌ترین ویژگی فیزیکی یک محیط متخلخل است. نفوذپذیری، توانایی محیط متخلخل به هدایت جریان سیال است (Peng and Zhang, 2007). نفوذپذیری یکی از مشخصه‌های مهم توده‌سنگ است که بر فشار آب روزنه‌ای، سطح آب زیرزمینی، نرخ جریان آب و یا تودسنگ‌های دربرگیرنده فضاهای زیرزمینی تأثیر به سزایی دارد (فاروق حسینی، ۱۳۷۸). در ادامه به بررسی تخلخل و نفوذپذیری سنگ‌ها و زغال‌سنگ و عوامل مؤثر بر نفوذپذیری پرداخته خواهد شد.

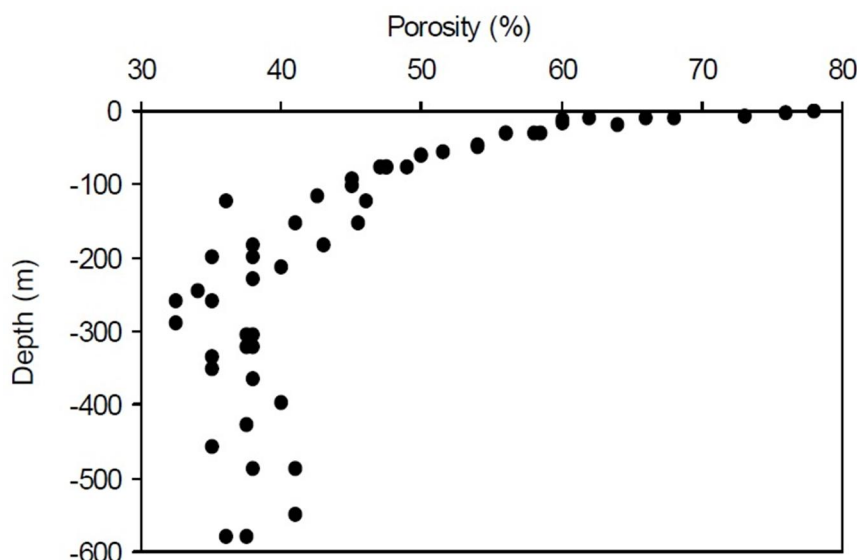
۵-۳-۱-۱- تخلخل سنگ‌های رسوبی

سنگ، ماده‌ای متخلخل است. تخلخل سنگ، به صورت کسری از حجم کل سنگ که توسط منافذ اشغال شده است، تعریف شده و با نماد ϕ و معمولاً به صورت درصد بیان می‌شود. در تعریف ϕ فرض بر این است که تمام فضاهای خالی با هم در ارتباط هستند (Nield and Bejan, 2006).

$$\phi = \frac{V_{Pores}}{V_{Rock}} \times 100 \quad ۱-۵$$

تخلخل سنگ بستگی به خواص مکانیکی سنگ مانند فشردگی، دگرشکلی، رسوب‌گذاری، توزیع اندازه دانه‌ها، شکل دانه‌ها، استحکام دانه‌ها، آرایش دانه‌ها و درجه تراکم آن‌ها دارد (Peng and Zhang, 2007). سنگ ممکن است در تحولات پیاپی تغییر شکل داده و در آن درزه و ترک ایجاد شود. یا برخی از

کانی‌های تشکیل دهنده‌ی آن حل شده و یا دستخوش تغییرات شیمیایی شود که موجب کاهش یا افزایش تخلخل می‌شود (فاروق حسینی، ۱۳۷۸). شکل ۱-۵ رابطه‌ی بین تخلخل سنگ و عمق در مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود، تخلخل سنگ با افزایش عمق کاهش می‌یابد.



شکل ۱-۵: رابطه‌ی بین تخلخل و عمق (Peng and Zhang, 2007).

در آزمایش‌های انجام شده در بخش شمالی دریای شمال^۱ روابط ۲-۵ و ۳-۵ به ترتیب برای برآورد

تخلخل ماسه‌سنگ و شیل بر حسب عمق به دست آمده است (Peng and Zhang, 2007):

$$\varphi = 0.49e^{-2.7 \times 10^{-4}Z} \quad \text{۲-۵}$$

$$\varphi = 0.803e^{-5 \times 10^{-4}Z} \quad \text{۳-۵}$$

تخلخل برخی از سنگ‌های رسوبی در جدول ۱-۵ نشان داده شده است.

^۱ - Northern North Sea

جدول ۵-۱: تخلخل برخی از سنگ‌های رسوبی (Nield and Bejan, 2006; Doyle, 2001).

ردیف	نوع سنگ	تخلخل (درصد)
۱	شیل	۰ تا ۱۰
۲	ماسه‌سنگ	۵ تا ۳۰
۳	سیلت‌استون	۲۱ تا ۴۱
۴	زغال‌سنگ	۲ تا ۱۲
۵	سنگ آهک و دولومیت	۰ تا ۱۰
۶	دولومیت کارستی	۵ تا ۵۰

۵-۳-۱-۲- نفوذپذیری زغال‌سنگ

زغال‌سنگ یک ماده متخلخل حاوی منافذ، درزه و ترک است. تخلخل و نفوذپذیری زغال‌سنگ از عوامل مؤثر در فیلتراسیون گاز، نشت گاز و تراوش آب در روش استخراج UCG در موقع گاز کردن است. پیکره‌ی زغال‌سنگ نفوذناپذیر است؛ ولی درون زغال‌سنگ برجا ریزترک‌هایی^۱ وجود دارد. ریزترک‌ها از زمان رسوب‌گذاری، دیاژنز و به طور کلی در کل فرآیند تشکیل زغال‌سنگ به وجود آمده و باعث افزایش نفوذپذیری زغال‌سنگ می‌شود (DTI, 2004).

عوامل زیادی مانند نوع زغال‌سنگ، تنش مؤثر، مقدار شکستگی، نوع گاز، فشار گاز و آب بر نفوذپذیری اثر می‌گذارند. نفوذپذیری لایه‌ی زغال‌سنگ با افزایش تنش‌های مؤثر، افزایش بار روباره و افزایش رطوبت کاهش می‌یابد (Sereshki, 2005). نفوذپذیری زغال‌سنگ در نزدیکی چین‌خوردگی‌ها، گسل‌ها و دایک‌ها افزایش یافته و امکان خطر نشت گاز از راکتور UCG افزایش می‌یابد. اگر چه نفوذپذیری زغال‌سنگ در نزدیکی راکتور با شکستگی ناشی از افزایش تنش تشدید می‌شود؛ ولی نفوذپذیری زغال‌سنگ در فاصله‌ی دورتر از راکتور، به علت افزایش عمق، کاهش یافته و امکان انتقال آلاینده‌ها به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد (DTI, 2004).

^۱ - Cleat

نفوذپذیری زغال سنگ‌های جوان‌تر مانند لیگنیت و زغال سنگ قهوه‌ای نسبت به آنتراسیت بیشتر بوده و به راحتی تبدیل به گاز می‌شوند (Ray *et al.*, 2010). نفوذپذیری زغال سنگ توسط والاسه^۱ بین ۱ تا ۶۰ میلی‌داریسی (Sereshki, 2005) و توسط استون^۲ و همکاران در لایه‌های زغال سنگ افقی و قائم به ترتیب ۲۳۰ و ۲۳ میلی‌داریسی برآورد شده است. نفوذپذیری با صرف نظر از نوع سنگ در سنگ آسیب دیده تا ۱۰۰ میلی‌داریسی است (Buscheck and Hao, 2009). نه تنها نفوذپذیری و تخلخل خود زغال سنگ، بلکه سنگ‌های اطراف آن که عمدتاً ماسه سنگ و سیلت استون هستند، باید بررسی شود.

اندازه‌گیری نفوذپذیری گاز در سنگ‌های در برگیرنده راکتور UCG کاری بس پرهزینه و تقریباً غیرممکن است (DTI, 2004)؛ به همین دلیل این ضریب در آزمایشگاه اندازه‌گیری می‌شود. معمولاً در سنگ‌های بسیار درزه‌دار می‌توان از نفوذپذیری ماده سنگ در مقایسه با توده سنگ صرف نظر کرد. بنابراین نفوذپذیری سنگ ترکیبی از نفوذپذیری ماده سنگ و توده سنگ است (فهیمی فر و سروش، ۱۳۸۲). ضریب نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی برخی از سنگ‌های رسوبی برجا در جدول ۵-۲ آورده شده است.

جدول ۵-۲: هدایت هیدرولیکی برخی از سنگ‌های رسوبی برجا (Singh and Goel, 1999).

ردیف	نوع سنگ	هدایت هیدرولیکی (متر بر ثانیه)
۱	دولومیت	$۱۰^{-۱۱} \times ۴/۶$ تا $۱۰^{-۱۰} \times ۱/۲$
۲	سنگ آهک	$۱۰^{-۶}$ تا $۱۰^{-۴}$
۳	ماسه سنگ	$۱۰^{-۶}$ تا $۱۰^{-۴}$
۴	شیل	$۱۰^{-۶}$ تا $۱۰^{-۵}$

۵-۳-۱-۳- عوامل مؤثر بر نفوذپذیری

نفوذپذیری سنگ‌ها به شدت وابسته به ارتباط بین فضاها یا خالی سنگ، اندازه ذرات سنگ و

^۱ - Wallace

^۲ - Stone

سیمانی شدن بین ذرات سنگ است. یک سنگ به شدت می‌تواند متخلخل باشد، ولی اگر هر منفذی جدا از دیگری باشد، سنگ نفوذناپذیر محسوب می‌شود (Peng and Zhang, 2007).

نفوذپذیری هم مانند تخلخل با افزایش عمق به دلیل افزایش اثر فشردگی و سیمانی شدن سنگ کاهش می‌یابد. درجه هوازده‌گی بر این دو خاصیت سنگ اثر می‌گذارد. افزایش هوازده‌گی معمولاً باعث افزایش تخلخل و نفوذپذیری است (DTI, 2004).

درزه و ترک‌ها در ماسه‌سنگ نسبت به دیگر سنگ‌های رسوبی بیشتر است؛ بنابراین نفوذپذیری ماسه‌سنگ بیشتر از بقیه سنگ‌های رسوبی می‌باشد. هوازده‌گی، تنش‌های کششی (بارگذاری و بازدهی درزه و ترک‌ها) و خالی ماندن فضای بین ذرات باعث افزایش نفوذپذیری ماسه‌سنگ‌ها و عدم وجود ترک‌های ریز، سیمانی شدن مطلوب، کانی‌سازی مجدد و پرشدگی بین ذرات ماسه‌سنگ باعث کاهش نفوذپذیری آن می‌شود. با افزایش عمق، نفوذپذیری ماسه‌سنگ کاهش می‌یابد. البته کاهش نفوذپذیری ماسه‌سنگ نسبت به کاهش نفوذپذیری زغال‌سنگ‌ها با افزایش عمق، خیلی کمتر است. میانگین هدایت هیدرولیکی ماسه‌سنگ، حدود $10^{-7} \times 1/7$ متر بر ثانیه است (DTI, 2004).

بازدهی ماسه‌سنگ‌ها به طور معمولی خیلی بیشتر از ماداستون است. نفوذپذیری سنگ‌آهک بیشتر وابسته به گسترش درزه‌ها، تأثیر هوازده‌گی و انحلال است. درز و ترک‌ها موجود در ماداستون به علت ویژگی تورم‌پذیری طبیعی کانی‌های رسی، ممکن است مسدود شده و نفوذپذیری آن کاهش یابد (DTI, 2004).

مهم‌ترین شکستگی‌های طبیعی یا مصنوعی پیرامون راکتور UCG که باعث افزایش نفوذپذیری و نشت گاز از راکتور می‌شود؛ شامل لایه‌های ترک‌دار و نفوذپذیر ماسه‌سنگ، درزه‌ها و ریزترک‌های موجود در زغال‌سنگ، گسل‌ها، دایک‌ها و سیل‌های آذرین، سازندهای کارستی، سنگ‌های تخریب شده و گمانه‌های رها شده است (DTI, 2004).

عملیات UCG در اعماق زیاد قابل کنترل بوده و حتی در بدترین وضعیت، خطر نشت گاز کوتاه مدت است؛ مگر در مواردی که نفوذپذیری زیاد باشد. عمق راکتور برای اجتناب از نشت گاز باید بیش از ۱۰۰ متر بوده و روباره با نفوذپذیری کم باشد (Ray *et al.*, 2010). روباره‌های رسی و شیلی در برابر نشت گاز مناسب‌تر بوده و روباره‌های ماسه‌سنگی نامناسب‌تر هستند (Yeary, 1987).

۵-۳-۱-۴-آزمون‌های آزمایشگاهی نفوذپذیری در سنگ

چندین روش برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی توده‌سنگ با استفاده از روابط تجربی وجود دارد. اساس این روش‌ها بر این استوار است که با افزایش عمق، نفوذپذیری کاهش می‌یابد. این روابط که ساده‌ترین روش برای محاسبه هدایت هیدرولیکی زیر سطح زمین هستند در جدول ۵-۲ آورده شده است (Hsu *et al.*, 2011). همچنین در شکل ۵-۲ هدایت هیدرولیکی توده‌سنگ‌ها دیده می‌شود.

جدول ۵-۳: روابط تجربی محاسبه‌ی نفوذپذیری توده‌سنگ (Hsu *et al.*, 2011).

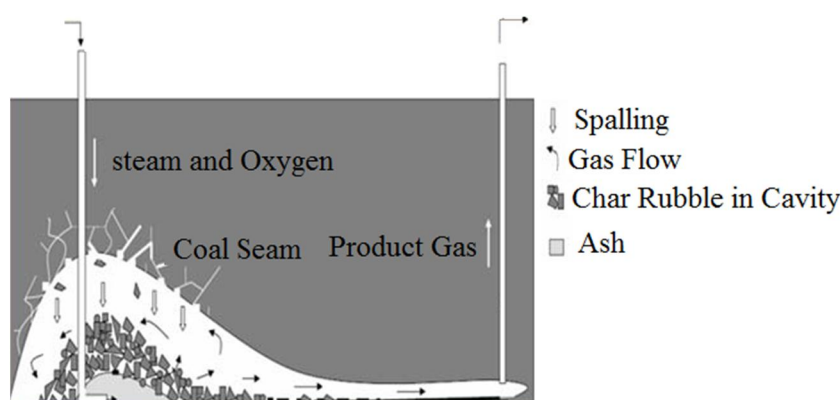
ردیف	رابطه	ضریب‌ها	ارائه دهنده
۱	$\log k = -8.9 - 1.671 \log Z$	k نفوذپذیری (ft^2) و Z عمق (ft)	Snow (1970)
۲	$K = 10^{-(1.6 \log Z + 4)}$	K هدایت هیدرولیکی (m/s) و Z عمق (m)	Carlson and Olsson (1977)
۳	$\log K = 5.57 + .352 \log Z - 0.978 (\log Z)^2 + 0.167 (\log Z)^3$	K هدایت هیدرولیکی (m/s) و Z عمق (m)	Burgess (1977)
۴	$K = K_i [1 - Z / (58.0 + 1.02Z)]^3$	k نفوذپذیری (ft^2) و Z عمق (ft)	Wei <i>et al.</i> (1995)

۵-۳-۲-گسترش راکتور UCG و تخریب سقف راکتور

در این بخش به بررسی گسترش راکتور UCG، هندسه‌ی راکتور UCG و نحوه‌ی تخریب راکتور UCG پرداخته می‌شود.

۵-۳-۱- گسترش راکتور UCG

کانال اتصال بین چاه‌های تزریق و تولید باید در کف لایه‌ی زغال‌سنگ حفر شود. حفر کانال در کف لایه‌ی زغال‌سنگ، امکان فرآیند گاز کردن مناسب زغال‌سنگ را فراهم می‌کند. نخست با تزریق اکسیدان، زغال‌سنگ موجود در کف لایه از نزدیک نقطه‌ی تزریق تبدیل به گاز شده و راکتوری ایجاد می‌شود. راکتور به سرعت با تخریب و ریزش زغال‌سنگ موجود در نیمه بالایی لایه به طرف بالا گسترش می‌یابد که به سقف راکتور برسد. در لایه‌های ضخیم‌تر، زغال‌سنگ موجود در نیمه بالای لایه به دلیل ناپایداری به درون راکتور ریزش می‌کند، ولی اگر لایه خیلی ضخیم باشد ممکن است مقداری از زغال‌سنگ نیمه بالایی تبدیل به گاز نشود (Sathaiah *et al.*, 2010). شکل ۵-۲، شیوه‌ی گسترش راکتور UCG را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲: شیوه‌ی گسترش راکتور UCG (Aghalayam, 2009).

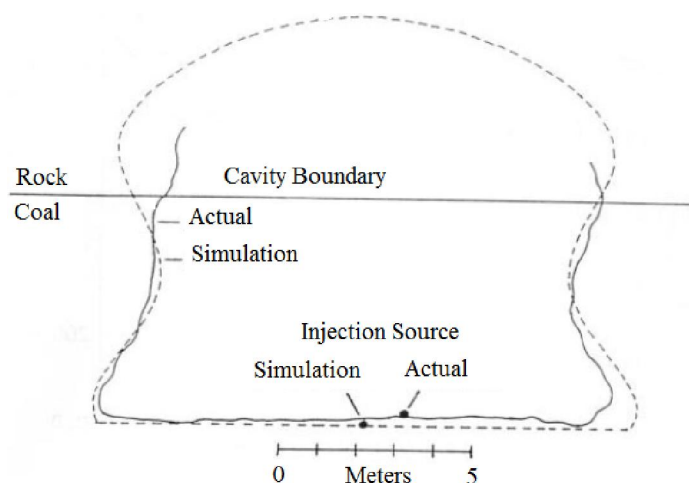
حفاری جهت‌دار چاه‌ها در روش استخراج UCG پرهزینه است. بنابراین، بهتر است که حداکثر حجم زغال‌سنگ بین چاه‌ها تبدیل به گاز شود. با افزایش طول راکتور UCG، عمر راکتور افزایش یافته و تکرار عملیات حفاری کاهش می‌یابد. برای این که فرآیند در لایه‌های زغال‌سنگ نازک اقتصادی باشد، باید راکتوری ایجاد شود که گسترش جانبی آن خیلی بیشتر از ضخامت لایه باشد. این اصلی‌ترین چالش در گاز کردن لایه‌های زغال‌سنگ با ضخامت کم است (Biezen, 1996). طبق گزارش گروه کاری اروپا^۱

^۱ - European Working Group

(EWG)، برآورد نسبت عرض راکتور به طول راکتور در لایه‌ی زغال‌سنگ خاص، تحت فشار روباره، با علوم امروزی امکان‌پذیر نیست و نیاز به پژوهش‌های بلند مدت دارد. این نسبت توسط EWG، تقریباً بین ۰/۰۶ تا ۰/۱ برآورد شده است (Creedy *et al.*, 2001).

