

برآورد عرض مناسب فضای استخراجی در روش تبدیل به گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG)

مهدی نجفی^۱؛ سید محمد اسماعیل جلالی^{۲*}؛ رضا خالوکاکایی^۳

۱- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی؛ دانشگاه یزد

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

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

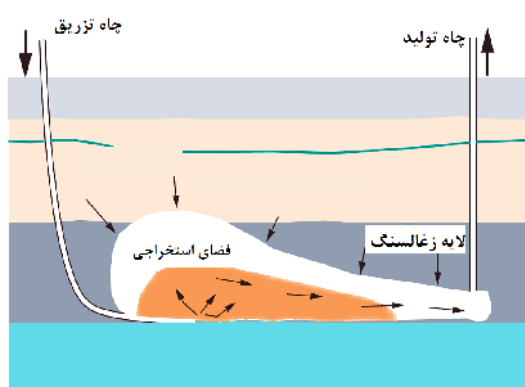
دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۲/۰۴/۲۱؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۱

چکیده	واژگان کلیدی
<p>تعیین عرض مناسب پهنه‌های استخراجی، یکی از مهم‌ترین مراحل طراحی در تبدیل به گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (<i>UCG: Underground Coal Gasification</i>) است. این پارامتر تاثیر مستقیمی بر اقتصادی بودن طرح دارد. کوچک در نظر گرفتن عرض پهنه‌های استخراجی، سبب افزایش هزینه‌های حفاری شده و بزرگ در نظر گرفتن آن سبب می‌شود فرآیند <i>UCG</i> نه تنها از نظر ترکیب گازهای خروجی از کارایی مناسبی برخوردار نباشد، بلکه موجب خاموش شدن راکتور <i>UCG</i> نیز می‌شود. با توجه به اهمیت موضوع تعیین عرض فضای استخراجی در روش <i>UCG</i>، در این مقاله با شناسایی عوامل اثرگذار بر عرض فضای استخراجی، یک رابطه‌ی تجربی جدید با کاربرد رگرسیون چند متغیره‌ی غیر خطی بر اساس داده‌های برگرفته شده از ۶ مجموعه‌ی <i>UCG</i> که به روش منبع احتراق قابل کنترل پسرورایه شده برای برآورد اولیه‌ی عرض مناسب پهنه‌های <i>UCG</i> را تایید می‌نماید. بکارگیری مدل آماری رایبه شده بر روی لایه‌ی زغالی <i>M2</i> مزینوی طبس بیانگر آن است که عرض اولیه‌ی پهنه‌های گاز کردن باید در حدود ۴۵ متر باشد.</p>	<p>زغال سنگ پهنه‌ی استخراجی رگرسیون چند متغیره مزینو</p>

۱- پیشگفتار
روش استخراج یک لایه‌ی زغال سنگ با توجه به عوامل متعددی نظیر شرایط زمین‌ساختی و هندسی لایه‌ی زغال سنگ، ضخامت روباره، وضعیت توپوگرافی محل معدن، امکانات فنی، کاربری زغال سنگ و ملاحظات اقتصادی انتخاب می‌شود. به طور معمول کنسارهای زغال سنگ به روش روباز یا زیرزمینی یا ترکیبی از این دو روش استخراج می‌شود. انتخاب روش استخراج روباز و زیرزمینی وابسته به نسبت باطله‌برداری است. استخراج زیرزمینی زغال سنگ به طور معمول به روش‌های جبهه‌کار بلند (*Longwall*)، اتاق و پایه (*Room and Pillar*) و جبهه‌کار کوتاه (*Shortwall*) انجام می‌شود. در ایران که اغلب حوضه‌های زغال دار دارای ساختمان پیچیده‌ی زمین‌شناسی و هندسی هستند، اغلب معادن زغال سنگ به صورت زیرزمینی و با روش‌های پلکانی معکوس و جبهه‌کار طولانی استخراج می‌شوند. در دنیای امروزی تاکنون تلاش‌های فراوانی به منظور ابداع روش‌ها و فناوری‌های نوین برای استخراج کم‌هزینه‌تر، ایمن‌تر و استفاده‌ی بهینه از زغال سنگ صورت گرفته است. یکی از روش‌هایی که امروزه به دلیل افزایش بازیابی لایه‌های زغال سنگ با ضخامت‌های متغیر و در اعماق زیاد، مورد