۵-۳-۲- هندسه‌ی راکتور UCG

در گذشته فرض بر این بود که فرآیند UCG در یک محیط متخلخل با نفوذپذیری زیاد درون لایه‌ی زغال‌سنگ انجام می‌شود، ولی بعداً پی برده شد که در طول فرآیند UCG، کانالی استوانه‌ای شکل ایجاد شده و فرآیند UCG درون این کانال انجام می‌شود (Nourozieh *et al.*, 2010B). این کانال به تدریج به یک راکتور گلابی شکل تبدیل می‌شود (Kapusta and Stanczyk, 2010). زمانی که قطر راکتور بیشتر از ضخامت لایه باشد؛ مقطع راکتور تقریباً به شکل چهار گوش در می‌آید (Shirsat, 1989). عرض راکتور فعال UCG حداقل پنج برابر ضخامت لایه و ارتفاع آن بیش از دو برابر ضخامت لایه است (Gujarat Industries Power Co, 2009). شکل ۳-۵ مقطع راکتور UCG واقعی و مدل‌سازی شده در روش CRIP را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۵: مقطع راکتور UCG واقعی و مدل‌سازی شده در روش CRIP (Burton *et al.*, 2007).

۵-۳-۲-۳- تخریب سقف راکتور

مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر چگونگی گسترش راکتور؛ واکنش‌های شیمیایی، شکست ترمومکانیکی، ریزش سقف و دیواره راکتور است. در این مکانیسم فرض می‌شود که زغال‌سنگ یا سایر سنگ‌های رسوبی در اثر درزه و شکافت‌هایی که در آن ایجاد شده است به درون راکتور ریزش می‌کنند و این عامل اصلی گسترش راکتور است.

نشست سقف به گسترش جانبی راکتور کمک می‌کند. با تخریب مناسب سقف و فشردگی سریع ناحیه‌ی تخریب شده برای کاهش نفوذپذیری، یک نسبت عالی از عرض به طول راکتور حاصل می‌شود. نفوذپذیری نقش مؤثری در جریان گاز و گسترش راکتور ایفا می‌کند. خاکستر و زغال‌سنگ تخریب شده درون راکتور از جریان گاز جلوگیری نمی‌کند. گسترش راکتور در لایه‌ی زغال‌سنگ همگن و کم و بیش متقارن است (Biezen, 1996). میزان گسترش راکتور UCG به عواملی مانند نوع اکسیدان‌ها، زمان، فشار، دما و خصوصیات ترمو-هیدرو-شیمیایی-مکانیکی زغال‌سنگ و سنگ‌های در برگیرنده بستگی دارد (Morris et al., 2009).

سنگ‌های پیرامون راکتور نخست در فاز سرد هستند؛ سپس در معرض گاز با درجه حرارت و فشار زیاد قرار می‌گیرند (Yeary, 1987). سنگ‌ها در دمای ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تغییر شکل داده، متورم شده و افزایش حجم پیدا می‌کنند (Perkins, 2005). حرارت باعث ایجاد تنش حرارتی و شکست ترمومکانیکی می‌شود. تنش حرارتی عامل اصلی گسترش ریز ترک‌ها در سقف و دیواره راکتور است. با افزایش تنش‌های حرارتی، ترک‌ها بیشتر گسترش می‌یابند. در نهایت، در پی تخریب سقف راکتور، قطعات بزرگ سنگ^۱ به درون راکتور ریزش می‌کند (Perkins and Sahajwalla, 2006). یکی دیگر از عوامل ریزش سقف، ناپایداری آن است که با گسترش راکتور افزایش می‌یابد.

^۱ - Rubble

الگوی تغییر شکل سقف در فرآیندهای UCG و پر شدن راکتور با سنگ‌های تخریب شده در ارتباط با خواص فیزیکی و مکانیکی توده سنگ مانند خصوصیات زمین‌شناختی، ناپیوستگی‌ها و هدایت حرارتی سنگ است (Gujarat Industries Power Co, 2009).

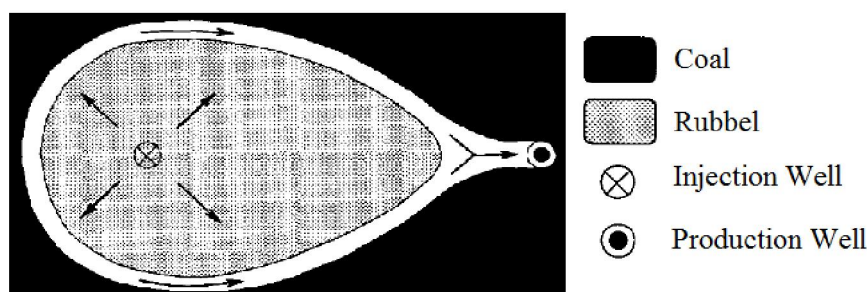
پس از استخراج یک پهنه‌ی جبهه‌کار طولانی یا کوتاه با عرض و ارتفاع کافی، لایه‌های پوششی سقف آسیب دیده و به درون فضای خالی شده ریزش می‌کند و یک فضای تخریب شده به وجود می‌آید. این فضا با وزن روباره به طور پیش‌روند فشرده می‌شود. راکتور ایجاد شده با روش UCG، همانند روش استخراج جبهه‌کار طولانی زغال سنگ به ناچار باید تخریب شود (Younger et al., 2010).

پایه‌ای از سنگ‌های تخریب شده به علت تخریب و نشست پوش سنگ در کف راکتور تشکیل می‌شود. اگر نرخ تخریب سنگ زیاد بوده و نشست کامل رخ دهد؛ راکتور کاملاً پر می‌شود. ولی ممکن است تخریب جزئی بوده و راکتور کاملاً پر نشود و برخی از بخش‌های راکتور خالی بماند. اگر سقف در برابر نشست مقاومت کند، مقداری از گازهای تزریق شده بدون شرکت در فرآیند گاز کردن با ایجاد مسیرهای فرعی^۱ از راکتور خارج شده و به دنبال آن عملکرد راکتور به شدت کاهش می‌یابد. این مسأله در راکتورهای کم عمق، به عنوان نمونه در معادن هوکریک به وقوع پیوسته است (Kuyper, 1994). شکل ۴-۵ مراحل گسترش راکتور UCG در کارگاه آزمایشی در پرایس‌تون و شکل ۵-۵ پلانی از راکتور UCG تخریب شده را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵: مراحل گسترش راکتور UCG (Kuyper, 1994).

^۱ - Bypass



شکل ۵-۵: پلانی از مدل راکتور UCG (Kuyper, 1994).

تخریب بخش جدایی ناپذیری از فرآیند UCG است و برای برقراری جریان مناسب گاز مورد نیاز است. تخریب سقف باید به اندازه کافی با اطمینان و به طور منظم انجام شود که برای تزریق اکسیدان به درون راکتور اختلال ایجاد نکند و در طول سطح زغال سنگ با آن واکنش دهد. همچنین، تخریب باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا سنگ‌های شکسته شده، فشرده شده و با سنگ‌های تخریب نشده روباره تماس برقرار کند تا از انتقال حرارت و نشت گاز از فضای تخریب شده به بیرون جلوگیری کند. اگر راکتور اولیه خیلی کوچک باشد؛ فضای تخریب به اندازه‌ی کافی برای اطمینان از افزایش حجم سنگ و پر شدن راکتور کافی نخواهد بود (Couch, 2009).

در طراحی باید به این نکته توجه کرد که تخریب نخست باید هر چه زودتر صورت گیرد. در راکتورهایی که در عمق کم و نزدیک سطح زمین قرار دارند، احتمال تخریب سقف کمتر بوده و شکستن و نشست سقف به راحتی صورت نمی‌گیرد. همچنین در این راکتورها امکان رسیدن نشست به سطح زمین و افت فشار گاز به دلیل نشت گاز وجود دارد؛ پس فشار راکتور باید کنترل شود. وجود لایه‌های متناوب و مقاوم از ماسه سنگ در بالای راکتور، امکان تخریب سقف را کاهش می‌دهد. در اعماق زیاد (بیشتر از ۵۰۰ متر) به علت افزایش تنش‌های برجا، سقف به راحتی تخریب می‌شود (Couch, 2009). جدول ۴-۵ ارتباط بین ضخامت لایه و ارتفاع مورد نیاز برای اطمینان از پر شدن کافی راکتور در نخستین تخریب سقف راکتور UCG را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۴: حداقل ارتفاع مورد نیاز برای تخریب سقف راکتور در روش استخراج UCG (Couch, 2009).

ردیف	ضخامت لایه (متر)	حداقل ارتفاع مورد نیاز برای تخریب (متر)
۱	۲	± 20
۲	۳	± 30
۳	۴	± 40
۴	۵	± 50

۵-۳-۳- اثر کارگاه‌های مجاور

استفاده از روش استخراج UCG در نواحی کار شده خطر نشت گاز را افزایش داده و کنترل و گسترش راکتور را با مشکلاتی مواجه می‌سازد (Couch, 2009). نزدیکی به معادن فعال و متروکه هم ممکن است باعث نشت گاز شود (DTI, 2004). پیش از این پیشنهاد می‌شد که کمترین فاصله از معادن فعال، $3/2$ کیلومتر و کمترین فاصله از معادن متروکه، $1/6$ کیلومتر در نظر گرفته شود (Oliver and Covell, 1989). ولی اخیراً تحقیقات انجام شده در دانشگاه کاردیف نشان داده است که فاصله‌ی افقی و قائم راکتور استخراج UCG از معادن فعال و غیرفعال می‌تواند در حدود 500 متر باشد (Couch, 2009). چاه‌های تزریق و تولید و گمانه‌های کنترل راکتور از مهم‌ترین عوامل کاهش نفوذپذیری محیط هستند که باعث افزایش خطر نشت گاز می‌شوند (DTI, 2004). بر جای گذاشتن پایه‌ای از زغال سنگ بین بلوک‌های استخراج برای جدا کردن راکتورهای مختلف، برای کاهش خطر نشت گاز در طول عملیات گاز کردن امری ضروری است (Carbon Energy Report, 2009).

۵-۳-۴- ضخامت لایه

در لایه با ضخامت بیشتر، ارتفاع فضای تخریب شده بیشتر است. درزه و ترک‌های ایجاد شده به دلیل تخریب سقف ممکن است تا سطح زمین گسترش یافته و امکان نشت گاز افزایش می‌یابد.

۵-۳-۵- عمق راکتور

همان طور که در بخش ۲-۲-۳-۲ اشاره شده است، تاکنون روش UCG در اعماق ۳۰ تا ۱۴۰۰ متر اجرا شده است. همان طور که دیده می‌شود راکتورهای UCG در طیف وسیعی از اعماق بوده است. در راکتورهایی که به سطح زمین نزدیک‌تر هستند به علت نزدیکی به سطح زمین، پوشیده شدن با لایه‌های با نفوذپذیری زیاد، رسیدن نشست سقف راکتور به سطح زمین، ایجاد مسیرهای نشت گاز و کم بودن فشار ایستابی امکان نشت گاز بیشتر از راکتورهای عمیق است.

در راکتورهای کم عمق که فشار ایستابی کمتر است، اندکی افزایش در فشار راکتور ممکن است باعث نشت گاز شود؛ ولی در راکتورها با عمق زیاد، فشار ایستابی بیشتر بوده و ایجاد یک شرایط متعادل راحت‌تر است (Couch, 2009).

۵-۳-۶- آب زیرزمینی

راکتورهای UCG معمولاً در زیر سطح ایستابی قرار داشته و در معرض آب‌های زیرزمینی هستند. اگر لایه‌ی زغال‌سنگ دارای نفوذپذیری زیاد و سنگ‌های در برگیرنده راکتور نفوذپذیر باشند، آب موجود در لایه‌های مجاور به درون راکتور تراوش می‌کند. تراوش آب به درون راکتور باعث کاهش عملکرد راکتور و کاهش کیفیت گاز تولید شده می‌شود (Oliver and Covell, 1989).

اگر فشار راکتور کمتر از فشار آب‌های زیرزمینی باشد، آب‌های زیرزمینی به درون راکتور تراوش می‌کنند. برای جلوگیری از تراوش آب به درون راکتور باید فشار راکتور بزرگتر یا مساوی فشار ایستابی باشد. گاز با فشار، آب‌های زیرزمینی را از درزه و ترک‌های موجود در سنگ به عقب رانده و با سرعت به بیرون از ناحیه‌ی آبدار نشت می‌کند (DTI, 2004).

در راکتورهای نزدیک به سطح زمین که فشار ایستابی ناچیز است؛ حتی افزایش گذرا در فشار

راکتور باعث نشت گاز می‌شود. فشار ایستایی با افزایش عمق در حدود ۰/۰۱ مگاپاسکال بر متر برای آب تازه و برای سفره‌های شور اشباع شده ۰/۰۱۲ مگاپاسکال بر متر افزایش می‌یابد. یعنی در عمق ۱۰۰ و ۱۰۰۰ متر، فشار ایستایی به ترتیب تقریباً ۱ و ۱۰ مگاپاسکال است (Couch, 2009).

۵-۳-۷- فشار راکتور UCG

یکی از مهم‌ترین عوامل قابل کنترل برای جلوگیری از نشت گاز درون راکتور در مدت زمان عملیات فرآیند UCG کنترل فشار راکتور است. اگر فشار راکتور و نیز نیروی بویانسی از فشار ایستایی محدود کننده تجاوز کند، گازهای تولید شده به درون لایه‌های دربرگیرنده نفوذ می‌کند (Covell and Thomas, 1996؛ Dennis, 2006). فشار راکتور توسط اپراتور با تنظیم سرعت تزریق اکسیدان متناسب با نرخ استخراج و توسط شیر چاه تولید کنترل می‌شود (Moorhouse et al., 2010). به عنوان نمونه، در کارگاه چینچیل در عمق ۱۴۰ متر فشار راکتور ۱ مگاپاسکال، در ال‌ترم‌دال در عمق ۵۶۰ متر فشار راکتور ۵/۲ مگاپاسکال و در زولین در عمق ۸۶۰ متر فشار راکتور بیش از ۱۰ مگاپاسکال بوده است (DTI, 2004). مطالعات اقتصادی و زیست‌محیطی نشان می‌دهند فشار راکتور UCG باید بین ۱ تا ۵ مگاپاسکال باشد (Perkins and Sahajwalla, 2006).

۵-۳-۸- درجه حرارت راکتور UCG

درجه حرارت راکتور معمولاً بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ سانتی‌گراد است (Perkins, 2005). دما نقش مهمی در انتقال گاز از یک محیط متخلخل ایفا می‌کند. در گاز کردن زغال‌سنگ، نفوذپذیری ذاتی سنگ‌های در بر گیرنده راکتور در پهنه‌ی گاز کردن تابعی از دما است (Yang and Zhang, 2009).

۵-۴- جمع‌بندی

برای گسترش راکتور UCG، راکتور به ناچار باید تخریب شود. در اعماق زیاد (بیشتر از ۵۰۰ متر) به علت افزایش تنش‌های برجا، سقف به راحتی تخریب می‌شود. پهنای راکتور UCG حداقل پنج برابر ضخامت لایه و ارتفاع آن بیش از دو برابر ضخامت لایه گسترش می‌یابد.

در این فصل مخاطرات زیست‌محیطی ناشی از روش استخراج UCG بررسی شده است. یکی از مخاطرات که باعث آلودگی هوا می‌شود؛ نشت گاز از راکتور UCG است. عواملی مانند تخلخل و نفوذپذیری سنگ‌های رسوبی، شیوهی تخریب راکتور، اثر راکتورهای مجاور، ضخامت و عمق لایه، آب زیرزمینی، فشار و درجه حرارت راکتور بر نشت گاز از راکتور UCG مؤثر هستند. از بین عوامل فوق فشار و تا حدی درجه حرارت راکتور قابل کنترل هستند.

تقریباً ۳۰ برابر ضخامت لایه روی راکتور ناحیه‌ای به وجود می‌آید که نفوذپذیری آن افزایش یافته است. ضخامت ناحیه با نفوذپذیری زیاد حدوداً ۲ برابر ضخامت لایه بوده و بالای آن نفوذپذیری به شدت کاهش می‌یابد. برای کنترل نشت گاز، فاصله‌ی افقی و قائم راکتور UCG از معادن فعال و غیرفعال باید بیشتر از ۵۰۰ متر باشد. نشت گاز از راکتورهای کم عمق بیشتر از راکتورها با عمق زیاد است. با افزایش فشار و درجه حرارت راکتور امکان نشت گاز افزایش می‌یابد.

فصل ششم:

مدل سازی و تحلیل نشت گاز از راکتور UCG

۶-۱- مقدمه

در فصل چهارم لایه ی M26 از ناحیه ی زغال دار مزینو به عنوان لایه ی مناسب برای استخراج به روش UCG انتخاب شده است. در این فصل هدف، مدل سازی و محاسبه ی دبی نشت گاز و تحلیل پارامتری و حساسیت نشت گاز از راکتور UCG است. به این منظور، نخست راکتور UCG از لحاظ هندسی طراحی و در نرم افزار Gambit (یکی از متداول ترین ابزار برای تولید شبکه در مسایل CFD) مدل هندسی آن ایجاد می شود. پس از ترسیم هندسه و مش بندی مدل در نرم افزار، شرایط مرزی و نواحی درونی تعیین می شود. برای مدل سازی عددی نشت گاز از نرم افزار Fluent به دلیل قابلیت مدل سازی جریان در محیط های متخلخل به روش عددی استفاده می شود. با توجه به دبی گاز تولید شده که از روی مقدار زغال سنگ گاز شده به دست می آید درصد گاز نشت شده از راکتور محاسبه خواهد شد.

در پایان حساسیت مدل در برابر اثر درجه حرارت و فشار درون راکتور که از عوامل قابل کنترل هستند و عمق راکتور و اثر نفوذ پذیری سنگ های پیرامون راکتور سنجیده خواهد شد.

۶-۲- روش های حل مسایل مکانیک سیالات

مطالعه‌ی فرآیندهای جریان سیالات و انتقال حرارت در صد سال اخیر به دو روش آزمایشگاهی و روش حل تئوری انجام شده است. اطلاعات دقیق فرآیند فیزیکی، غالباً با اندازه‌گیری عملی به دست می‌آید. بسیاری از آزمایش‌ها به دلیل بزرگ بودن مدل مورد آزمایش گران خواهند بود؛ بنابراین آزمایش مورد نظر باید روی مدلی با مقیاس کوچکتر از نسخه اصلی انجام شود که در بسیاری از موارد مشکلات اندازه‌گیری وجود داشته و وسایل اندازه‌گیری هم عاری از خطا نیستند. روش‌های حل تئوری شامل دو روش حل تحلیلی^۱ و روش حل عددی^۲ هستند. از مزایای روش‌های حل تئوری می‌توان به مدل‌سازی شرایط واقعی مسأله، دستیابی به اطلاعات بیشتر، سرعت بیشتر و هزینه‌ی کمتر اشاره کرد (Versteeg and Malalasekera, 1995).

با پیشرفت فن‌آوری، پژوهشگران بر آن شدند که با روش‌های تحلیلی، مسایل را مورد بررسی قرار دهند؛ ولی پیچیدگی مسایل در بسیاری موارد به حدی بود که برای مسایل، حل دقیق حاصل نمی‌شد. در نتیجه، روش حل عددی توسط پژوهشگران به کار گرفته شد و نتایج به دست آمده نشان داد که این روش‌ها می‌تواند جوابگوی نیاز آن‌ها باشد. هر چه پدیده پیچیده باشد، روش‌های عددی اهمیت زیادیتری پیدا می‌کنند. امروزه با دسترسی به رایانه‌های قوی، در بسیاری از موارد تحلیل دینامیک سیالات و انتقال حرارت با روش‌های عددی انجام می‌پذیرد. روش‌های حل عددی که بیشتر در تحلیل مسایل جریان سیالات مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل روش‌های تفاضل محدود^۳ (FDM)، اجزاء محدود (FEM) و حجم محدود^۴ (FVM) هستند. تفاوت اصلی میان این سه روش عددی، تقریب متغیرهای جریان و فرآیند گسسته‌سازی است.