استخراج یک لایه‌ی زغال سنگ با توجه به عوامل متعددی نظیر شرایط زمین‌ساختی و هندسی لایه‌ی زغال سنگ، ضخامت روباره، وضعیت توپوگرافی محل معدن، امکانات فنی، کاربری زغال سنگ و ملاحظات اقتصادی انتخاب می‌شود. به طور معمول کنسارهای زغال سنگ به روش روباز یا زیرزمینی یا ترکیبی از این دو روش استخراج می‌شود. انتخاب روش استخراج روباز و زیرزمینی وابسته به نسبت باطله‌برداری است. استخراج زیرزمینی زغال سنگ به طور معمول به روش‌های جبهه‌کار بلند (*Longwall*)، اتاق و

تزریق و تولید، فضای استخراجی (*Cavity*) ایجاد می‌شود و با گذشت زمان در تمام جهات گسترش پیدا می‌کند. در بخشی از فضای استخراجی *UCG* که بخش فعال یا تولیدی نامیده می‌شود، عملیات سوختن و تبدیل زغال‌سنگ به گاز سنتزی انجام می‌پذیرد. بخش دیگر فضای استخراجی، منطقه‌ی غیر تولیدی است که باید تخریب شود. گازهای ترکیبی از فضای استخراجی ایجاد شده در لایه‌ی زغال‌سنگ به داخل چاه تولید منتقل شده و سپس به سطح زمین هدایت می‌شوند.



شکل ۱- فرآیند کلی روش *UCG* [2]

۲-۱- تکنولوژی اجرای *UCG*

تاکنون روش‌های متعددی برای اجرای *UCG* ارائه شده است، اما امروزه روش‌های مبتنی بر منبع احتراق قابل کنترل پسرو (*CRIP: Controlled Retraction Injection Point*) دو یا سه کاناله برای اجرای *UCG* در مقیاس تجاری بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. روش *CRIP* در سال ۱۹۸۱ میلادی توسط آزمایشگاه ملی لورنس لیورمور (*LLNL: Lawrence Livermore National Laboratory*) آمریکا پیشنهاد شده است. در روش *CRIP* دو کاناله، دو چاه به طور موازی در کف لایه‌ی زغال‌سنگ حفاری می‌شود. یکی از چاه‌های افقی به عنوان چاه تزریق و دیگری به عنوان چاه تولید است.

فاصله‌ی بین این دو چاه افقی به عوامل متعددی از جمله ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ بستگی دارد. در این روش، مشعل به صورت پسرو حرکت کرده و اکسیدان به صورت پیوسته و یکنواخت تزریق می‌شود. فاصله‌ی بین چاه‌های

توجه بسیاری از بهره‌برداران قرار گرفته، روش تبدیل به گاز زیرزمینی زغال‌سنگ است.

برای اجرای روش *UCG* همانند سایر روش‌های مرسوم معدن‌کاری معیارهایی باید در نظر گرفته شود. از جمله این معیارها می‌توان به ضخامت لایه (۱ تا ۳۰ متر)، شیب لایه (صفر تا ۷۰ درجه)، نوع زغال‌سنگ (*Coal Rank*) (همه انواع زغال‌سنگ‌ها)، خاکستر لایه (کمتر از ۶۰ درصد)، پراکندگی گسل‌ها و ناپیوستگی‌ها و ذخیره‌ی لایه (بیش‌تر از ۳/۵ میلیون تن) اشاره نمود [1] و [2].

روش *UCG* نسبت به سایر روش‌های استخراج زیرزمینی زغال‌سنگ دارای برتری‌های زیادی از جمله پایین بودن هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و عملیاتی و کاهش قابل توجه خطرات ناشی از معدن‌کاری است. با وجود مزایای زیاد، این روش دارای معایبی است که می‌توان به پیچیدگی در طراحی و عملیاتی کردن آن اشاره نمود.

۲- فرآیند تبدیل به گاز زیرزمینی زغال‌سنگ

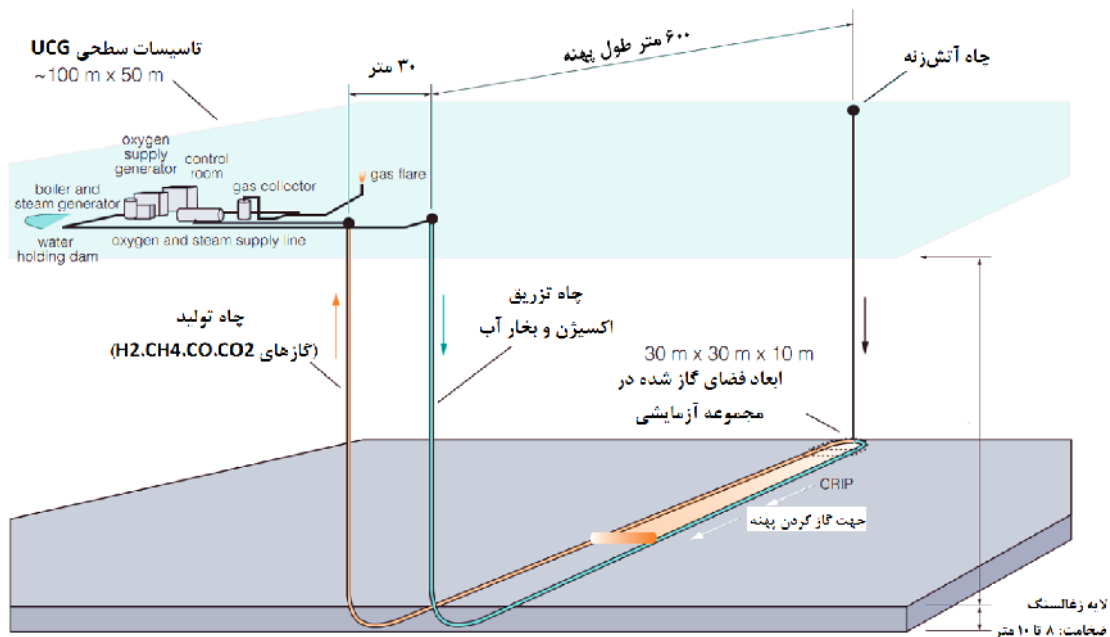
ایده‌ی روش *UCG* برای اولین بار توسط سر ویلیام زیمنس (*Sir William Siemens*)، دانشمند آلمانی، در سال ۱۸۶۸ میلادی پیشنهاد شده است [1]. علاقمندی به کاربرد روش *UCG* به عنوان یک روش جدید در تولید اقتصادی و ایمن انرژی در دهه‌ی اخیر رشد چشم‌گیری پیدا کرده است و اکثر کشورهای تولیدکننده‌ی زغال‌سنگ مانند ایالات متحده آمریکا، روسیه، استرالیا، انگلیس، چین، آفریقای جنوبی، هند، ایرلند، ژاپن، قزاقستان، برزیل، کانادا، نیوزلند، لهستان، اسلواکی، اسلونی، ویتنام، پاکستان، ترکیه، اندونزی و اکراین برنامه‌های گسترده‌ای شامل برنامه‌ریزی و اجرای پروژه‌های نیمه‌صنعتی، صنعتی و نیز احداث نیروگاه‌های بزرگ تولید برق بر پایه‌ی *UCG* را در دستور کار خود قرار داده‌اند [1] و [2].

در فرآیند *UCG* همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، ابتدا چاه‌های تزریق (*Injection Well*) و تولید (*Production Well*) تا رسیدن به سطح لایه‌ی زغال‌سنگ حفاری و به یکدیگر متصل می‌شوند. سپس اکسیدان (مشمعل بر ترکیبی از هوا، اکسیژن و بخار آب) به داخل چاه تزریق ارسال می‌شود تا باعث سوختن زغال‌سنگ و تبدیل آن به گاز شود. با شروع عملیات گاز کردن بین چاه‌های

روش *CRIP* موازی دوکاناله در بلاوود کریک (*Bloodwood Creek*) استرالیا که بر روی یک لایه‌ی زغال‌سنگ به ضخامت ۸ تا ۱۰ متر در سال ۲۰۰۸ اجرا شده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲ مشخص است که *UCG* به روش *CRIP* از نظر شکل پهنه‌ها و پایه‌ی زغال‌سنگ بر جای گذاشته شده بین پهنه‌ها شباهت‌های زیادی به روش جبهه‌کاربلند دارد [3].

تزریق یا تولید با چاه آتش‌زدن در روش دوکاناله می‌تواند بیش از ۶۰۰ متر باشد. بنابراین با افزایش فاصله‌ی بین چاه‌ها، مترای حفاری کاهش یافته و به دنبال آن هزینه‌های حفاری به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. در این روش برای پیشگیری از تاثیر کارگاه‌های مجاور بر روی هم، پایه‌ای بین کارگاه‌ها باقی گذاشته می‌شود [2].