^۱ - Analytical Method

^۲ - Numerical Method

^۳ - Finite Differences Method

^۴ - Finite Volume Method

مرسوم‌ترین روش در CFD، روش حجم محدود است که در این پژوهش نیز استفاده خواهد شد. روش حجم محدود نخست به عنوان یک فرمول‌بندی تفاضل محدود گسترش یافت. بر خلاف روش‌های تفاضل محدود که مبتنی بر گسسته‌سازی بر روی شکل تفاضلی معادلات حاکم هستند، روش‌های حجم محدود مبتنی بر گسسته‌سازی بر روی شکل انتگرالی معادلات حاکم بر روی یک حجم کنترل است. در روش حجم محدود، الگوریتم حل شامل سه مرحله به صورت زیر است (Anderson, 1995):

الف) محاسبه‌ی انتگرال معادلات حاکم روی تمام حجم‌های کنترل: معادلات حاکم، بیان ریاضی سه اصل اساسی فیزیک یعنی معادله‌ی پیوستگی، معادله‌ی اندازه‌ی حرکت خطی و معادله‌ی انرژی هستند. معادله‌ی پیوستگی بیانگر قانون بقای جرم و معادله‌ی اندازه‌ی حرکت خطی نشان دهنده‌ی، قانون دوم نیوتن است.

ب) گسسته‌سازی: این عمل معادلات انتگرالی را به یک سیستم معادلات جبری تبدیل می‌کند.

ج) حل معادلات با استفاده از یک روش تکرار شونده.

در این پژوهش از نرم‌افزار Gambit برای شبکه‌بندی و از نرم‌افزار Fluent به دلیل قابلیت مدل‌سازی جریان در محیط‌های متخلخل برای حل عددی مدل استفاده شده است. به همین منظور در ادامه این دو نرم‌افزار در حد کلیات معرفی خواهد شد.

۳-۶- معرفی نرم افزارهای Gambit و Fluent

امروزه نرم‌افزار پیش‌پردازنده‌ی Gambit، متداول‌ترین ابزار برای تولید شبکه در مسایل CFD است. این نرم‌افزار برای شبکه‌بندی میدان جریان سیال و جامد به روش باسازمان و بی‌سازمان به کار می‌رود. روش کاری تولید شبکه در نرم‌افزار Gambit به این صورت است که نخست با استفاده از امکانات تولید هندسه، شکل هندسی مسأله ترسیم می‌شود. سپس هندسه‌ی ساخته شده، مش‌بندی شده و به کمک

امکانات موجود در نرم افزار، شرایط مرزی تعیین می شوند. امکان ورود و خروج انواع پوشه ها در این نرم افزار امکان ارتباط آن را با اغلب نرم افزارهای مهندسی به ویژه Fluent فراهم می سازد. پوشه ی خروجی این برنامه، با فرمان MSH. در نرم افزار Fluent فراخوانی شده و حل مسئله در آن انجام می شود (Gambit Tutorial Guide, 2004).

Fluent نرم افزاری چندمنظوره برای مدل سازی CFD جریان سیال، انتقال حرارت، انتقال جرم، واکنش شیمیایی، جریان چند فازی و پدیده های مربوط به آشفستگی است. Fluent اوج هنر برنامه نویسی برای مدل سازی جریان سیال و انتقال حرارت در هندسه های پیچیده است. این نرم افزار امکان تغییر شکل به صورت کامل و تحلیل جریان با شبکه های غیرساختاریافته را فراهم می سازد. Fluent با زبان برنامه نویسی C نوشته شده است و از تمام امکانات و انعطاف پذیری این زبان بهره می برد. از Fluent در صنایع پتروشیمی، نفت و گاز، هوا فضا، توربوماشین ها، خودرو سازی، الکترونیک، مبدل های حرارتی، برج های واحد صنعتی، تهویه مطبوع، مشعل سازی و کوره ها استفاده می شود (Fluent Tutorial Guide, 2006).

۴-۶- اطلاعات ورودی مدل سازی

اطلاعات ورودی در نرم افزار Fluent برای مدل سازی نشت گاز از راکتور شامل شبکه بندی مدل، ویژگی گاز درون راکتور، ویژگی سنگ پیرامون راکتور (محیط متخلخل)، شرایط مرزی، شرایط اولیه و زمان حل مسئله است که در ادامه بررسی خواهد شد.

۴-۶-۱- شبکه بندی مدل

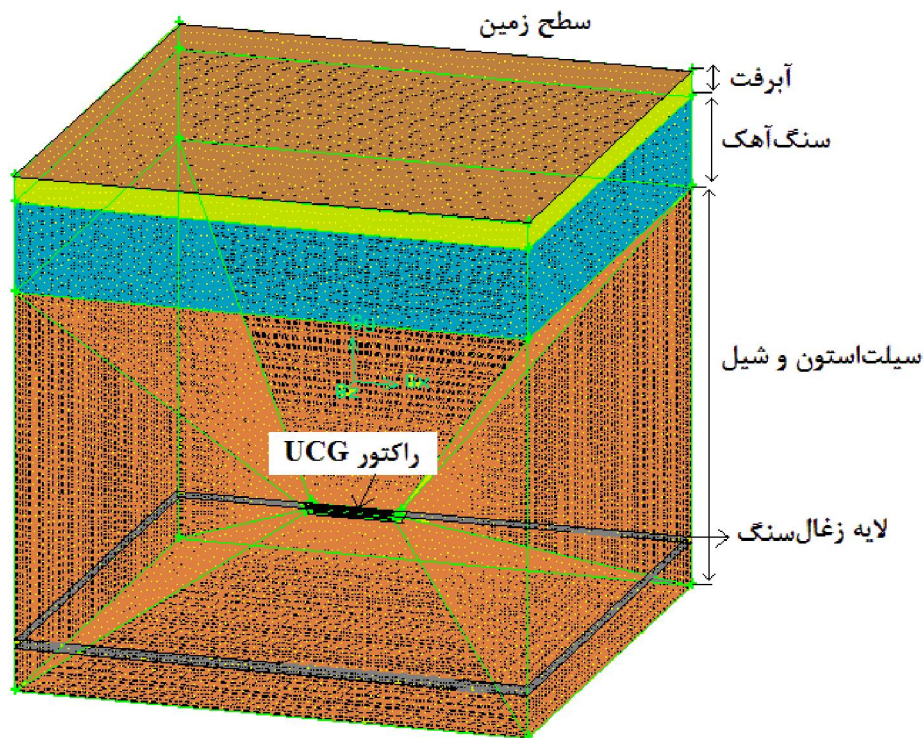
همان طور در بخش ۴-۹ اشاره شد؛ لایه ی M26 از ناحیه ی زغال دار مزینو به عنوان لایه ی مناسب

برای استخراج به روش UCG انتخاب شده است. این لایه شیب دار بوده و به طور میانگین در عمق ۱۵۰ متر مشاهده شده است. طول راکتور (فاصله‌ی بین چاه‌های تزریق و تولید گاز) ۳۰ متر در نظر گرفته شده است. هنگام گاز کردن مقداری از زغال سنگ پشت چاه تزریق و تولید هم تبدیل به گاز می‌شود که در پشت چاه تزریق به دلیل گرمای زیاد گاز تزریق شده بیشتر از پشت چاه تولید است. بنابراین، طول راکتور بیشتر از ۳۰ متر است و برای این مدل تقریباً ۳۵ متر منظور شده است. متوسط ضخامت این لایه ۱/۲۱ متر است. ارتفاع راکتور ایجاد شده بیش از ضخامت لایه است، بنابراین در این مدل سازی به طور متوسط ۲ متر در نظر گرفته شده است. عرض راکتور تقریباً ۵ برابر ضخامت لایه است که در این مدل عرض راکتور ۶ متر در نظر گرفته شده است. بنابراین، برای ساده سازی هندسه‌ی راکتور UCG را می‌توان به شکل مکعب مستطیلی به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۳۵، ۶ و ۲ متر در نظر گرفت. طول، عرض و ارتفاع راکتور به ترتیب در راستای محوره‌های X ، Z و Y هستند.

طول و عرض کل مدل، ۲۰۰ متر و ارتفاع آن، ۵۰ متر بیشتر از عمق قرارگیری راکتور در نظر گرفته شده است. سه لایه آبرفت (۱۰ متر)، سنگ آهک (۳۵ متر) و شیل، سیلت استون و لایه‌ی زغال سنگ در مدل ترسیم شده است. پس از ترسیم هندسه‌ی مدل در نرم افزار Gambit، مدل مش بندی می‌شود. پس از مش بندی، شرایط مرزی و نواحی درونی تعیین می‌شوند. نمونه‌ای از شبکه مش بندی شده مدل در شکل ۶-۱ آورده شده است.

۶-۴-۲- ویژگی گاز درون راکتور

همان طور که اشاره شده، گاز حاصل از روش استخراج UCG شامل مخلوطی از گازهای CH_4 ، H_2 ، CO ، CO_2 و H_2O است. ترکیب این گاز صرف نظر از تأثیر عوامل غیرقابل کنترل، وابسته به عوامل قابل کنترل مانند نوع اکسیدان، آب، درجه حرارت و فشار راکتور است.



شکل ۶-۱: شبکه مش بندی شده مدل.

پرکینز^۱ در سال ۲۰۰۵ م. مدل سازی عددی برای بررسی اثر دما و فشار راکتور بر ترکیب گاز سنتزی انجام داده و نشان داد که با نتایج داده های حاصل از مناطق مختلف سازگاری خوبی دارد. با استفاده از نمودار پرکینز (شکل ۳-۵) و ثابت در نظر گرفتن درصد بخار آب (۳۳ درصد) می توان ترکیب گاز در درجه حرارت ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه کلوین و فشار ۱ تا ۵ مگاپاسکال را برآورد نمود.

در نرم افزار Fluent، قبل از حل هر مسأله نیاز است که ویژگی گاز در پنجره Fluid تعریف شود. در صورتی که گاز مورد نظر در بانک اطلاعاتی نرم افزار موجود نباشد، می توان یک گاز جدید با ویژگی گاز مورد نظر تعریف نمود. از آن جا که در این مدل، گاز درون راکتور مخلوطی از چند گاز است، گاز با ویژگی جدید با فرمان SCM باید ساخته شود. ویژگی های مورد نظر در این مدل وزن مولکولی، چگالی، لزجت، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب هدایت حرارتی گاز است.

^۱ - Perkins

۶-۴-۱- وزن مولکولی و چگالی گاز

ضریب تراکم پذیری^۱ گاز سنتزی با استفاده از رابطه‌ی برزلوت^۲ در دمای ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ کلوین و فشار ۱ تا ۵ مگاپاسکال درون راکتور محاسبه شده است. دیده شد که ضریب تراکم پذیری گاز بین ۱/۰۰۱ تا ۱/۰۰۶ درون راکتور تغییر می‌کند. در نتیجه می‌توان از مقدار آن صرف نظر کرده و از معادله‌ی حالت گازهای ایده‌آل به صورت زیر برای محاسبه چگالی گاز استفاده نمود.

$$\rho_g = \frac{PM}{RT} \quad ۱-۶$$

در رابطه‌ی ۱-۶، ρ_g چگالی گاز بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب، P فشار گاز بر حسب پاسکال، M وزن مولکولی گاز بر حسب گرم بر مول، R ثابت گازها با مقدار $8.315 \text{ J.mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ و T درجه حرارت بر حسب کلوین است.

ترکیب و وزن مولکولی گاز درون راکتور با توجه به نمودار ارائه شده توسط پرکینز (شکل ۳-۵) برآورد شده است. همچنین چگالی گاز درون راکتور در دمای ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ کلوین و فشار ۱ تا ۵ مگاپاسکال از رابطه‌ی ۱-۶ محاسبه شده و در جدول ۱-۶ آورده شده است.

۶-۴-۲- لزجت پویای گاز

لزجت، مقاومت گاز در برابر اعمال تنش برشی است. لزجت گازها با افزایش دما، کاهش می‌یابد. برای محاسبه لزجت گازها به صورت تابعی از دما از رابطه‌ی ساترلند^۳ استفاده شده است.

$$\mu = \mu_0 \frac{T + C}{T_0 + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \quad ۲-۶$$

^۱ - Compressibility Factor

^۲ - Berthelot Equation

^۳ - Sutherland Equation

جدول ۶-۱: برآورد ترکیب، وزن مولکولی و چگالی گاز درون راکتور.

ردیف	فشار گاز (MPa)	درجه حرارت (K)	ترکیب گاز (درصد)					وزن مولکولی (gr/mol)	چگالی گاز (Kg/m ³)
			H ₂ O	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄		
۱	۱	۱۲۰۰	۳۳	۰	۴۰/۲۰	۲۴/۷۹	۲/۰۱	۱۸/۰۶	۱/۸۱
۲		۱۳۰۰	۳۳	۰	۴۰/۶۵	۲۳/۲۳	۳/۱۳	۱۸/۳۳	۱/۶۹
۳		۱۴۰۰	۳۳	۰	۴۱/۰۹	۲۱/۶۶	۴/۲۴	۱۸/۶۰	۱/۶۰
۴		۱۵۰۰	۳۳	۰	۴۱/۵۴	۲۰/۱۰	۵/۳۶	۱۸/۰۶	۱/۴۵
۵	۲	۱۲۰۰	۳۳	۰	۳۷/۵۲	۲۱/۴۴	۸/۰۸	۱۸/۲۰	۳/۶۴
۶		۱۳۰۰	۳۳	۰	۳۸/۴۱	۲۰/۵۵	۸/۰۴	۱۸/۴۴	۳/۴۰
۷		۱۴۰۰	۳۳	۰	۳۹/۳۱	۱۹/۶۵	۸/۰۴	۱۸/۶۷	۳/۲۰
۸		۱۵۰۰	۳۳	۰	۴۰/۲۰	۱۸/۶۷	۸/۰۴	۱۸/۹۰	۳/۰۳
۹	۳	۱۲۰۰	۳۳	۲/۰۱	۳۴/۸۴	۱۴/۷۴	۱۵/۴۱	۱۹/۳۹	۵/۸۱
۱۰		۱۳۰۰	۳۳	۱/۳۴	۳۶/۶۳	۱۵/۴۱	۱۳/۶۲	۱۹/۳۱	۵/۳۴
۱۱		۱۴۰۰	۳۳	۰/۶۷	۳۸/۴۱	۱۶/۰۸	۱۱/۸۴	۱۹/۲۵	۴/۹۵
۱۲		۱۵۰۰	۳۳	۰	۴۰/۲۰	۱۶/۷۵	۱۰/۰۵	۱۹/۱۹	۴/۶۰
۱۳	۴	۱۲۰۰	۳۳	۳/۳۵	۳۲/۱۶	۸/۰۴	۲۳/۴۵	۲۰/۳۷	۸/۱۳
۱۴		۱۳۰۰	۳۳	۲/۲۳	۳۴/۶۲	۱۰/۵۰	۱۹/۶۵	۲۰/۰۲	۷/۳۷
۱۵		۱۴۰۰	۳۳	۱/۱۲	۳۷/۰۷	۱۲/۹۵	۱۵/۸۶	۱۹/۶۶	۶/۷۲
۱۶		۱۵۰۰	۳۳	۰	۳۹/۵۳	۱۵/۴۱	۱۲/۰۶	۱۹/۳۰	۶/۱۶
۱۷	۵	۱۲۰۰	۳۳	۴/۶۹	۳۰/۱۵	۲/۰۱	۳۰/۱۵	۲۱/۳۶	۱۰/۶۵
۱۸		۱۳۰۰	۳۳	۳/۱۳	۳۳/۲۸	۵/۸۱	۲۴/۷۹	۲۰/۷۵	۹/۵۵
۱۹		۱۴۰۰	۳۳	۱/۵۶	۳۶/۴۰	۹/۶۰	۱۹/۴۳	۲۰/۱۷	۸/۶۲
۲۰		۱۵۰۰	۳۳	۰	۳۹/۵۳	۱۳/۴۰	۱۴/۰۷	۱۹/۵۸	۷/۸۰

در رابطه‌ی ۶-۲، μ لزجت پویای گاز بر حسب $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ در دمای T بر حسب K ، μ_0 لزجت پویای گاز در دمای T_0 و C ثابت ساترلند هستند. لزجت گازهای CH_4 ، H_2 ، CO ، CO_2 و بخار آب از رابطه‌ی ساترلند در دماهای ۱۲۰۰، ۱۳۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۵۰۰ کلوین محاسبه شده و در جدول ۶-۲ آورده شده است. با توجه به جدول ۶-۱ و درصد گاز تولید شده در دما و فشارهای مورد نظر، لزجت پویای مخلوط گاز بر حسب kg/m.s محاسبه شده و در جدول ۶-۳ آورده شده است.

جدول ۶-۲: لزجت گازها در دماهای مورد نظر.

ردیف	نوع گاز	μ_0 (kg/m.s)	T_0 (K)	μ_{1200} (kg/m.s)	μ_{1300} (kg/m.s)	μ_{1400} (kg/m.s)	μ_{1500} (kg/m.s)
۱	CH ₄	$1/3 \times 10^{-5}$	۲۷۳/۱۵	$3/73 \times 10^{-5}$	$3/92 \times 10^{-5}$	$2/74 \times 10^{-4}$	$4/29 \times 10^{-5}$
۲	H ₂	$8/41 \times 10^{-6}$	۲۷۳/۱۵	$2/21 \times 10^{-5}$	$2/31 \times 10^{-5}$	$2/41 \times 10^{-5}$	$2/51 \times 10^{-5}$
۳	CO	$1/0 \times 10^{-4}$	۲۷۳/۱۵	$2/74 \times 10^{-4}$	$2/87 \times 10^{-4}$	$2/99 \times 10^{-4}$	$3/11 \times 10^{-4}$
۴	CO ₂	$1/37 \times 10^{-5}$	۲۷۳/۱۵	$4/39 \times 10^{-5}$	$4/63 \times 10^{-5}$	$4/85 \times 10^{-5}$	$5/07 \times 10^{-5}$
۵	H ₂ O	$1/34 \times 10^{-5}$	۲۹۸/۱۵	$5/55 \times 10^{-5}$	$5/93 \times 10^{-5}$	$6/31 \times 10^{-5}$	$6/67 \times 10^{-5}$

جدول ۶-۳: لزجت مخلوط گاز تولید شده در دما و فشارهای مورد نظر.