شکل ۲، یکی از پیشرفته‌ترین مجموعه‌های *UCG* به



شکل ۲- شمایی از روش *UCG* از نوع *CRIP* دوکاناله در مجموعه‌ی بلاوود کریک [2]

نهایی پهنه‌های طراحی شده در این مجموعه برابر با ۱۶۰ متر و طول آن‌ها ۱۰۰۰ متر است که در عمق متوسط ۶۰۰ متری از سطح زمین قرار گرفته است [2].

۲-۲- ملاحظات فنی-اقتصادی *UCG*

در روش *UCG* ابعاد فضای استخراجی و شکل محدوده‌ای که در اثر اجرای فرآیند *UCG* ایجاد می‌شود، بر اقتصادی بودن این روش تاثیر می‌گذارد. شکل فضای استخراجی ایجاد شده در اثر فرآیند *UCG* به شدت تحت تاثیر مجموعه‌ای از عوامل محیطی (عوامل قابل کنترل و غیر قابل کنترل)، تنش‌های القایی، شکستگی‌ها، تخریب سقف و ملاحظات کنترل نشست زمین است [4] و [5].

فاصله‌ی بین چاه‌های تزریق و تولید در روش *CRIP*

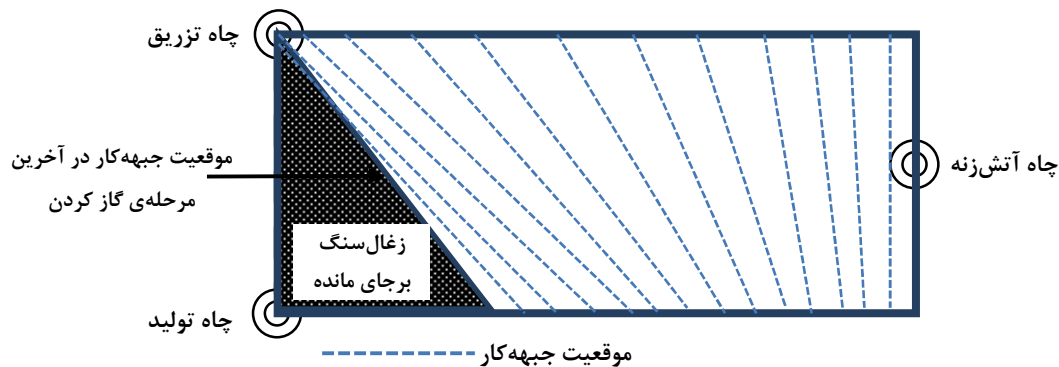
طرح استخراجی این مجموعه شامل سه ردیف چاه تولید و چهار چاه تزریق است. عرض پهنه‌های استخراجی بین هر کدام از چاه‌های تزریق و تولید ۳۰ متر تعیین شده است و پس از استخراج پهنه با عرض ۱۸۰ متر، بین پهنه‌ها یک پایه‌ی زغالی به عرض ۶۰ متر بر جای گذاشته می‌شود. به عبارتی دیگر طرح ارایه شده، مشابه روش *CRIP* سه کاناله است. تاکنون روش *UCG* در مقیاس تجاری به روش سه کاناله اجرا نشده است اما طراحی چند مجموعه‌ی *UCG* برای پیاده‌سازی این روش انجام شده یا در حال انجام است. از آن جمله می‌توان به مجموعه‌ی *Mecsek Hills* در مجارستان اشاره نمود که قرار است عملیات اجرایی آن در سال ۲۰۱۵ به روش *CRIP* سه کاناله آغاز شود. عرض

این روش کمتر از مقدار مناسب آن در نظر گرفته شود، بر اقتصادی بودن روش تاثیر بسزایی می‌گذارد. از مهم‌ترین پارامترهای هزینه‌ای در این روش، هزینه حفاری چاه‌های تزریق و تولید است که با کوچک‌تر در نظر گرفتن عرض پهنه این هزینه افزایش می‌یابد.

در صورتی که عرض پهنه بزرگ‌تر از مقدار مناسب آن در نظر گرفته شود، افت فشار در چاه تولید افزایش می‌یابد. با افزایش افت فشار، میدان سرعت در فضای استخراجی تغییر می‌کند و بر گسترش فضا در جهات مختلف اثر می‌گذارد. مجموعه این عوامل سبب می‌شود جبهه‌کار زغالی به صورت یکنواخت پیشروی نکرده و هر چه از مدت زمان فرآیند بگذرد، این غیر یکنواختی افزایش پیدا می‌کند. بدیهی است در این شرایط در انتهای زمان عملیات استخراج هر پهنه، مقدار زیادی از زغال‌سنگ در اطراف چاه تولید به گاز تبدیل نشود. این شرایط به صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است.

بیانگر محدوده‌ی جبهه‌کار فعال استخراجی است که در آن زغال‌سنگ به گاز تبدیل می‌شود. برای این که همواره در این فاصله، زغال‌سنگ به گاز تبدیل شود، لازم است مقادیر کافی اکسیدان به داخل لایه‌ی زغال‌سنگ تزریق شود و دمای جبهه‌کار بالای ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد باقی بماند. این امر نیازمند آن است که نرخ تزریق اکسیدان با در نظر گرفتن نشست گاز به داخل طبقات سقف به صورت دوره‌ای تنظیم شود. در تعیین عرض مناسب پهنه‌ی استخراجی (فاصله‌ی چاه‌های تزریق و تولید) پارامترهایی از جمله ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ، ارزش گرمایی زغال‌سنگ (*Coal Calorific Value*) و میزان آب وارد شده به داخل فضای استخراجی تاثیرگذار هستند. هر چند مقدار آب ورودی به داخل فضای استخراجی توسط فشار تزریق اکسیدان و میزان تخلیه‌ی گازها قابل کنترل است [4] و [5].

تعیین عرض مناسب پهنه‌های *UCG* به روش *CRIP* از جهات زیر حایز اهمیت است: در صورتی که عرض پهنه در



شکل ۳- اثر بزرگ‌تر در نظر گرفتن عرض پهنه بر موقعیت جبهه‌کار استخراجی

ارایه‌ی یک رابطه‌ی جدید برای محاسبه‌ی عرض مناسب پهنه‌های استخراجی *UCG* به روش احتراق قابل کنترل پسرو (*CRIP*) است. این رابطه بر اساس مطالعات انجام گرفته بر روی مجموعه‌های *UCG* دنیا که با روش *CRIP* اجرا شده‌اند، بر حسب تابعی از نفوذپذیری لایه‌ی زغال‌سنگ، ضخامت لایه، عمق لایه، ارزش گرمایی زغال‌سنگ و فشار عملیاتی تزریق (فشار گاز داخل فضای استخراجی) با استفاده از رگرسیون غیر خطی ارایه شده است.

۳- هدف پژوهش

با توجه به مفاهیم بیان شده، تاکنون رابطه‌ی تجربی خاصی در دنیا برای تعیین عرض پهنه در روش گاز کردن زیرزمینی زغال‌سنگ ارایه نشده است. مطالعاتی که در کشور انجام شده است نیز بیشتر در زمینه‌ی مدلسازی نشست گاز از کارگاه‌های استخراج *UCG* [۶]، بررسی پارامترهای موثر بر رشد فضای استخراجی در روش گاز کردن زیرزمینی زغال‌سنگ [۷] و تحلیل پایداری فضای استخراجی در روش *UCG* بوده است [۸]. بنابراین، هدف اصلی این پژوهش،

Working Group)، برآورد نسبت عرض فضای استخراجی به طول آن در یک لایه‌ی زغال‌سنگ پیچیدگی‌های خاصی را دارد و برآورد آن به آسانی امکان‌پذیر نیست. بر اساس گزارش ارایه شده توسط این گروه، این نسبت تقریباً بین ۰/۰۶ تا ۰/۱ برآورد شده است [10].

جدول ۱- عرض بحرانی کارگاه استخراج *UCG* [9]

مجموعه <i>UCG</i>	نوع اکسیدان	ضخامت لایه (متر)	عرض بحرانی کارگاه استخراج (متر)
<i>Tula</i>	هوا و اکسیژن	۴	۳۶
<i>Lisichansk</i>	هوا	۳	۲۷
<i>Lisichansk</i>	اکسیژن	۳	۵۷
<i>Yuzhno-Abinsk</i>	هوا	۲	۱۴
<i>Newman-Spinney</i>	هوا	۱	۲۴