ردیف	فشار (MPa)	μ_{1200} (kg/m.s)	μ_{1300} (kg/m.s)	μ_{1400} (kg/m.s)	μ_{1500} (kg/m.s)
۱	۱	$1/35 \times 10^{-4}$	$1/43 \times 10^{-4}$	$1/51 \times 10^{-4}$	$1/59 \times 10^{-4}$
۲	۲	$1/29 \times 10^{-4}$	$1/38 \times 10^{-4}$	$1/48 \times 10^{-4}$	$1/55 \times 10^{-4}$
۳	۳	$1/23 \times 10^{-4}$	$1/34 \times 10^{-4}$	$1/45 \times 10^{-4}$	$1/56 \times 10^{-4}$
۴	۴	$1/18 \times 10^{-4}$	$1/30 \times 10^{-4}$	$1/42 \times 10^{-4}$	$1/54 \times 10^{-4}$
۵	۵	$1/15 \times 10^{-4}$	$1/28 \times 10^{-4}$	$1/41 \times 10^{-4}$	$1/55 \times 10^{-4}$

۶-۴-۲-۳- ظرفیت گرمایی ویژه گاز

ظرفیت گرمایی ویژه گازهای CH₄، H₂، CO، CO₂ و بخار آب در دماهای مورد نظر با نماد C در

جدول ۶-۴ دیده می شود. ظرفیت گرمایی ویژه ترکیب گاز در درجه حرارت و فشارهای مورد نظر با توجه

به درصد گازها از جدول های ۶-۱ و ۶-۴ محاسبه شده و در جدول ۶-۵ آورده شده است.

جدول ۶-۴: ظرفیت گرمایی ویژه گازها در دماهای مورد نظر.

ردیف	نوع گاز	C_{1200} (J/kg.K)	C_{1300} (J/kg.K)	C_{1400} (J/kg.K)	C_{1500} (J/kg.K)
۱	CH ₄	۱۲۸۰	۱۲۹۸	۱۳۱۳	۱۳۲۶
۲	H ₂	۱۵۳۴۰	۱۵۵۴۰	۱۵۷۷۰	۱۶۰۲۰
۳	CO	۱۲۲۰	۱۲۳۴	۱۲۴۶	۱۲۵۷
۴	CO ₂	۱۲۸۰	۱۲۹۸	۱۳۱۳	۱۳۲۶
۵	H ₂ O	۲۴۲۵	۲۴۹۰	۲۵۵۲	۲۶۰۹

جدول ۶-۵: ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط گاز تولید شده در دما و فشارهای مورد نظر.

ردیف	فشار (MPa)	C_{1200} (J/kg.K)	C_{1300} (J/kg.K)	C_{1400} (J/kg.K)	C_{1500} (J/kg.K)
۱	۱	۵۱۱۹	۴۹۷۳	۴۸۲۶	۴۶۷۴
۲	۲	۴۶۵۰	۴۵۹۳	۴۵۳۷	۴۴۷۸
۳	۳	۳۷۰۹	۳۸۶۳	۴۰۲۱	۴۱۸۳
۴	۴	۲۷۶۹	۳۱۶۴	۳۵۶۷	۳۹۸۶
۵	۵	۱۹۲۲	۲۴۹۷	۳۰۸۶	۳۶۹۱

۶-۴-۲-۴- ضریب هدایت حرارتی گاز

مقدار حرارتی که در مدت یک ثانیه از یک متر مربع ماده همگن به ضخامت یک متر عبور کرده و اختلافی برابر با یک درجه کلوین بین دمای دو سطح ماده ایجاد نماید، ضریب هدایت حرارتی است. واحد آن وات بر مترکلوین است و با نماد λ نشان داده می شود. ضریب هدایت حرارتی گاز با افزایش دما، افزایش می یابد؛ ولی در این جا فرض شده که ثابت است. این ضریب برای گازهای مختلف در جدول ۶-۶ آورده شده است. ضریب هدایت حرارتی گاز در دما و فشارهای مورد نظر با توجه به درصد گازها از جدولهای ۶-۶ و ۶-۶ محاسبه شده و در جدول ۶-۷ آورده شده است.

جدول ۶-۶: ضریب هدایت حرارتی گاز.

ردیف	نوع گاز	ضریب هدایت حرارتی گاز (w/m.K)
۱	CH ₄	۰/۰۳۳۲
۲	H ₂	۰/۱۶۷۲
۳	CO	۰/۰۲۵
۴	CO ₂	۰/۰۱۴۵
۵	H ₂ O	۰/۰۲۶

جدول ۶-۷: ضریب هدایت حرارتی گاز مخلوط گاز تولید شده در دما و فشارهای مورد نظر.

ردیف	فشار گاز (MPa)	λ_{1200} (w/m.K)	λ_{1200} (w/m.K)	λ_{1400} (w/m.K)	λ_{1500} (w/m.K)
۱	۱	۰/۰۶۰۷۴	۰/۰۵۸۶۱	۰/۰۵۶۴۸	۰/۰۵۴۳۵
۲	۲	۰/۰۵۶۴۸	۰/۰۵۵۲۱	۰/۰۵۳۹۴	۰/۰۵۲۶۷
۳	۳	۰/۰۴۷۳۴	۰/۰۴۸۲۲	۰/۰۴۹۱۰	۰/۰۴۹۹۸
۴	۴	۰/۰۳۸۳۳	۰/۰۴۱۶۳	۰/۰۴۹۹۳	۰/۰۴۸۲۳
۵	۵	۰/۰۳۰۱۷	۰/۰۰۳۵۲۹	۰/۰۴۰۴۱	۰/۰۴۵۵۴

۶-۴-۳- ویژگی سنگ پیرامون راکتور

محیط متخلخل در این مسأله، سنگ پیرامون راکتور است. همان طور که اشاره شد نفوذپذیری از عوامل مهم در نشت گاز است. مهم ترین تفاوت بین جریان گاز و جریان مایع در محیط های متخلخل، لغزش گاز در دیواره های محیط متخلخل است. برهم کنش بین مولکول های گاز و مولکول جامد در جریان نشت گاز با اثر کلینکنبرگ^۱ تعیین می شود که به صورت رابطه ی ۶-۳ است (Wu et al., 1998):

$$k_g = k_l \left(1 + \frac{b_s}{p_m} \right) \quad ۶-۳$$

در رابطه ی ۶-۳، k_g نفوذپذیری گاز در سنگ، k_l نفوذپذیری مایع بر حسب مترمربع، p_m میانگین فشار گاز بر حسب پاسکال و b_s ضریب لغزش کلینکنبرگ بر حسب پاسکال است. جانز^۲ ثابت کرد که با افزایش نفوذپذیری مطلق گاز، ضریب لغزش کلینکنبرگ کاهش می یابد. جانز رابطه ی ۶-۴ را برای ضریب لغزش گاز ارائه داد که برای نفوذپذیری ۰/۰۱ تا ۱۰۰۰ میلی داری معتبر است.

$$b_s = 0.251 \times k_l^{-.36} \quad ۶-۴$$

داده های ورودی به نرم افزار برای تعریف نفوذپذیری شامل ضریب مقاومت لزجت^۳ (عکس نفوذپذیری) بر حسب m^{-2} و ضریب مقاومت لختی^۴ بر حسب m^{-1} است.

^۱ - Klinkenberg Effect

^۲ - Jones

^۳ - Viscous Resistance Coefficient

^۴ - Inertial Resistance Coefficient

برای برآورد ضریب مقاومت لختی می‌توان از رابطه‌ی تجربی که معمولاً تابعی از نفوذپذیری و تخلخل سنگ هستند، استفاده کرد. کولز^۱ و هارتمن^۲ در سال ۱۹۹۸ م. رابطه‌ی تجربی زیر را بر اساس آزمایش نمونه‌های سنگ برای محاسبه ضریب فورچیمر ارائه دادند (Belyadi, 2006).

$$\beta = \frac{1.07 \times 10^{12} \times \varphi^{0.449}}{k^{1.88}} \quad ۵-۶$$

در رابطه‌ی ۵-۶، φ تخلخل سنگ بر حسب درصد، k نفوذپذیری بر حسب میلی‌داری و β مقاومت لختی بر حسب ft^{-1} هستند.

لایه‌های مورد نظر برای مدل‌سازی به سه بخش آبرفت؛ سنگ‌آهک؛ شیل، سیلت‌استون و زغال‌سنگ تقسیم‌بندی شده است. مدل همسان‌گرد در نظر گرفته شده است. نمونه‌ای از نفوذپذیری گاز در سنگ، ضریب‌های مقاومت لزجت و لختی با استفاده از روابط ۳-۶ تا ۵-۶ محاسبه شده و در جدول ۸-۶ آورده شده است.

جدول ۸-۶: ضریب‌های مقاومت لزجت، مقاومت لختی و تخلخل سنگ.

ردیف	ویژگی	نفوذپذیری	مقاومت لزجت	مقاومت لختی	تخلخل
	آحاد	میلی‌داری	عکس مترمربع	عکس متر	درصد
۱	آبرفت	۰/۱	$7/920 \times 10^{15}$	$1/160 \times 10^7$	۴۰
۲	سنگ‌آهک	۲	$4/590 \times 10^{14}$	$1/970 \times 10^5$	۷
۳	شیل و سیلت‌استون	۱۳/۵	$7/089 \times 10^{13}$	$1/360 \times 10^4$	۱۳
۴	فضای تخریب شده	۴۰۰۰۰	$2/494 \times 10^{10}$	$1/553 \times 10^1$	۲۹

۴-۴-۶- شرایط مرزی

شرایط مرزی که در نرم‌افزار Fluent برای این مدل استفاده شده است شامل شرایط مرزی ورودی، شرایط مرزی خروجی، دیواره و نواحی درونی است (Fluent Tutorial Guide, 2006).

^۱ - Coles

^۲ - Hartman

شرایط مرزی ورودی جریان، فشار ورودی^۱ (برای تعیین فشار سکون و خواص نرده‌ای جریان در مرز ورودی) و شرایط مرزی خروجی جریان، فشار خروجی^۲ است که برای تعیین فشار استاتیک و سایر متغیرهای نرده‌ای جریان در مرز خروجی استفاده می‌شود. استفاده از این شرط مرزی به جای شرط مرزی جریان خروجی، اغلب موجب بهتر شدن نرخ همگرایی در زمانی که جریان برگشتی در طول مراحل تکرار اتفاق می‌افتد، می‌شود. در دیواره مدل از شرط مرزی دیواره استفاده می‌شود. نواحی درونی، شامل نواحی جامد و سیال است. نواحی سیال به مجموعه‌ای از المان‌های دامن‌محاسباتی گفته می‌شود که تمام معادلات حاکم روی آن حل می‌شود. در نرم‌افزار Fluent محیط متخلخل نیز جزء نواحی سیال تعریف می‌شود. به همین دلیل تمام مدل سیال تعریف می‌شود (Fluent Tutorial Guide, 2006).

۶-۴-۵- شرایط اولیه

شرایط اولیه استفاده شده برای مسأله، سرعت و فشار گاز در مرزهای ورودی مدل (دیواره‌های راکتور) است. برای این مسأله، فشارهای ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ مگاپاسکال به عنوان شرایط اولیه مدل، در نظر گرفته شده است.

۶-۵- مدل سازی و محاسبه‌ی نشت گاز

در این بخش به مدل سازی نشت گاز از راکتور UCG و محاسبه‌ی نشت گاز پرداخته خواهد شد. به همین منظور شبکه‌ی مش‌بندی ساخته شده در نرم‌افزار Gambit وارد نرم‌افزار Fluent خواهد شد. ویژگی سیال و گاز وارد نرم‌افزار Fluent شده و نشت گاز مدل سازی و محاسبه خواهد شد.

^۱ - Pressure Inlet

^۲ -Pressure Outlet

۶-۵-۱- مدل سازی محیط متخلخل

با در نظر گرفتن جمله‌ی مشتق زمانی و اضافه کردن جمله‌ی منبع^۱ به معادله‌ی ناویر- استوکس^۲

می‌توان محیط متخلخل را به صورت رابطه‌ی ۶-۶ مدل سازی کرد (Hafsteinsson, 2009):

$$\frac{\partial(\varphi \rho u_i)}{\partial t} + u_j \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_i \quad 6-6$$

در رابطه‌ی ۶-۶، φ مقدار تخلخل است که بین ۰ تا ۱ تغییر می‌کند، ρ چگالی گاز، u سرعت گاز، μ

لزجت پویای گاز، τ تنش برشی، p فشار و S_i جمله منبع است. جمله‌ی منبع خود ترکیبی از دو جمله

است؛ یکی جمله‌ی تلفات لزجت (مؤلفه داریسی) و دیگری جمله‌ی تلفات لختی (مؤلفه غیرداریسی) است

که افت فشار را ایجاد می‌کند و به صورت رابطه‌ی ۶-۷ بیان می‌شود که به معادله‌ی داریسی- فورچیمیر^۳

معروف است.

$$S_i = -\left(\mu D_{ij} + \frac{1}{2}\rho|U_{kk}|\beta_{ij}\right)u_i \quad 7-6$$

محیط متخلخل برای این مسأله، همگن در نظر گرفته شده است؛ بنابراین جمله‌ی منبع برای آن به

صورت رابطه‌ی ۶-۸ تعریف می‌شود.

$$S_i = -\left(\mu D + \frac{1}{2}\rho|U_{ii}|\beta\right)u_i \quad 8-6$$

در رابطه‌ی ۶-۸، D ضریب مقاومت لزجت بر حسب m^{-2} و β ضریب مقاومت لختی یا فورچیمیر با

واحد m^{-1} است.

۶-۵-۲- حل مدل نشت گاز

نخست شبکه‌بندی ساخته شده در نرم‌افزار Gambit برای راکتور در عمق ۱۵۰ متر از طریق

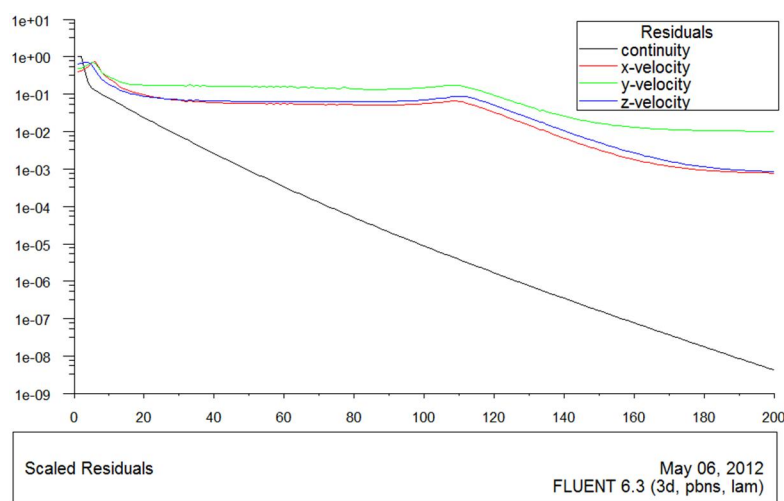
¹ - Source Term

³ - Darcy-Forchheimer Equation

² - Navier-Stokes Equations

نرم افزار Fluent فراخوانی می شود. مدل لزجت سیال، مدل جریان آرام^۱ انتخاب می شود. زمان حل مدل، حالت پایدار و حلگر بر اساس فشار تنظیم می شود. ویژگی مورد نیاز گاز در فشار ۱ مگاپاسکال و دمای ۱۲۰۰ کلوین که قبلاً با فرمان SCM ساخته شده از پنجره‌ی مواد^۲ فراخوانده و ذخیره می شود. فشار عملیات به صورت پیش فرض فشار هوا (۰/۱۰۱۳۲۵ مگاپاسکال) است. سپس در پنجره‌ی شرایط مرزی^۳، ورودی جریان از دیواره راکتور، یعنی فشار ۱ مگاسکال وارد می شود. در همین پنجره، ویژگی سنگ پیرامون راکتور (ضریب مقاومت لزجت، ضریب مقاومت لختی و تخلخل سنگ) با اسم گاز ساخته شده با فرمان SCM و محیط متخلخل برای هر کدام از لایه‌های سنگی وارد نرم افزار می شود.

گسسته سازی مدل از پنجره‌ی کنترل حل تنظیم می شود. شرایط اولیه در این مدل فشار ۱ مگاپاسکال است که برای جریان ورودی تعریف می شود. در پایان، گام حل مسئله وارد نرم افزار می شود. نمونه‌ای از مقدار باقی مانده سرعت گاز در گام‌های حل مسئله در شکل ۶-۲ نشان داده شده است.



شکل ۶-۲: نمونه‌ای از مقدار باقی مانده سرعت.

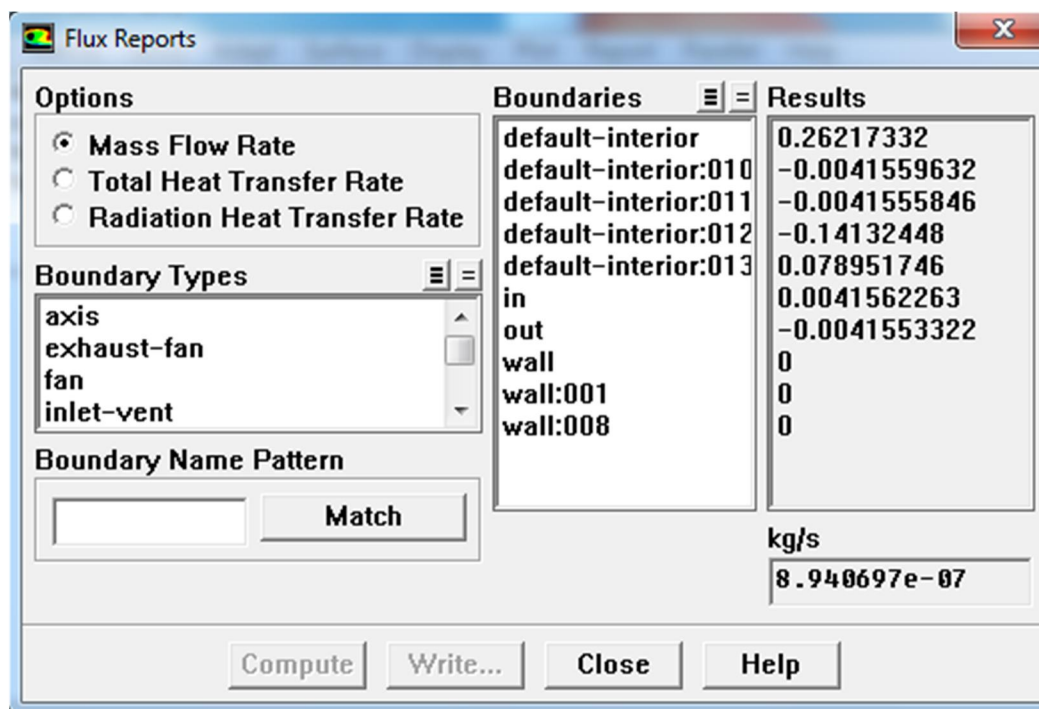
نتایج حاصل از خروجی نرم افزار که دبی نشت گاز بر حسب کیلوگرم بر ثانیه است در شکل ۶-۳

^۱ - Laminar

^۲ - Materials

^۳ - Boundary Conditions

آورده شده. هدف از این مدل سازی، محاسبه ی دبی نشت گاز از سطح زمین است. بر اساس اصل بقای جرم مقدار دبی گاز خروجی از راکتور و سطح زمین باید برابر باشد که در شکل ۳-۶ مشاهده می شود این دو مقدار برابر است.



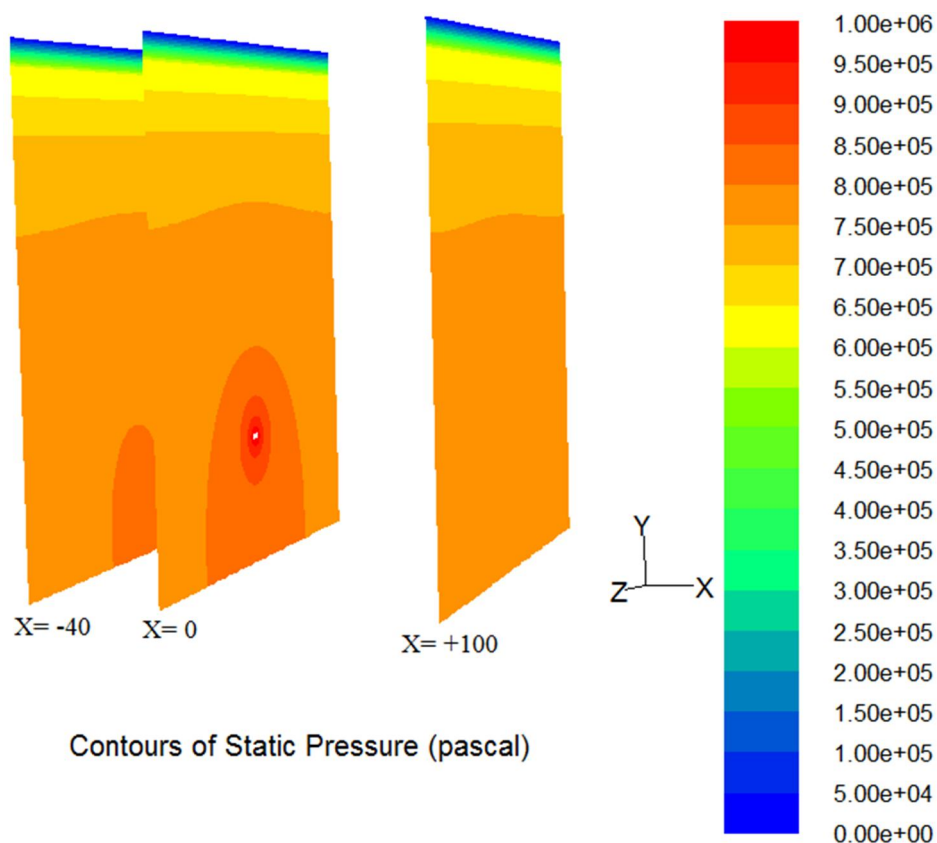
شکل ۳-۶: نتایج دبی نشت گاز از راکتور.

۳-۵-۶- محاسبه ی دبی نشت گاز

نخست به محاسبه ی دبی جریان گاز تولید شده از راکتور پرداخته می شود. دبی جریان گاز خروجی را می توان از روی مقدار زغال سنگ تبدیل شده به گاز محاسبه نمود. ضخامت لایه ۱/۲۱ متر، طول ناحیه ی گاز شده ۳۵ متر، پیشروی سینه کار ۰/۷۵ متر در روز و وزن مخصوص زغال سنگ ۱/۷ است. در نتیجه مقدار زغال سنگ، گاز شده در یک روز تقریباً ۵۴ تن است. برای گاز شدن هر کیلوگرم زغال سنگ، ۰/۴ کیلوگرم اکسیژن و ۱/۲ کیلوگرم بخار آب مورد نیاز است. بنابراین، دبی گاز تولید شده در این کارگاه استخراج ۱۴۰/۴ تن بر روز (۱/۶۲۵ کیلوگرم بر ثانیه) است. مقدار دبی نشت گاز برای مدل با فشار ۱

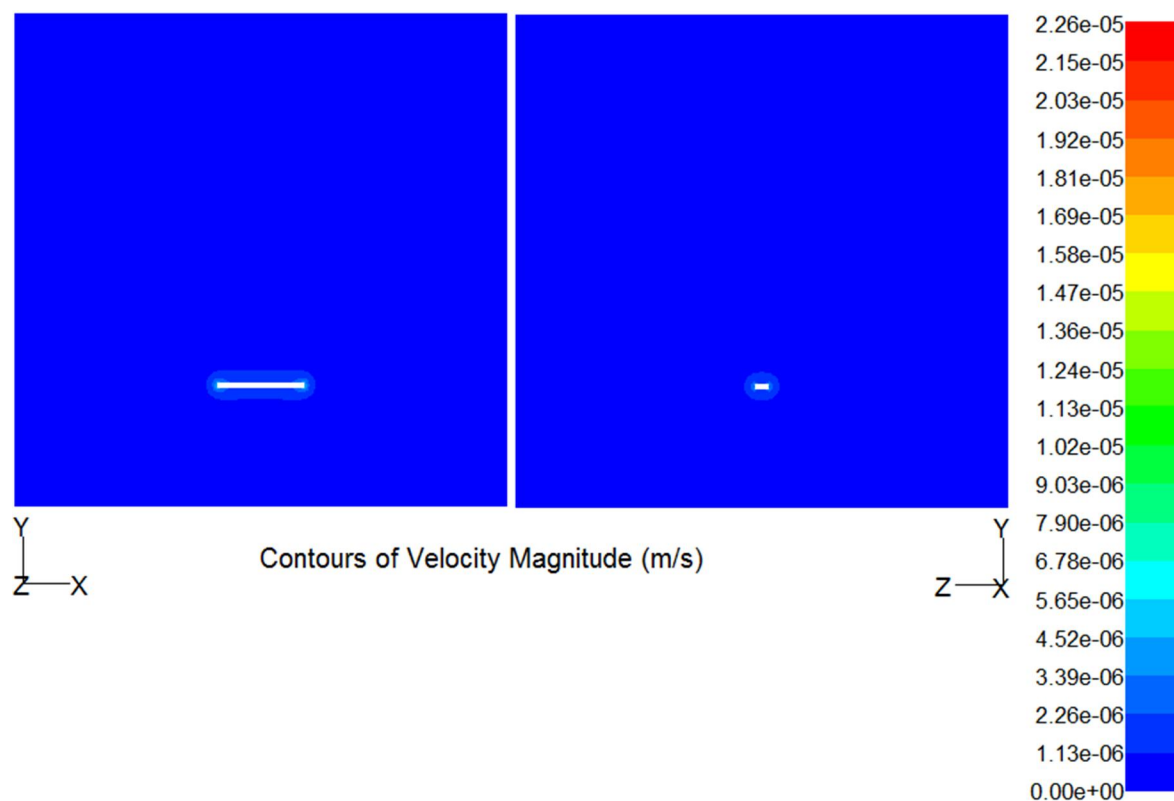
مگاپاسکال و دمای ۱۲۰۰ کلوین، ۰/۰۰۴۱۶ کیلوگرم بر ثانیه برای راکتور در عمق ۱۵۰ متر محاسبه شده است. با توجه به دبی گاز تولید شده (۱/۶۲۵ کیلوگرم بر ثانیه) و دبی نشت گاز از راکتور (۰/۰۰۴۱۶ کیلوگرم بر ثانیه)، مقدار نشت گاز از راکتور ۰/۲۵ درصد خواهد شد. همچنین نتایج مدل سازی در فشار ۲ مگاپاسکال نشان می دهد که دبی نشت گاز ۱/۰۰ درصد است. فشار اعمال شده بر راکتور در عمق ۱۵۰ متر باید بین ۱ تا ۲ مگاپاسکال باشد؛ مشاهده می شود که دبی نشت گاز ۰/۲۵ تا ۱/۰۰ درصد از گاز تولید شده است که از لحاظ عملیاتی قابل قبول است.

نمودار توزیع فشار استاتیک گاز در اطراف راکتور UCG در سه مقطع $X = -40$ ، $X = 0$ و $X = 100$ در شکل ۴-۶ آورده شده است. همان طور که دیده می شود فشار گاز نشت شده در اطراف راکتور از ۱ مگاپاسکال شروع شده و تا سطح زمین به فشار جو نزدیک می شود.



شکل ۴-۶: نمودار توزیع فشار استاتیک در اطراف راکتور.

نمودار توزیع سرعت گاز در اطراف راکتور UCG در صفحه‌ی X-Y و Y-Z در شکل ۵-۶ نشان داده شده است. این نمودار حاکی از سرعت اندک در اطراف راکتور است.



شکل ۵-۶: نمودار توزیع سرعت گاز در اطراف راکتور.

۶-۶- تحلیل پارامترهای ورودی مدل عددی

یکی از مهمترین کاربردهای روش‌های عددی تحلیل پارامتری و تحلیل حساسیت است. در تحلیل پارامتری با ثابت گرفتن ویژگی‌های سازه، پارامترهای مکانیکی مدل تغییر داده می‌شود تا اثر هر یک از آن‌ها بر روی رفتار مدل ایجاد شده بررسی شود. ولی در تحلیل حساسیت با فرض ثابت بودن پارامترهای ورودی توده‌سنگ، ویژگی‌های سازه از قبیل شکل هندسی و ابعاد تغییر داده می‌شود تا تأثیر هر یک از آن‌ها

مورد ارزیابی قرار گیرد. در واقع این کار تعیین می کند که کدام یک از پارامترهای انتخاب شده اثر بیشتری بر روی نشت گاز از راکتور دارند.

۶-۶-۱- تحلیل پارامتری مدل

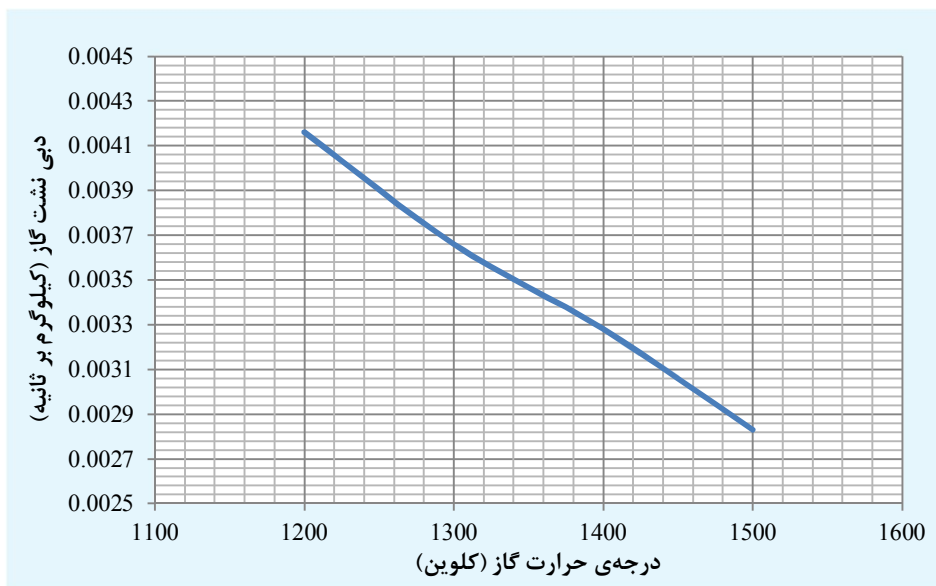
در این بخش هدف تحلیل پارامتری اثر درجه حرارت و فشار گاز درون راکتور بر میزان نشت گاز از راکتور است که در ادامه اثر این دو عامل بر مدل نشت گاز بررسی خواهد شد.

۶-۶-۱-۱- تحلیل پارامتری درجه حرارت گاز درون راکتور

در این بخش با تغییر در مقدار درجه ی حرارت گاز، حساسیت نشت گاز در مدل در برابر تغییرات دما بررسی خواهد شد. برای این کار، تنها پارامتر درجه ی حرارت گاز تغییر داده خواهد شد و سایر پارامترهای هندسی و ویژگی توده سنگ و گاز ثابت هستند. فشار گاز درون راکتور ۱ مگاپاسکال است. تغییرات دما بر روی ویژگی چگالی و لزجت گاز اثرگذار است. بنابراین در مدل های مختلف این دو پارامتر به جای تغییرات دما اعمال می شوند. نتایج حاصل از تحلیل پارامتری درجه ی حرارت گاز بر دبی نشت گاز از راکتور در جدول ۶-۹ و شکل ۶-۶ نشان داده شده است.

جدول ۶-۹: نتایج تحلیل پارامتری درجه حرارت گاز بر دبی نشت گاز از راکتور.

ردیف	درجه حرارت (کلوین)	دبی نشت گاز (کیلوگرم بر ثانیه)	مقدار نشت گاز از راکتور (درصد)
۱	۱۲۰۰	۰/۰۰۴۱۶	۰/۲۵۶
۲	۱۳۰۰	۰/۰۰۳۶۶	۰/۲۲۵
۳	۱۴۰۰	۰/۰۰۳۲۸	۰/۲۰۲
۴	۱۵۰۰	۰/۰۰۲۸۳	۰/۱۷۴



شکل ۶-۶: نتایج تحلیل پارامتری درجهی حرارت گاز بر دبی نشت گاز از راکتور.

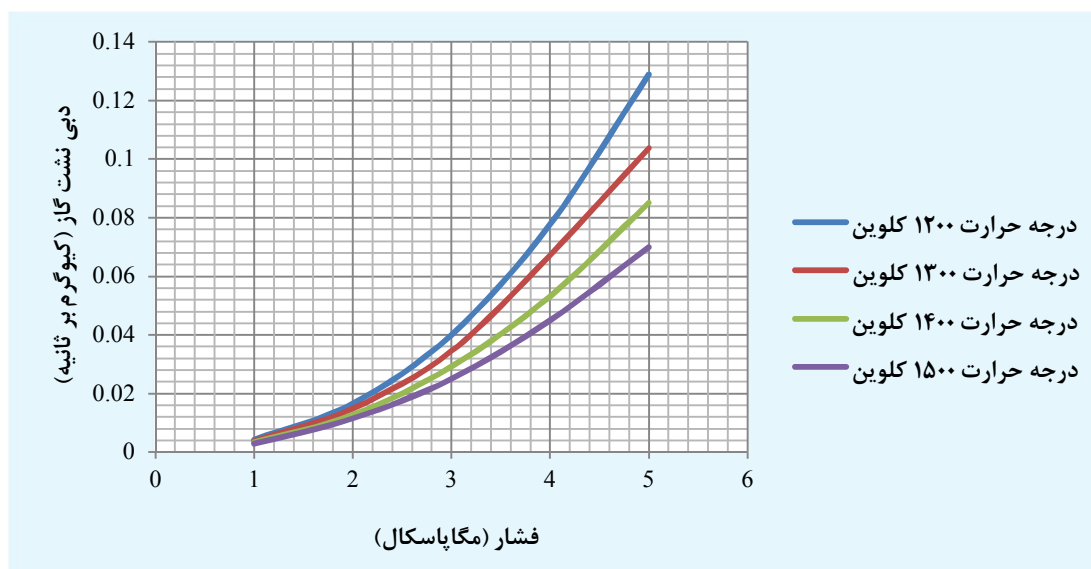
با توجه به شکل ۶-۴ دیده می شود که با افزایش درجهی حرارت گاز درون راکتور، دبی نشت گاز کاهش می یابد. دلیل کاهش دبی نشت گاز، کاهش چگالی و لزجت گاز با افزایش درجهی حرارت در فشار ثابت است. خروجی مدل ها نشان می دهد که اثر تغییرات افزایش درجه حرارت بر نشت گاز ناچیز است.

۶-۱-۶-۲- تحلیل پارامتری فشار گاز درون راکتور

در این بخش با تغییر در مقدار فشار گاز، حساسیت نشت گاز در مدل در برابر تغییرات فشار گاز بررسی خواهد شد. برای این کار، تنها پارامتر فشار گاز تغییر داده خواهد شد و سایر پارامترهای هندسی، ویژگی های توده سنگ و گاز، ثابت هستند. تغییرات فشار به صورت فشار استاتیک گاز (شرایط اولیه) در مدل های گوناگون اعمال می شود. نتایج حاصل از تحلیل پارامتری فشار گاز بر دبی نشت گاز از راکتور بر حسب درصد دبی گاز خروجی از راکتور در جدول ۶-۱۰ آورده شده است. همچنین تحلیل تأثیر پارامتری فشار گاز بر دبی نشت گاز با در نظر گرفتن درجه حرارت گاز بین ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ کلوین در شکل ۶-۷ نشان داده شده است.

جدول ۶-۱۰: نتایج تحلیل پارامتری فشار گاز بر دبی نشت گاز از راکتور.

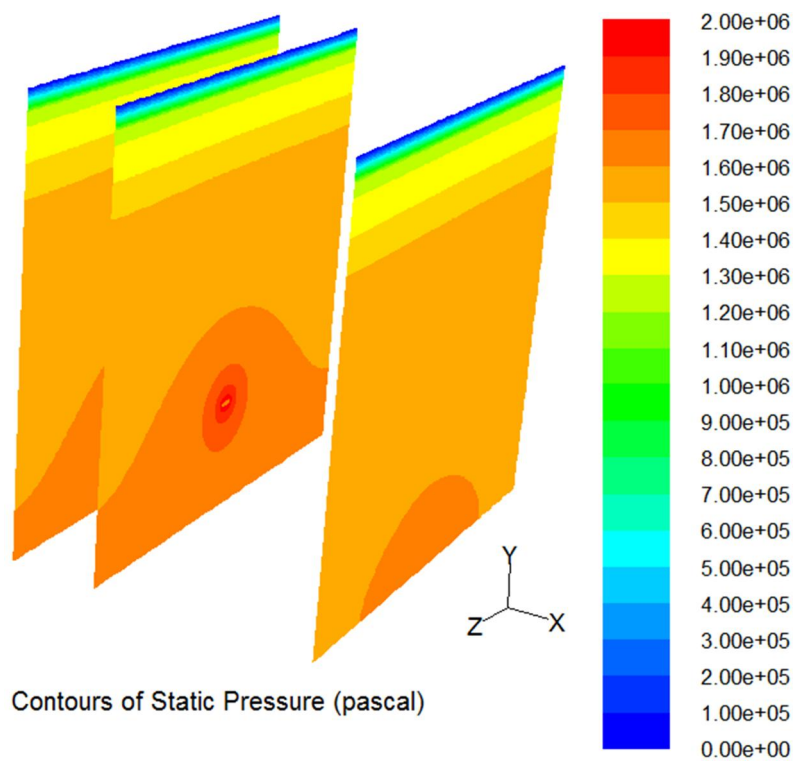
فشار گاز (مگاپاسکال)						
۵	۴	۳	۲	۱	درجه‌ی حرارت (کلوین)	ردیف
۷/۰۸	۴/۶۶	۲/۴۴	۱/۰۰	۰/۲۶	۱۲۰۰	۱
۶/۲۶	۳/۸۴	۲/۰۶	۰/۸۷	۰/۲۳	۱۳۰۰	۲
۵/۱۲	۳/۲۱	۱/۷۶	۰/۷۶	۰/۲۰	۱۴۰۰	۳
۴/۲۲	۲/۷۱	۱/۵۲	۰/۶۹	۰/۱۷	۱۵۰۰	۴



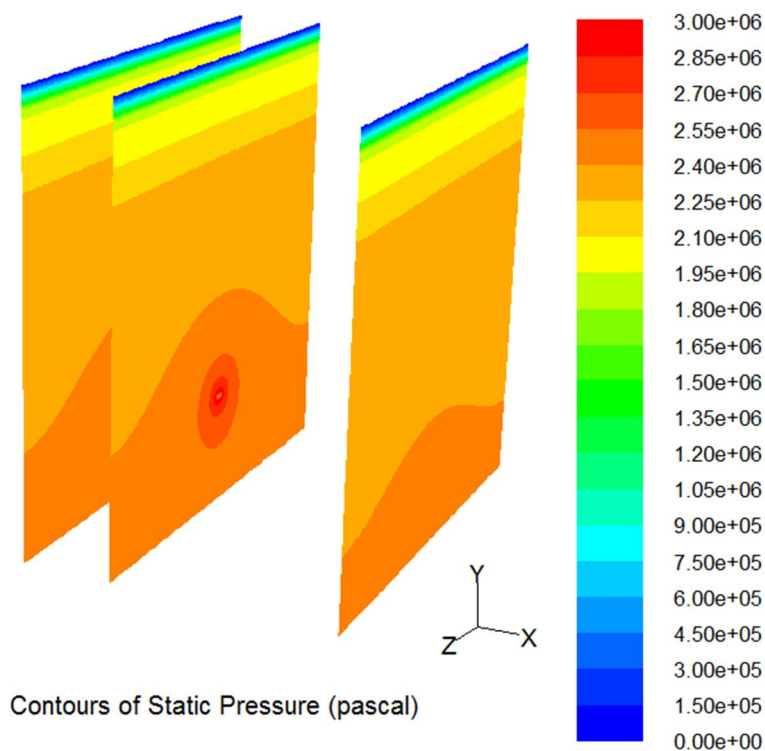
شکل ۶-۷: نتایج تحلیل پارامتری فشار گاز بر دبی نشت گاز از راکتور در عمق ۱۵۰ متر.