نتایج حاصل از اجرای مجموعه‌ی ال‌ترمیمیدال (*El Tremedal*) اسپانیا نشان داده است عرض فضای استخراجی فعال *UCG* حداقل ۵ برابر ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ و ارتفاع آن بیش از ۲ برابر ضخامت لایه است [2]. مطالعات آزمایشگاهی داگوپاتی (*Daggupati*) و همکاران بر روی ۴۸ نمونه بلوک زغال‌سنگ منجر به ارایه‌ی یک رابطه‌ی تجربی در مورد عرض فضای استخراجی *UCG* بر اساس نرخ جریان ورودی، فاصله‌ی بین چاه‌های تزریق و تولید و زمان عملیات گازکردن شده است و گزاره‌ی آن به صورت زیر است [11]:

$$W = 0.0019 \times D_w^{0.24} \times Q^{0.29} \times t^{0.22} \quad (1)$$

با توجه به مطالعات اندک پیشین و مطالب فوق، پارامترهای ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ، ارتفاع روباره، نفوذپذیری زغال‌سنگ، ارزش گرمایی زغال‌سنگ و فشار عملیاتی تزریق به عنوان عوامل موثر در تعیین عرض پهنه مد نظر قرار گرفته است. عوامل موثر بر تعیین عرض مناسب پهنه بر اساس جستجوی کتابخانه‌ای گردآوری و در جدول ۲ بیان شده است.

۵- روش پژوهش

از سال ۱۹۳۰ تا ۲۰۱۰ میلادی بیش از ۵۰ مجموعه *UCG*

۴- جمع‌آوری اطلاعات برای محاسبه‌ی عرض مناسب پهنه‌ی *UCG*

خوشبختانه اطلاعات بیشتر مجموعه‌های *UCG* انجام شده در دنیا به روش سنتی و *CRIP* به گونه‌ای است که می‌توان از آن‌ها برای بهینه‌سازی فرآیند در مجموعه‌های جدید استفاده نمود. با بررسی این اطلاعات می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

عرض پهنه‌های استخراجی در روش *UCG* با پدیده‌ی انتقال حرارت (*Heat Transfer*) کنترل می‌شود. بر این اساس سرعت تزریق اکسیدان نقش مهمی در افزایش عرض بحرانی فضای استخراجی دارد و در شرایط یکسان در صورتی که با افزایش عرض کارگاه استخراج، نرخ تزریق اکسیدان افزایش نیابد، واکنش‌های شیمیایی کمتری در داخل کارگاه استخراج به وقوع می‌پیوندد [9]. با توجه به این موضوع وارنر (*Warner*) و زکلی (*Szekely*) یک معادله‌ی انتقال حرارت برای پیش‌بینی عرض فضای استخراجی *UCG* ارایه کرده‌اند. در این مدل فرض شده است نصف عرض کارگاه استخراج تابعی از ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ، ارزش گرمایی زغال‌سنگ و ریشه‌ی دوم سرعت اولیه‌ی سوختن است.

عرض بحرانی فضای استخراجی *UCG* در مجموعه‌های اجرا شده در اتحاد جماهیر شوروی سابق و بریتانیا در جدول ۱ آورده شده است. نکته‌ی قابل توجه آن است که عرض بحرانی کارگاه استخراج به نوع اکسیدان و نوع زغال‌سنگ وابسته است و در حالتی که از هوا به عنوان اکسیدان استفاده شود، عرض بحرانی فضای استخراجی می‌تواند بین ۵ تا ۱۰ برابر ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ باشد. این نسبت در حالتی که از اکسیژن استفاده شود، بیشتر است. به عنوان نمونه در مجموعه‌ی *UCG* هانا (*Hanna*) به دلیل کوچک در نظر گرفتن فاصله‌ی چاه‌های تزریق و تولید (۲۰ متر)، عرض فضای استخراجی هیچ‌گاه به عرض بحرانی نرسیده است. نتایج حاصل از اجرای مجموعه‌های *UCG* در اتحاد جماهیر شوروی سابق نشان داده است به دلیل دمای پایین سوختن زغال‌سنگ در داخل کارگاه استخراج، نسبت عرض به ضخامت لایه در زغال‌سنگ با درجه‌ی پایین، کم است [9].

بر اساس گزارش گروه کاری اروپا (*European*)

برنامه‌ریزی شده) انجام شده است. با توجه به نوع و حجم اطلاعات مندرج در جدول ۲ می‌توان از مدل‌های رگرسیون خطی و غیر خطی استفاده نمود. در این مدل‌ها، عرض پهنه به عنوان متغیر وابسته و پارامترهای ضخامت لایه، نفوذپذیری لایه، ارزش گرمایی زغال‌سنگ، ارتفاع روباره و فشار تزریق به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته می‌شوند.