همان طور که دیده می‌شود با ثابت ماندن دمای گاز، با افزایش فشار درون راکتور، نشت گاز از راکتور افزایش می‌یابد. کمترین مقدار نشت گاز در فشار ۱ مگاپاسکال از ۰/۱۷ تا ۰/۲۶ درصد از گاز تولید شده و بیشترین مقدار آن در فشار ۵ مگاپاسکال از ۴/۲۲ تا ۷/۰۸ درصد از گاز تولید شده است. اثر تغییرات فشار بر نشت گاز از راکتور بیشتر از اثر تغییرات درجه حرارت است و قابل توجه می‌باشد.

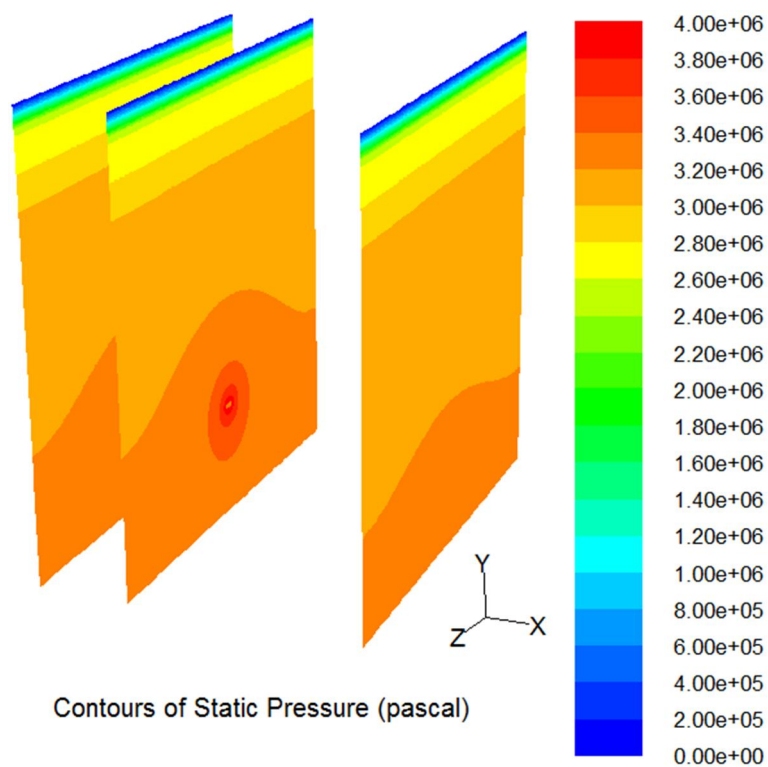
نمودار توزیع فشار استاتیک گاز در اطراف راکتور UCG تا سطح زمین در فشارهای ۲، ۳، ۴ و ۵ مگاپاسکال در مقطع‌های $X = -40$ ، $X = 0$ و $X = 100$ ، در شکل‌های ۶-۸، ۶-۹، ۶-۱۰ و ۶-۱۱ آورده شده است.



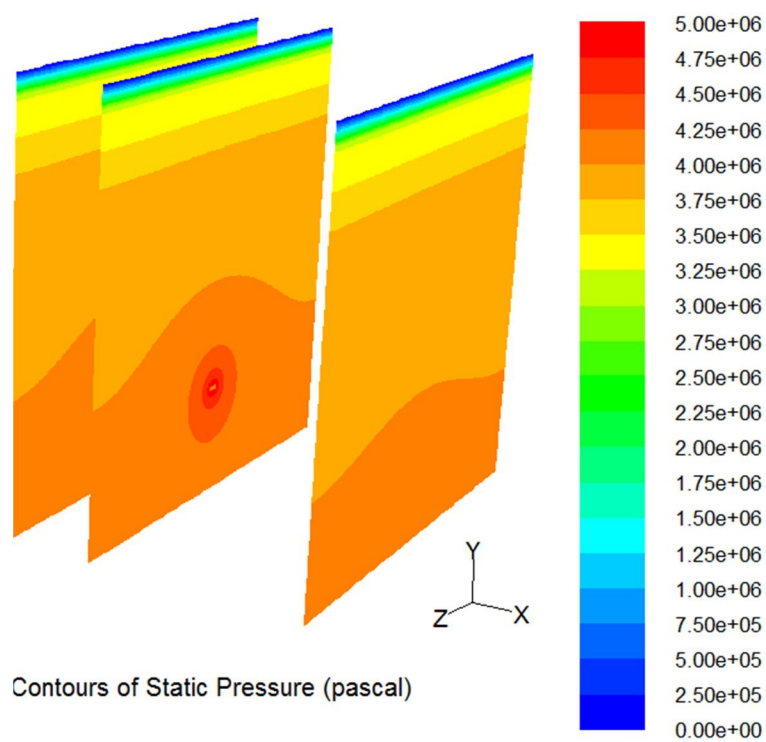
شکل ۶-۸: نمودار توزیع سرعت گاز در اطراف راکتور در فشار راکتور ۲ مگاپاسکال.



شکل ۶-۹: نمودار توزیع سرعت گاز در اطراف راکتور در فشار راکتور ۳ مگاپاسکال.



شکل ۶-۱۰: نمودار توزیع سرعت گاز در اطراف راکتور در فشار راکتور ۴ مگاپاسکال.



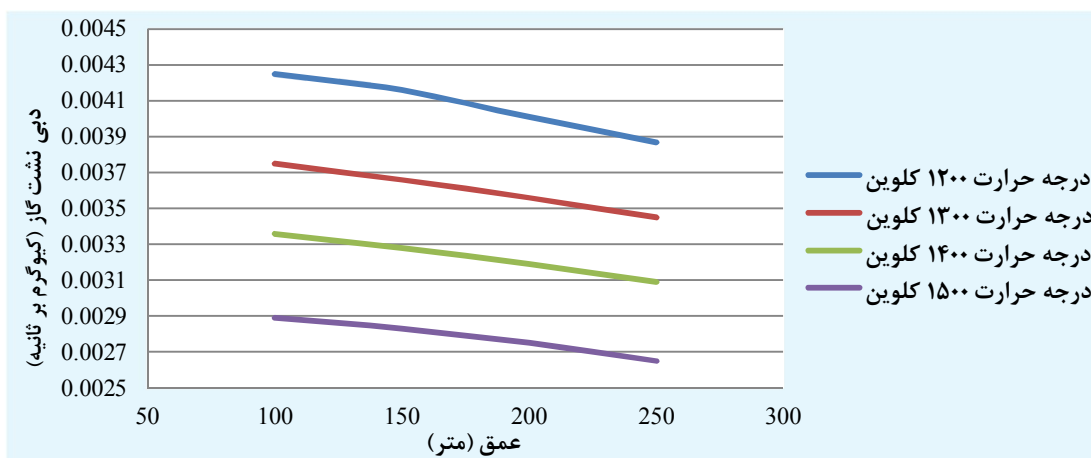
شکل ۶-۱۱: نمودار توزیع سرعت گاز در اطراف راکتور در فشار راکتور ۵ مگاپاسکال.

۶-۶-۲- تحلیل حساسیت مدل

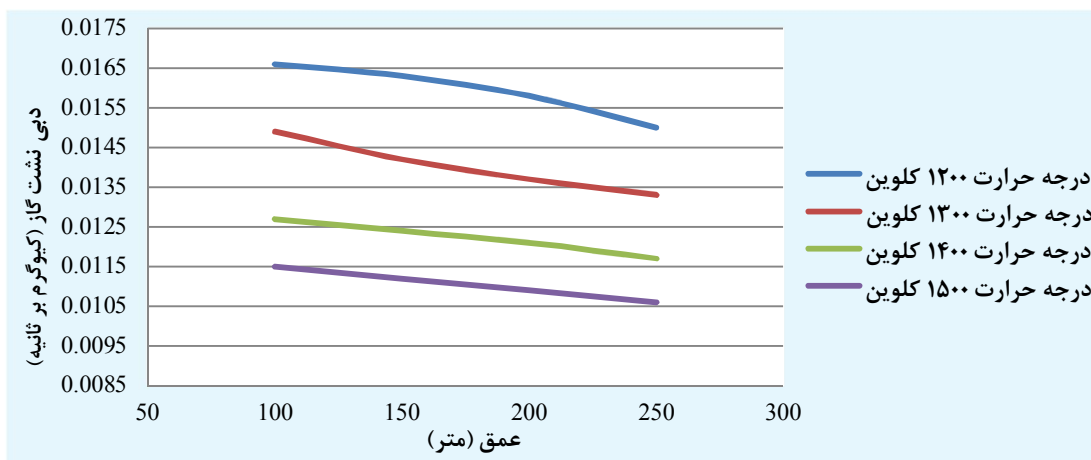
پس از تحلیل پارامتری مدل، در این بخش به تحلیل حساسیت مدل پرداخته می‌شود. در تحلیل حساسیت با فرض ثابت بودن پارامترهای ورودی، ویژگی‌های سازه تغییر داده می‌شود تا تأثیر این ویژگی‌ها بر مدل ساخته شده ارزیابی شود. در ادامه، تحلیل حساسیت مدل ساخته شده در برابر تغییرات عمق راکتور و نفوذپذیری توده سنگ که از ویژگی‌های مهم مدل هستند، بررسی خواهند شد.

۶-۶-۲-۱- تحلیل حساسیت نسبت به عمق راکتور

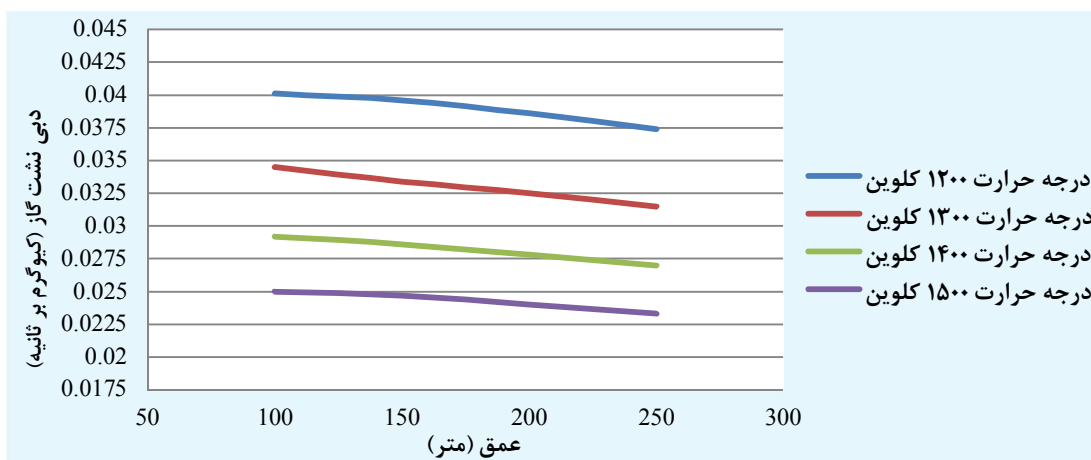
همان طور که در جدول ۴-۳ دیده می‌شود، لایه‌ی M26 از ناحیه‌ی زغال‌دار مزینو دارای شیب ۱۸ درجه بوده و به طور متوسط در عمق ۱۵۰ متر قرار دارد. در این مدل‌سازی عرض پهنه یا طول راکتور گاز کردن ۳۰ متر در نظر گرفته شده که باید در امتداد لایه‌ی زغال‌سنگ باشد. در مراحل مختلف گاز کردن چه در یک پهنه یا در پهنه‌های مختلف، راکتور ممکن است در اعماق مختلف قرار گیرد. در اعماق مختلف میزان نشت گاز متفاوت خواهد بود. به همین دلیل، در این بخش راکتورهایی در اعماق ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ متر طراحی شده و نسبت به عمق راکتور، نشت گاز تحلیل حساسیت خواهد شد. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت عمق راکتور بر دبی نشت گاز در فشارهای مختلف در شکل‌های ۶-۱۲، ۶-۱۳، ۶-۱۴، ۶-۱۵ و ۶-۱۶ آورده شده است.



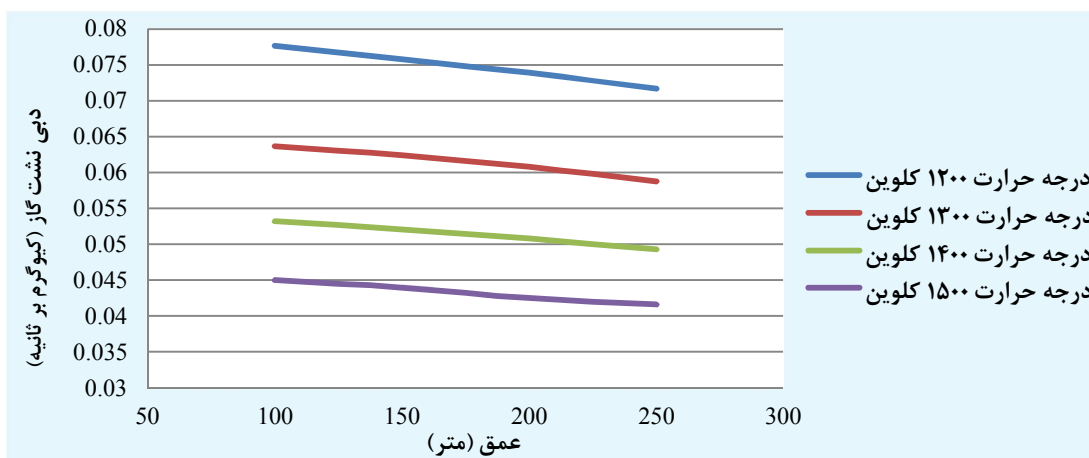
شکل ۶-۱۲: نتایج تحلیل حساسیت عمق راکتور بر دبی نشت گاز در فشار ۱ مگاپاسکال.



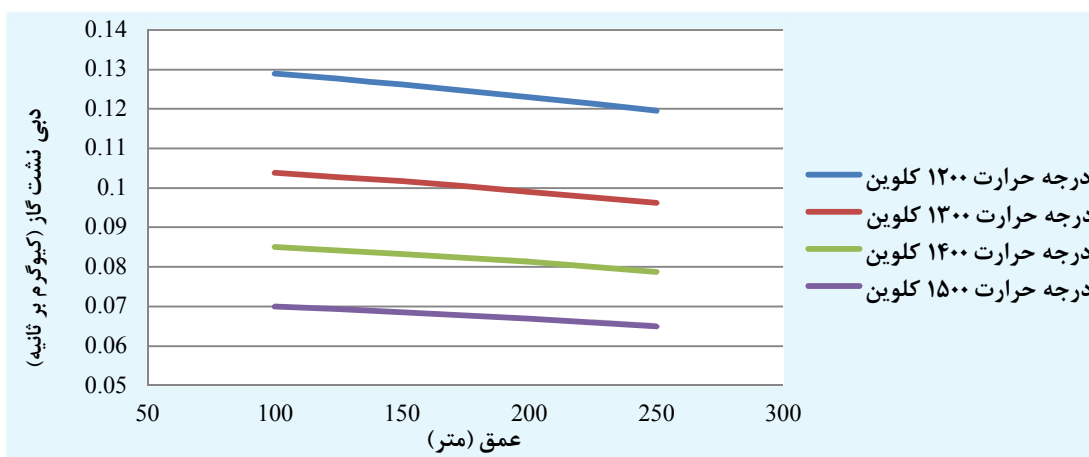
شکل ۶-۱۳: نتایج تحلیل حساسیت عمق راکتور بر دبی نشت گاز در فشار ۲ مگاپاسکال.



شکل ۶-۱۴: نتایج تحلیل حساسیت عمق راکتور بر دبی نشت گاز در فشار ۳ مگاپاسکال.



شکل ۶-۱۵: نتایج تحلیل حساسیت عمق راکتور بر دبی نشت گاز در فشار ۴ مگاپاسکال.



شکل ۶-۱۶: نتایج تحلیل حساسیت عمق راکتور بر دبی نشت گاز در فشار ۵ مگاپاسکال.

نتایج حاصل از مدل سازی تحلیل حساسیت عمق راکتور در شکل های ۶-۶ تا ۶-۱۰ نشان می دهد

که با افزایش عمق راکتور، دبی نشت گاز کاهش می یابد. در فشار ۱ مگاپاسکال از عمق ۱۰۰ متر تا ۲۵۰ متر درصد نشت گاز از ۰/۱۶ درصد تا ۰/۱۸ درصد تغییر می کند و در فشار ۵ مگاپاسکال از عمق ۱۰۰ متر تا ۲۵۰ متر درصد نشت گاز از ۷/۴ درصد تا ۷/۹ درصد تغییر می کند. نتایج نشان می دهد که در کل تغییر عمق راکتور از ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر تأثیر زیادی بر درصد نشت گاز ندارد و مدل نسبت به این پارامتر زیاد حساس نیست.

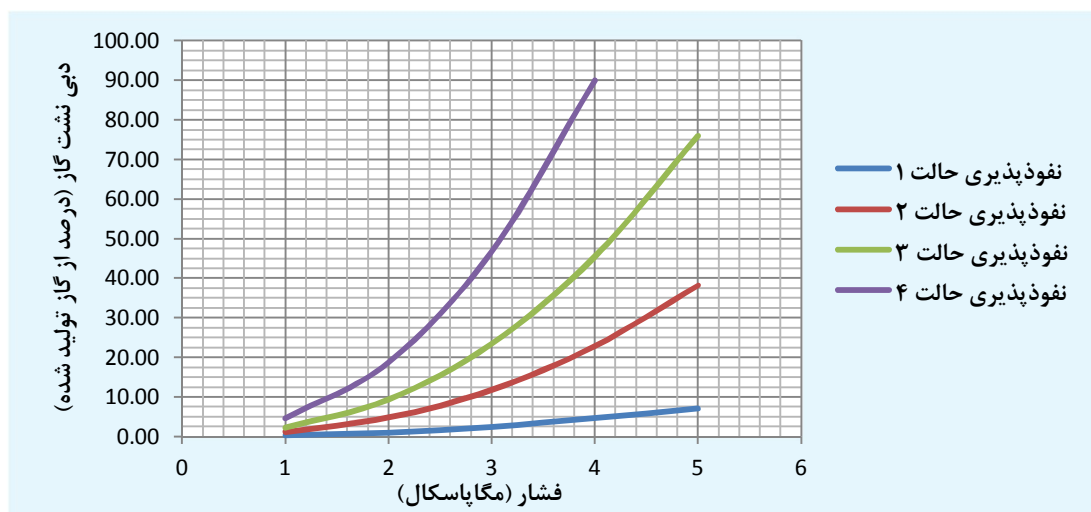
۶-۲-۲- تحلیل حساسیت به نفوذپذیری لایه های سنگی پیرامون راکتور

در این بخش مدل ساخته شده نسبت به تغییرات نفوذپذیری لایه های سنگی پیرامون راکتور تحلیل حساسیت می شود. مدل ساخته شده در عمق ۱۵۰ متر با گاز در درجه حرارت ۱۲۰۰ کلوین و فشار ۱ تا ۵ مگاپاسکال انتخاب شده است. نفوذپذیری استفاده شده در تحلیل حساسیت به نفوذپذیری در جدول ۱۱-۶ آورده شده است.

جدول ۱۱-۶: نفوذپذیری استفاده شده در تحلیل حساسیت به نفوذپذیری.

ردیف	حالت	آبرفت	سنگ آهک	شیل و سیلت استون
۱	۱	۰/۱	۲	۱۳/۵
۲	۲	۰/۵	۱۰	۶۵/۵
۳	۳	۱	۲۰	۱۳۵
۴	۴	۲	۴۰	۲۷۰

نتایج حاصل از تحلیل حساسیت نفوذپذیری راکتور بر دبی نشت گاز در شکل ۱۳-۶ در ۴ حالت نفوذپذیری با توجه به جدول ۱۱-۶، نشان داده شده است.



شکل ۱۳-۶: نتایج تحلیل حساسیت نفوذپذیری راکتور بر دبی نشت گاز.

با افزایش نفوذپذیری لایه‌های سنگی، دبی نشت گاز افزایش می‌یابد. میزان نشت مجاز گاز باید کمتر از ۱۵ درصد باشد؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود در حالت ۲ باید فشار کمتر از ۳/۵ مگاپاسکال، در حالت ۳ فشار کمتر از ۲/۵ مگاپاسکال و در حالت ۴ باید فشار کمتر از ۱/۸ مگاپاسکال باشد.

۶-۷- جمع‌بندی

برای مدل‌سازی نشت گاز از راکتور UCG نخست هندسه‌ی مدل بر روی لایه‌ی M26 ناحیه‌ی زغال‌دار مزینو در نرم‌افزار Gambit ساخته و مش‌بندی شده و شرایط مرزی تعیین شد. مدل ساخته می‌شود. سپس در نرم‌افزار Fluent با وارد کردن ویژگی‌های گاز و سنگ تحلیل می‌شود. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشت گاز برای راکتور در عمق ۱۵۰ متر که فشار گاز درون راکتور بین ۱ تا ۲ مگاپاسکال و درجه حرارت گاز تقریباً ۱۲۰۰ کلوین است، نشان می‌دهد که در فشار ۱ مگاپاسکال، دبی نشت گاز ۰/۲۵ درصد و در فشار ۲ مگاپاسکال، دبی نشت گاز ۱/۰۰ درصد است که این مقدار نشت گاز از لحاظ عملیاتی قابل قبول است. همچنین نمودار توزیع سرعت و فشار استاتیک در این مدل‌سازی نشان داده شده است. سپس تحلیل پارامتری نسبت به پارامترهای قابل کنترل درجه حرارت و فشار گاز درون راکتور UCG انجام می‌شود. تحلیل پارامتری نشان می‌دهد که با افزایش درجه حرارت، دبی نشت گاز کاهش و با افزایش فشار، دبی نشت گاز افزایش می‌یابد و تغییرات فشار اثر نسبتاً زیاد است و درجه حرارت اثر ناچیزی بر نشت گاز دارد. در پایان تحلیل حساسیت نسبت به عمق راکتور در اعماق ۱۰۰ تا ۲۵۰ متر و نفوذپذیری سنگ صورت گرفته است. نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که تغییرات عمق راکتور در این اعماق تأثیر ناچیزی بر نشت گاز دارد و تغییرات نفوذپذیری سنگ پیرامون راکتور تأثیر زیادی بر نشت گاز دارد.

فصل هفتم:

نتیجہ گیری و پیشہ دات

۷-۱- نتیجه‌گیری

ایده‌ی روش UCG برای نخستین بار در سال ۱۸۶۸ م. پیشنهاد شده و از دهه‌ی ۱۹۳۰ تا ۱۹۶۰ میلادی در اتحاد جماهیر شوروی سابق چندین طرح اجرا شد. سپس از تجربه‌ی طرح‌های آزمایشی اجرا شده در ایالات متحده، اروپا، استرالیا و چین از دهه‌ی ۱۹۶۰ م. تا سال ۲۰۰۰ م. کارخانه‌ها و نیروگاه‌های تجاری بر مبنای روش UCG در ایالات متحده، کانادا، استرالیا، آفریقای جنوبی، چین، پاکستان، هندوستان، چین، مجارستان و انگلستان طراحی شدند.

در مقایسه با شیوه‌های معمول استخراج زغال‌سنگ (رو باز و زیرزمینی سنتی) در فرآیند UCG، استخراج زغال‌سنگ حذف می‌شود؛ در نتیجه در این روش به نیروی کار، تجهیزات و ماشین‌آلات کمتری نیاز است. هزینه‌ی جاری عملیات کمتر شده و مسایل زیست‌محیطی مرتبط با مدیریت حمل و نقل زغال‌سنگ و انباشت آن و نیز انتشار خاکستر کاهش می‌یابد. سیستم انتقال محصول بسیار راحت‌تر از روش‌های معمول است، زیرا گاز سنتزی پس از استخراج از سر چاه تولید تا کارخانه‌ها با خطوط لوله انتقال می‌یابد. در فرآیند UCG نیاز به احداث کارخانه‌ی زغال‌شویی نیست و آب کمتری مورد نیاز است.

UCG در مقایسه با روش استخراج سنتی زغال‌سنگ، دارای مزایای زیست‌محیطی فراوان است. در مقایسه با روش‌های معمول استخراج روباز و زیرزمینی، تخریب و نشست سطح زمین در UCG به حداقل می‌رسد. از آن که در این روش لایه‌ی زغال‌سنگ نقش راکتور را ایفا می‌کند، بنابراین مقدار زیادی از خاکستر و قطران در زیرزمین مدفون شده و وارد گاز تولید شده نمی‌شود. در این روش مخاطرات ناشی از معدن‌کاری وجود ندارد و مسایل ایمنی مانند نگهداری سقف کارگاه و تهویه‌ی معدن حذف می‌شود. تصاعد گاز متان و گرد زغال همان‌طور که در بسیاری از معادن معمول است؛ در این فرآیند وجود ندارد. این روش دارای شرایط ایمنی و بهداشتی بسیار خوب است و سازگاری بسیار زیادی با محیط زیست دارد. در مقایسه با SCG، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی کمتری دارد و نیاز به خرید راکتور گاز کردن

سطحی نیست. در این تحقیق روش‌های مختلف UCG بررسی شدند. متداول‌ترین روش برای گاز کردن در اعماق کم، روش چاه قائم و روش CRIP و در اعماق زیاد، روش CRIP است. معمولاً برای حفاری و اتصال چاه‌ها از روش حفاری جهت‌دار استفاده می‌شود که هزینه‌ی زیادی دارد.

عوامل مؤثر بر انجام سینتیک واکنش‌های شیمیایی و ترکیب گاز سنتزی شامل عوامل غیرقابل کنترل مانند نوع زغال‌سنگ، خاکستر، لیچه، ضخامت و عمق لایه و عوامل قابل کنترل مانند نوع اکسیدان، آب، درجه حرارت و فشار راکتور بررسی شده‌اند. با انتخاب لایه‌ی زغال‌سنگ با شرایط مناسب می‌توان گاز با ارزش حرارتی مطلوب و یا غنی از گازهای سودمند مانند CH_4 ، CO و H_2 نمود. درجه حرارت گاز درون راکتور بین ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ کلوین و فشار آن بین ۱ تا ۵ مگاپاسکال می‌باشد که با کنترل پارامترهای طراحی قابل تنظیم است.

از آن جا که مصرف انرژی در کشور در سال‌های اخیر روند رو به رشد داشته است. روش UCG می‌تواند راه‌کار مناسبی برای تولید گاز سنتزی برای تولید برق در سبد انرژی کشور و همچنین خوراک صنایع شیمیایی باشد. برخی از معادن زغال‌سنگ در کشور از دیدگاه فنی-اقتصادی به دلیل ارزش حرارتی کم زغال‌سنگ، عمق زیاد، ضخامت کم لایه‌ی زغال‌سنگ، شیب زیاد، خاکستر زیاد، رطوبت زیاد و شرایط نامطلوب روباره برای استخراج به روش‌های متداول، مناسب نیستند. روش استخراج UCG می‌تواند راه‌کار مناسبی برای استخراج این گونه لایه‌های زغال‌سنگ باشد. UCG نسبت به روش‌های سنتی یکی از روش‌های ارزان‌تر، ایمن‌تر و پاک‌تر برای استخراج زغال‌سنگ است.

حوزه‌ی زغال‌دار طبس دارای انواع زغال‌سنگ کک‌شو (در نواحی پروده، نایبند و آبدوگی) و حرارتی (در ناحیه‌ی مزینو) است. ناحیه‌ی مزینو دارای ۱۴۰۰ میلیون تن زغال‌سنگ حرارتی از نوع آنتراسیت و نیمه‌آنتراسیت است که قابلیت کک‌شوندگی برای استفاده در صنایع فولاد کشور را ندارد. به همین دلیل در این تحقیق ناحیه‌ی مزینو انتخاب شد. لایه‌های زغال‌سنگ با ضخامت بیش از ۱ متر برای گاز کردن

زیرزمینی مناسب هستند؛ بنابراین در مرحله‌ی نخست لایه‌های M1، M2، M4، M5، M25 و M26 به عنوان لایه‌های امیدبخش انتخاب شدند. این لایه‌ها از لحاظ عمق، شیب، میزان خاکستر و رطوبت دارای شرایط خوبی هستند. از آنجا که با گاز کردن لایه‌ها در تراز بالاتر، امکان گاز کردن لایه‌های پایین به علت نشست پوش‌سنگ به طور کلی از بین خواهد رفت و یا آن را بسیار دشوار خواهد نمود؛ در مرحله‌ی بعد لایه‌ی M26 به عنوان لایه‌ی امیدبخش انتخاب شد.

یکی از مخاطرات UCG، نشست گاز از راکتور زیرزمینی است. نشست گاز باعث کاهش بازدهی فرآیند، غیر عملیاتی شدن پروژه‌ی گاز کردن و آلودگی هوا می‌شود. در این تحقیق عوامل مؤثر بر نشست گاز از راکتور UCG مورد بررسی قرار گرفتند. از بین عوامل بررسی شده اثر گسترش راکتور و کارگاه‌های مجاور، ضخامت لایه، شیب لایه، آب زیرزمینی و نفوذپذیری از عوامل قابل کنترل و درجه حرارت و فشار گاز از عوامل قابل کنترل مؤثر بر نشست گاز از راکتور UCG هستند.

در فصل ششم، نخست هندسه‌ی مدل راکتور طراحی شده و در نرم‌افزار Gambit ترسیم و شبکه‌بندی شده است. مدل ساخته شده برای تحلیل وارد نرم‌افزار Fluent شده است. ویژگی گاز درون راکتور با صرف نظر از عوامل غیرقابل کنترل از روی نمودارهای موجود که بر اساس درجه حرارت و فشار درون راکتور ارائه شده است، تعیین شد. دبی گاز تولید شده در این کارگاه استخراج ۱/۶۲۵ کیلوگرم بر ثانیه است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار دبی نشست گاز برای مدل در عمق ۱۵۰ متر با فشار گاز ۱ مگاپاسکال و درجه حرارت ۱۲۰۰ کلوین، ۰/۲۵ درصد از گاز تولید شده و در فشار ۲ مگاپاسکال، ۱/۰۰ درصد است که از لحاظ عملیاتی قابل قبول است. سپس تحلیل پارامتری نسبت به پارامترهای درجه حرارت و فشار گاز درون راکتور صورت گرفته و مشخص شد که درجه حرارت اثر ناچیز و فشار گاز درون راکتور اثر نسبتاً زیادی بر نشست گاز دارند. در پایان تحلیل حساسیت نسبت به عمق راکتور و نفوذپذیری سنگ انجام شد و نتایج نشان دادند که در اعماق ۱۰۰ تا ۲۵۰ متر اثر عمق راکتور بر نشست گاز ناچیز و اثر

تغییرات نفوذپذیری بر نشت گاز نسبتاً زیاد است.

۷-۲- پیشنهادات

- ۱- پیشنهاد می‌شود مناطق امیدبخش برای استخراج منابع زغال‌سنگ به روش UCG با استفاده از معیارهای انتخاب کارگاه استخراج UCG و تجربه‌ی کشورهای دیگر در سطح کشور تعیین و رتبه‌بندی شده و مناطق مستعد انتخاب شوند.
- ۲- پیشنهاد می‌شود تحقیقاتی در زمینه‌ی مکان‌یابی مناطق مستعد برای احداث نیروگاه‌های محلی تولید برق بر پایه‌ی روش استخراج UCG و یا کارخانه‌های تبدیل گاز سنتزی به میعانات در کنار معادن زغال‌سنگ در سطح کشور انجام شود.
- ۳- پیشنهاد می‌شود پژوهش‌هایی در زمینه‌ی امکان‌سنجی استفاده از روش استخراج UCG در معادنی که از لحاظ فنی و اقتصادی غیرقابل استخراج هستند و همچنین معادن مترکه‌ی زغال‌سنگ کشور انجام شود.
- ۴- از اطلاعات زمین‌شناسی ساختمانی و گسل‌های ناحیه‌ی مزینو برای جانمایی کارگاه استخراج استفاده شود. تحقیقات جامع‌تری در برداشت‌های زمین‌شناسی و آزمایشگاهی انجام شود.
- ۵- پیشنهاد می‌شود تحقیقات جامعی در زمینه‌ی بررسی مسایل فنی و اقتصادی طرح آزمایش پایلوت UCG و سپس کارخانه‌ی نیمه‌تجاری و در پایان کارخانه‌ی تجاری بر مبنای روش استخراج UCG و CCS در کشور انجام شود.
- ۶- پیشنهاد می‌شود تحقیقات و آزمایش‌هایی در بخش حفاری جهت‌دار و تکمیل چاه‌های تزریق و تولید در لایه‌ی زغال‌سنگ و نیازمندی‌های خاص حفاری جهت‌دار در لایه‌های زغال‌سنگ که مستلزم روش استخراج UCG می‌باشد، انجام شود.

- ۷- تأثیر عوامل قابل کنترل مانند نوع ترکیب اکسیدان، درجه حرارت و فشار راکتور بر ترکیب گاز سنتزی حاصل از فرآیند برای تولید گاز با ارزش حرارتی بیشتر به صورت آزمایشگاهی انجام شود.
- ۸- پیشنهاد می‌شود نشت گاز از راکتور UCG با در نظر گرفتن اثر تخریب راکتور بر نشت گاز مدل‌سازی شود.

منابع



منابع فارسی

اسماعیل‌نیا، ع. و حمزه‌خانی، ع. (۱۳۸۹). *بررسی اقتصادی استفاده از زغال سنگ برای تولید برق در ایران*. نشریه‌ی انجمن اقتصاد انرژی ایران، شماره ۱۲۹ و ۱۳۰، مهر و آبان ۱۳۸۹. (ص. ۴۷-۵۷).

امینی، ف.، توان‌پور، م.، بنی‌هاشمی، ع.، کاوه، ن.، صابرفتاحی، ل. و گل‌قهرمانی، ن. (۱۳۸۹). *ترازنامه انرژی سال ۱۳۸۸*. دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی، معاونت امور برق و انرژی وزارت نیرو. (ص. ۱۹۸-۲۰۳).

خلاصه گزارشات. (۱۳۷۳). *مطالعات اکتشافی پی‌جویی مقدماتی زغال سنگ‌های حرارتی ناحیه‌ی جنوب طبس (مزینو)*. شرکت ملی فولاد ایران. (ص. ۴-۱۴۶).

خلاصه گزارشات. (۱۳۷۹). *خلاصه نتایج گزارش عملیات اکتشاف مقدماتی منطقه‌ی ۱ (مزینو)*. وزارت معادن و فلزات. (ص. ۵-۲۸).

دیدری، م. (۱۳۸۳). *فرآیند تبدیل گاز طبیعی به هیدروکربن‌های مایع (جی.تی.ال.)*. دومین همایش ملی توسعه فن‌آوری در صنعت نفت، چالش‌ها و راه‌کارها. (ص. ۱-۴).

طاهری، ش. (۱۳۷۸). *طرح بهبود ساختار سازمانی بخش زغال سنگ کشور*. دومین همایش ملی انرژی. (ص. ۳-۸).

عمیدپور، م.، پنجه‌شاهی، م. و شریعتی‌نیاسر، م. (۱۳۸۷). *بهینه‌سازی انرژی در فرآیند تبدیل گاز طبیعی به سوخت‌های مایع*. ویژه‌نامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره دهم، شماره چهار. (ص. ۱۴۰-۱۴۱).

فارق حسینی، م. (۱۳۷۸). *درآمدی بر مکانیک سنگ*. نشر کتاب دانشگاهی.

فهمی‌فر، ا. و سروش، ح. (۱۳۸۲). *آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها*. جلد دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر. (ص. ۳۵۴-۳۵۸).

گزارش اکتشاف. (۱۳۷۷). طرح اکتشاف زغال سنگ حرارتی ناحیه ی مزینو- طبس، گزارش اکتشاف پی جویی تفصیلی، جلد ۱. انتشارات وزارت معادن و فلزات. (ص. ۱-۲۰۰).

گزارش اکتشاف کمرمهدی. (۱۳۷۷). طرح اکتشاف زغال سنگ حرارتی ناحیه ی مزینو- طبس، اکتشاف پی جویی مقدماتی منطقه ی کمرمهدی، جلد ۱. انتشارات وزارت معادن و فلزات.

موسوی، س. م. (۱۳۹۰). تحلیل پایداری فضاها ی استخراجی به روش UCG در ناحیه زغالی تخت (شرکت زغال سنگ البرز شرقی). پایان نامه کارشناسی /رشد. دانشگاه یزد.

یزدی، م. (۱۳۸۶). اثرات زیست محیطی معدن زغال سنگ مزینو طبس. نشریه علمی پژوهشی علوم محیطی، سال پنجم، شماره اول. (ص. ۱-۸).