در دنیا اجرا شده است. این مجموعه‌ها بیشتر در کشورهای آمریکا، اتحاد جماهیر شوروی سابق، استرالیا، چین و آفریقای جنوبی بوده است. اتحاد جماهیر شوروی سابق، کشوری پیش‌تاز در زمینه‌ی اجرای UCG بوده، ولی اطلاعات مجموعه‌های UCG آن به ندرت در دسترس است. این تحقیق بر اساس روش تجربی و تحلیل آماری اطلاعات مجموعه‌های UCG با روش CRIP (اجرا یا

جدول ۲- اطلاعات مجموعه‌های UCG

منبع	<i>W</i>	<i>CCV</i>	<i>CP</i>	<i>OP</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	پارامتر	مجموعه‌ی UCG
	متر	کیلوکالری بر کیلوگرم	داریسی	کیلوپاسکال	متر	متر	کشور	
[2], [4], [12], [13] & [14]	۵۰	۴۲۹۵/۹۲	۰/۰۰۱۹۶	۵۰۰۰	۵۸۰	۵	اسپانیا	<i>El Tremedal</i>
[2], [4], [12], [13] & [15]	۳۰	۴۱۴۱/۲۳	۰/۱	۵۰۰	۱۳۰	۷	آمریکا	<i>RMI</i>
[2]	۵۰	۴۰۳۰	۰/۰۸	۱۴۰	۱۶۰	۳	آفریقای جنوبی	<i>Secunda</i>
[2]	۸۰	۵۳۴۶	۰/۰۱	۵۱۰۰	۶۰۰	۷	مجارستان	<i>Mecsek Hills</i>
[1], [2], [12], [13]	۲۵	۴۳۶۷/۵۲	۰/۰۴	۱۱۰۰	۱۴۰	۱۰	استرالیا	<i>Chinchilla</i>
[1], [2], [12], [13] & [16]	۳۰	۴۹۴۰/۳۱	۰/۰۳	۱۱۲۰	۲۰۰	۹	استرالیا	<i>Bloodwood Creek</i>

ساده برای عرض پهنه با هر کدام از متغیرهای مستقل ارایه نمود. در صورتی‌که بیشتر از یک متغیر برای توصیف تغییرات یک متغیر وابسته وجود داشته باشد، باید از رگرسیون چند متغیره‌ی خطی (*Multiple Linear Regression*) یا غیر خطی (*Multiple Non-Linear Regression*) استفاده شود.

۶-۱- مدل رگرسیون چند متغیره‌ی خطی

مدل کلی رگرسیون چند متغیره‌ی خطی به صورت گزاره‌ی (۲) است:

$$y = \beta_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + e \quad (2)$$

فاصله‌ی نقطه‌ی مشاهده شده از خط رگرسیون (مقدار پیش‌بینی شده)، مقدار باقیمانده نامیده می‌شود. مقادیر باقیمانده‌ی کمتر، نشان‌دهنده‌ی پیش‌بینی بهتر است. برای قضاوت در مورد رابطه‌ی خطی چند متغیره‌ی خوب، از ضریب همبستگی استفاده می‌شود.

برای تعیین ضرایب مجهول رگرسیون می‌توان از

۶- مدل تجربی

در اولین مرحله از این تحقیق، مجموعه‌ای از تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار *SPSS21* بر روی داده‌های جدول ۲، بین هر مجموعه متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (عرض پهنه) انجام شده است. تحلیل اولیه‌ی رگرسیون بر اساس رگرسیون خطی (*Linear Regression*)، توانی (*Power*)، لگاریتمی (*Logarithmic*) و نمایی (*Exponential*) به منظور آگاهی از همبستگی جداگانه بین هر کدام از متغیرهای مستقل با عرض پهنه انجام شد. نتایج تحلیل رگرسیون ساده بین هر کدام از متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (عرض پهنه) در جدول ۳ نشان داده شده است.