منابع لاتین

- Ag Mohamed, A., Batto, S. F., Changmoon, Y., Chien, S. C., Choe J. I., Cole, K. R., Engel, K., and Gardner, W. (2011). Viability of underground coal gasification with carbon capture and storage in Indiana. Indiana University. US (p. 14).
<http://www.indiana.edu/~cree/pdf/Viability%20of%20Underground%20Coal%20Gasification%20Report.pdf>
- Aghalayam, P. (2009). Underground coal gasification: A future clean coal utilization technology for India. *The newsletter of the energy forum of IIT madras*, Volume 1, Issue 12. (p. 2).
- Anderson, J. M. (1995). Computational fluid dynamics, The basics application. *McGraw Hill, Inc.* (pp. 4-37).
- Beath, A. and Davis, B. E. (2006). UCG history. Kolkata, India. (pp. 9-).
- Belyadi, F. (2006). Determining low permeability formation properties from absolute open flow potential. MSc Thesis. Department of Petroleum and Natural Gas Engineering, Morgantown, West Virginia, USA. . (pp. 7-8).
- Bialecka, B. (2009). Analysis of criteria for UCG siting and operation. *Central Mining Institute*, 40-166 KATOWICE, Plac Gwarków 1, Poland. (pp. 3-6).
- Biezen, E. N. (1996). Modeling underground coal gasification. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherlands. (pp. 2-119).
- Blinderman, M. S. and Klimenko, A. Y. (2007). Theory of reverse combustion linking. *Elsevier Inc, Combustion and Flame* 150, 232–245, (p. 1).
- Blinderman, M. S., Saulov, D. N., and Klimenko, A. Y. (2008). Forward and reverse combustion linking in underground coal gasification. *Elsevier Ltd, Energy* 33, 446–454. (pp. 2-9).
- Burton, E., Friedmann, J., and Upadhye, R. (2007). Best practices in underground coal gasification. US Department of Energy Research report, Lawrence Livermore National Laboratory. Livermore, USA. (pp. 11-67).
- Batenburg, D. W. (1992). Heat and mass transfer during underground gasification of thin deep coal seams. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherlands. (p. 42).

- Carbon Energy Report. (2009). Underground coal gasification syngas production and power generation, Bloodwood Creek Project. *Carbon Energy Ltd.* (pp. 13-14). http://www.derm.qld.gov.au/environmental_management/impact_assessment/eis-processes/documents/bloodwood-initial-advice-statement.pdf
- Carbon Energy Report. (2011A). ASX Announcement. *Carbon Energy Ltd.* http://www.uwyo.edu/eori/_files/misc_download/20110223%20ccl%20acquisition.pdf
- Carbon Energy report. (2011B). Annual Report 2011. *Carbon Energy Ltd.* (p.18). <http://www.carbonenergy.com.au/irm/content/annualreport/full.pdf>
- Chai, X. (2004). Clean energy from underground coal gasification, promoting commercially viable UCG in China . *DTI/Pub URN 03/1610.* (pp. 2-4).
- Couch, G. R. (2009). Underground coal gasification. *IEA Clean Coal Center.* International Energy Agency, London, UK. (pp. 13-113). <http://www.coalonline.org/site/coalonline/content/viewer?LogDocId=82189&PhyDocId=7789&filename=778900129.html>
- Creedy, D., Garner, K., Holloway, S., Jones, N., and Ren, T. X. (2001). Review of underground coal gasification technological advancements. *COAL R211 DTI/Pub URN 01/1041.* London, UK. (pp. 4-7).
- Daly, J. (2012). Pakistan to produce natural gas - By burning underground coal. *Oilprice.* <http://oilprice.com/Energy/Natural-Gas/Pakistan-To-Produce-Natural-Gas-By-Burning-Underground-Coal.html>
- Dennis, S. (2006). Rocky Mountain-1 underground coal gasification test project, Hanna. *U.S. Department of Energy,* Morgantown, USA. (pp. 6-10).
- Ding, G. and Bai, F. (1996) .Basic equations of mixed-gas motion in gob and their finite element solution. *Journal of China University of Mining and Technology.* (p. 1).
- Doyle, B. (2001). Hazardous gases underground: Application to tunnel engineering. *Acid-free paper.* USA. (pp. 87-88).
- DTI. (2004). Review of environmental issues of underground coal gasification. *COAL R272 DTI/Pub URN 04/1880.* Harwell International Business Centre. Didcot, Oxfordshire, UK. (pp. 14-G64).
- DTI. (2005). Review of the feasibility of underground coal gasification in the UK: Appendix 1, Directional drilling in coal. *DTI Cleaner Fossil Fuels Programme.* Oxford, UK. (pp. 40-43).

- Evans, J. M. (1986). A methodology for assessing environmental and health risks of underground coal gasification. *Western Aquatics, Inc.* Laramine, USA. (pp. 13-15).
- Fergusson, K. J. (2009). A cleaner, cheaper, indigenous fuel for combined cycle plants. 6UCG Partnership. Woking. UK. (p. 1).
- Fischer, D. D., King, S. B., Humphrey, A. E. (1977) A report on the successful development of underground coal gasification at Hanna. *Energy Research and Development Administration Laramie Energy Research Center.* University Station Laramine, USA (pp. 3-5).
- Fluent 6.3 Tutorial Guide. (2006).
- Friedmann, S. J., Burton, E., and Upadhye, R. (2006). LLNL capabilities in underground coal gasification. *Lawrence Livermore National Laboratory.* (p. 2).
- Friedmann, S. J., Upadhye, R., and Kong, F. M. (2009). Prospects for underground coal gasification in carbon-constrained world. *Elsevier, Energy Procedia* 1, 4551–4557. (pp. 1-4).
- Gambit 2.2 Tutorial Guide. (2004).
- GasTech. (2007). Viability of underground coal gasification in the “deep coals” of the Powder River Basin, Wyoming. Casper WY: Wyoming Business Council. (pp. 9-28).
http://www.wyomingbusiness.org/DocumentLibrary/Energy/WBC_Report_061507_SPM.pdf
- Glaser, R. R., and Johanson, A. J. (1985). Three dimensional laboratory simulation of the pressure dependency of UCG. *DOE, Morgantown Energy Technology Center.* USA. (p. 3).
- Gujarat Industries Power Co. (2009). Environmental impact assessment for proposed underground coal gasification (UCG) pilot project at Vastan mine block, Surat in Gujarat. India. (pp. 28-64).
- Hafsteinsson, H. E. (2009). Porous Media in OpenFOAM. Spring. Chalmers.
- Harkins, J. (2011). About clean global energy. Clean Global Energy. (p. 1).
<http://media.wotnews.com.au/asxann/01152757.pdf>
- Hartman, H. (1996). SME mining engineering handbook, Chapter 22.6., In-site gasification and combustion of coal, *Society of Mining and Metallurgy, and Exploration.* Littleton, CO. (pp. 1955-1963).

- Hester, R., and Harrison, R. (2010). Carbon capture sequestration and storage. *Royal Society of Chemistry*. Cambridge, UK. (pp. 104-119).
- Higman, C., and Burgt, M. V. (2003). Gasification. *Library of Congress Cataloging*. UK. (p. 1).
- Hu, G. Z., Wang, H. T., Tan, H. X., Fan, X. G., Yuan, Z. G. (2008). Gas seepage equation of deep mined coal seams and its application. *Elsevier, Journal of China University of Mining and Technology*. (p. 1).
- Hu, Q. T., Liang, Y. P., Liu. J. Z. (2007). CFD simulation of goaf gas flow patterns. *Journal of China Coal Society*. (p. 1).
- Hsu, S. M., Lo, H. C., Chi, S. Y., and Ku, C. Y. (2011). Rock mass hydraulic conductivity estimated by two empirical models. *Sinotech Engineering Consultants, Inc.* (p. 134).
- Hudson, J. A., and Harrison, J. P. (1997). Engineering rock mechanics an introduction to the principles. *Oxford OX5 IGB*, UK. (pp. 151-153).
- Irwin, M. W., Bowen, B. H., Gotham, B. J. (2009). Indiana coal report 2009, Chapter 9. *Indiana Center for Coal Technology Research*. Purdue University, USA. (pp. 10-15).
- Jin, L. Z., Yao, W., and Zhang, J. (2010). CFD simulation of gas seepage regularity in goaf. *Journal of China Coal Society*. (p. 1).
- Jones, N., Holloway, S., Smith, N. J., Creedy, D. P., Garner, K., and Durucan, S. (2004). UK coal resource for new exploitation technologies *DTI*. UK. (p. 28).
- Kamall, R. (1999). Future plans for research and development, Technology transfer and export promotion. *DTI*. London, UK.
- Kapusta, K., and Stanczyk, K. (2010). Pollution of water during underground coal gasification of hard coal and lignite. *Elsevier, Fuel*. (p. 1).
- Kempka, T., Nakaten, N., Azzam, H. R., and Schlüter, G. R. (2009). Economic viability of in-situ coal gasification with downstream CO₂ storage. *Glückauf Mining Reporter*. (p. 45).
- Khadse, A. N., Qayyumi, M., Mahajan, S. M., and Aghalayam, P. (2006). Reactor model for the underground coal gasification (UCG) channel. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, Volume 4, Article A37. (p. 4-7).

- Khadse, A. N., Qayyumi, M., Mahajan, S. M., and Aghalayam, P. (2007). Underground coal gasification: A new clean coal utilization technique for India. *Elsevier, Energy* 32 2061-2070. (p. 4-7).
- Kostúr, K., and Kačúr, J. (2008). The monitoring and control of underground coal gasification in laboratory conditions. *Petroleum and Coal*. (pp. 1-2).
- Kreinin, E., and Zorya, A. (2009). Underground coal gasification problems. *Khimiya Tverdogo Topliva*. Moscow, RU (p. 4).
- Kuyper, R. A. (1994). Transport phenomena in underground coal gasification channels. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherlands. (pp. 6-14).
- Li, Y., Liang, X., and Liang, J. (2007). An overview of the Chinese UCG program. *Data Science Journal*, Volume 6. (pp. 2-3).
- LincEnergy Report. (2006). LincEnergy UCG/GTL and power generation project. *LincEnergy*. Brisbane, Australia. (p. 17).
http://www.deedi.qld.gov.au/cg/resources/project/linc/linc_energy_ias.pdf
- LincEnergy Report. (2009). Billion tonne coal discovery defines. *LincEnergy*. Brisbane, Australia.
www.lincenergy.com/data/investor_linc/investor-linc-issue-14.pdf
- LincEnergy Report. (2012A). About LincEnergy. 01 Corporate series. *LincEnergy*. Brisbane, Australia.
http://www.lincenergy.com/data/info_sheets/c1-fact.pdf
- LincEnergy Report. (2012B). Modern practices in UCG. 03 UCG series. *LincEnergy*. Brisbane, Australia.
http://www.lincenergy.com/data/info_sheets/UCG3_modpractices_TPR.pdf
- Liu, S. Q., Wang, Y. Y., Zhao, K., and Yang, N. (2009). Enhanced-hydrogen gas production through underground gasification of lignite. *Elsevier, Journal of China University of Mining and Technology*. (pp. 1-5).
- Lu, Q. Q. (2009). A Simulation of gas migration in heterogeneous goaf of fully mechanized coal caving mining face based on multi-components LBM. *Journal of Environmental Technology and Engineering*. (p. 1).
- Moorhouse, J., Huot, M., and McCulloch, M. (2010). Underground coal gasification: environmental risks and benefits. *Pembina Institute*. Alberta, Canada T7A 1S7. (pp. 3-10).

- Mueller, M. G., Hopf, C. J., Beck, R. A., Palmer, F. D., Jenkins, S. D., and Chu, S. (2009). Low carbon coal: meeting US energy, employment and CO₂ emission goals with 21ST century technology. *US Department of Energy*. (pp. 144-145).
- Nield, D. A., and Bejan, A. (2006). Convection in porous media. *Springer*. USA. (pp. 3-6).
- Nourozieh, H., Kariznovi, M., Chen, Z., and Abedi, J. (2010A) Simulation study of underground coal gasification in deep coal seams. University of Calgary, Canada. (pp. 1-2).
- Nourozieh, H., Kariznovi, M., Chen, Z., and Abedi, J. (2010B). Simulation study of underground coal gasification in Alberta reservoirs: Geological structure and process modeling. *Energy and Fuels Article 24*, 3540-3550. (p. 2).
- Oliver, R., and Covell, J. (1989). Handbook for selection and characterization of potential UCG sites. *Western Research Institute*. Laramie, USA. (pp. 1-33).
- Peng, S., and Zhang, J. (2007). Engineering geology for underground rocks. *Springer*. (pp. 4-10).
- Perkins, G. (2005). Mathematical modelling of underground coal gasification. PhD thesis, School of Materials Science and Engineering, The University of New South Wales, Australia. (pp. 103-162).
- Perkins, G., and Sahajwalla, V. (2006). A numerical study of the effects of operating conditions and coal properties on cavity growth in underground coal gasification. *Energy and Fuels Article 22*, 596-608 (pp. 2-6).
- Praski, A., Mahoney, E., Craven, J., and Olson, R. (2004). Design options for methane production from coal in the La Ronge region. University of Saskatchewan, Saskatoon. Industries Power Co, Nagpur. (p. 9).
- Ray, S. R., Panigrahi, D. C., and Ghosh, A. K. (2010). Cleaner energy production with underground coal gasification a review. *IE(I) Journal–MN*, Volume 91, (pp. 1-4).
- Roberts, C., and Schaffer, S. (2009) Clean coal: underground coal gasification in Alberta. Canada. (p. 1).
- Sathaiah, p., Chandra, S. J., and Prasad, V. N. (2010). Underground coal gasification, only solution of future deep seated coal deposits. *National seminar on underground coal gasification*. Hyderabad, India. (pp. 172-179).
- Sereshki, F. (2005). Improving coal mine safety by identifying factors that influence the sudden release of gases in outburst prone zones. PhD thesis, School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, Australia. (pp. 65-78).

- Shafirovich, E., Mastalerz, M., Rupp, J., and Varma, A. (2008). The potential for underground coal gasification in Indiana. Indiana: Phase 1 report. Purdue University, Indiana, USA. (pp. 3-22).
- Shafirovich, E., and Varma, A. (2009). Underground coal gasification: A brief review of current status. *Ind. Eng. Chem. Res.* 48, 7865–7875. (pp. 2-9).
- Shedden Uhde Australia. (2009). UCG/GTL technology study prepared for Metrocoal Limited. Melbourne, Australia.
- Shirsat, V. A. (1989). Modeling of cavity growth in underground coal gasification. MSc thesis. Texas Tech University, Texas, USA.
- Singh, B., and Goel, R. K. (1999). Rock mass classification, a practical approach in civil engineering. *Elsevier Science Ltd.* Oxford OX5 1GB, UK. (p. 219).
- Solid Energy. (2011). Quarterly Report.
http://www.coalnz.com/index.cfm/3,491,1162/solid_energy_quarterly_report_to_30_september_2011.pdf
- SSL. (2009). Draft environmental impact for the proposed underground coal gasification pilot project, Secunda, Mpumalanga province. Easol Synfuels and Easol Mining. (p. 17).
- Stanczyk, K., Smolinski, A., Kapusta, K., Wiatowski, M., and Swiadrowski, J., Kotyrba, A., and Rogut, J. (2010). Dynamic experimental simulation of hydrogen oriented underground gasification of lignite. *Elsevier, fuel*. (pp. 4-7).
- Stealth Ventures Ltd. (2011). Annual-Information-Form1.
<http://www.stealthventures.ca/wp-content/uploads/2011/09/2-Annual-Information-Form1.pdf>
- Stone Horn Ridge. (2010). Underground coal gasification: coal energy without mining. (pp. 1-2).
<http://www.stonehornridge.com/documents/SHRFactSheet.pdf>
- SwanHills Synfuels. (2011). Background - Clean gas for clean power. Canada. (p. 1).
<http://swanhills-synfuels.com/wp-content/media/SHS-ISCG-Clean-Power-Background-2011-Final.pdf>
- Thorsness, C., Hill, R. W., and Stephens, D. R. (1980). Preliminary results from an in-situ coal gasification experiment using explosive fracturing. *Lawrence Livermore Laboratory. California, USA.* (p. 66).

- UCG Association. (2012). Worldwide UCG projects and developments.
<http://www.ucgassociation.org/index.php?option=comcontent&view=article&id=70&Itemid=219>
- Versteeg, H. K., and Malalasekera, W. (1995). An introduction to computational fluid dynamics, The finite volume methodes. Longman Scientific and Technical, UK. (pp. 1-4).
- Westblade, D. (2011). Underground coal gasification Projects Hungary. Wildhores Energy Ltd. (pp. 6-7).
- Wu, Y., Peuess, K., and Persoff, P. (1998). Gas flow in porous media with Klinkenberg Effects. *Kluwer Academic Publishers*. Netherlands. (pp. 3-5).
- Wu, Z. Y., Jiang, S. G., He, X. J., wang, L. Y., Lin, B. Q. (2007). Study of 3-D numerical simulation for gas transfer in the goaf of the coal mining. *Journal of China University of Mining and Technology*. (p. 1).
- Yang, L. (2003). Numerical simulation on three-dimensional nonlinear and unstable seepage of fluid in underground coal gasification. *Fuel Processing Technology* 84, 79– 93. (p. 1).
- Yeary, D. L. (1987). Experimental study of lateral cavity growth mechanisms in underground coal gasification. MSc Thesis, Texas Tech University, Texas, USA.
- Younger, P., Gonzalez, G., and Amezaga, J. M. (2010). Water management issues in the underground gasification of coal and the subsequent use of the voids for long-term carbon dioxide storage. *IMWA*. (p. 68).

Abstract

In Underground Coal Gasification (UCG) process, coal seams under different range of thickness, dip and depth without using the conventional coal mining with complicated thermodynamic and chemical processes in-situ by injecting oxidant (air or steam/oxygen mixture) converts into the mixture of combustible gases (CO , H_2 and CH_4) and incombustible gases (N_2 , H_2O and N_2). The resulting gas, called Syngas, is captured at the production well, then cleaned up and be used in many applications, such as the primary use in electricity generation and production of chemicals. Mazino coal mine has about 1400 million tons of thermal coal that don't used in country's steel industry for its coking ability. In this thesis, the prefeasibility study of using the UCG process in Mazino coal mine examined. M26 coal seam of Mazino mine selected as a feasible seam by using the UCG site selection criteria and characterization. One the most important challenge in UCG process is gas seepage of UCG reactor, because the problem in gasification operation and decrease the process recovery, also in this thesis the gas seepage modeled by the numerical method. Therefore, UCG controllable parameters such as gas temperature and operating pressure and uncontrollable parameters including reactor depth and bedrock and bedrock permeability influence investigated. The results show that the gas temperature and reactor depth has a negligible effect, and operating pressure and rock permeability has excess effect in gas seepage.

Keywords: Underground Coal Gasification, Tabas Coal Mines, Mazino Coal Mine, UCG Reactor, Gas Seepage, Computational Fluid Dynamics.



Shahrood University of Technology
School of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

**Gas Seepage Modeling and Analysis of
Underground Coal Gasification (UCG) Reactors,
Case Study: Tabas Coal Mines**

Ali Asghar Lotfi Azad

Supervisors:

Dr. Seyed-Mohammad Esmail Jalali

Dr. Ahmad Ramezanzadeh

**Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc.)
In
Mining Engineering**

September 2012