حداکثر ضریب تعیین (*Determination Coefficient*) بین هر کدام از متغیرهای مستقل با عرض پهنه ۶۲ درصد است. بر این اساس با توجه به نتایج به دست آمده، نمی‌توان به تنهایی رابطه‌ای براساس رگرسیون خطی

به منظور ارزیابی یک مدل آماری برای برآورد عرض پهنه، از گزاره‌ی (۳) و داده‌های جدول ۲ استفاده شده است. رگرسیون غیر خطی با کمک نرم افزار SPSS21 انجام و نتایج تجزیه و تحلیل‌ها منجر به ارزیابی گزاره‌ی (۴) برای برآورد عرض پهنه شده است:

$$W = \frac{D \times CP^{0.361} \times OP^{0.09}}{\text{Log}(CCV)^{0.133} \times h^{0.49}} \quad (4)$$

نتایج رگرسیون انجام شده نشان دهنده‌ی آن است که ضریب همبستگی گزاره‌ی (۴) (بیشتر از ۹۹ درصد است. بر این اساس پیش‌بینی می‌شود عرض پهنه با فاصله‌ی اطمینان بالایی بر اساس متغیرهای مستقل قابل محاسبه است.

۶-۳- اعتبارسنجی مدل ارزیابی شده

برای اعتبارسنجی مدل ارزیابی شده، نتایج به دست آمده از بررسی آماری، در جدول ۴ آورده شده است. برای کنترل معنی‌داری مدل از آزمون F استفاده شده است. مقدار F به دست آمده از جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد کوچک‌تر از F به دست آمده از مدل است. بنابراین می‌توان فرضیه‌ی صفر (رابطه‌ی خطی بین متغیرهای وابسته و مستقل وجود ندارد) را رد کرد و نتیجه گرفت حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نیست. علاوه بر این مقدار سطح معنی‌داری محاسبه شده کمتر از ۰/۰۰۵ است که خود دلیل دیگری بر صحت مدل ارزیابی شده است.

در جدول ۵ مقادیر واقعی و برآورده شده‌ی عرض پهنه در مجموعه‌های UCG به همراه خطای نسبی آن‌ها در $(Relative Error)$ نشان داده شده است. خطای نسبی نشان‌دهنده‌ی فاصله‌ی نسبی هر داده از خط با شیب ۴۵ درجه است. لازم به ذکر است میانگین خطای نسبی محاسبه شده برابر با ۴ درصد است. مقدار خطای نسبی هر پارامتر از تقسیم قدرمطلق تفاضل مقدار واقعی با مقدار پیش‌بینی شده بر مقدار واقعی محاسبه شده است.

نرم‌افزارهای آماری مانند SPSS استفاده نمود. در این مطالعه از نرم افزار SPSS21 برای این هدف استفاده شده است. بر این اساس به منظور ارزیابی یک مدل آماری برای برآورد عرض پهنه با استفاده از گزاره‌ی (۲) و داده‌های جدول ۲، محاسبات گسترده‌ای انجام شده که روابط بدست آمده دارای ضریب همبستگی مناسبی نبودند. به علاوه نتایج تحلیل‌های انجام شده، نشان داده است خطای استاندارد ضرایب رگرسیون مقادیر بالاتری از مقدار تخمینی ضریب رگرسیون دارد که خود نشان‌دهنده‌ی اعتبار پایین مدل چند متغیره‌ی خطی بوده است. از این رو محاسبات با استفاده از رگرسیون چند متغیره‌ی غیر خطی انجام شده است.

جدول ۳- ضریب همبستگی بین متغیر وابسته (عرض پهنه) و متغیرهای مستقل

متغیر مستقل	واحد	مدل رگرسیون		
		خطی	توانی	لگاریتمی
ضخامت لایه	متر	۰/۲۱	۰/۲۶	۰/۱۴
عمق لایه	متر	۰/۶۳	۰/۶۲	۰/۶۳
نفوذپذیری لایه	دارسی	۰/۳۴	۰/۴۶	۰/۳۵
ارزش گرمایی زغال سنگ	کیلوکالری بر کیلوگرم	۰/۲۷	۰/۱۵	۰/۲۵
فشار تزریق	کیلوپاسکال	۰/۵۱	۰/۱۴	۰/۱۸

۶-۲- مدل رگرسیون چند متغیره‌ی غیر خطی

مدل کلی رگرسیون چند متغیره‌ی غیر خطی به صورت گزاره‌ی (۳) است:

$$Y = \alpha_0 (X_1^{\alpha_1}) (X_2^{\alpha_2}) \dots (X_n^{\alpha_n}) \quad (3)$$

جدول ۴- نتایج آماری مدل رگرسیون چند متغیره‌ی غیر خطی برای برآورد عرض پهنه

مدل	مجموع مربعات	درجه‌ی آزادی	میانگین مربعات	F مدل	F جدول	سطح معنی‌داری
رگرسیون	۱۳۸۱۲/۴	۴	۳۴۵۳/۱۰۶	۵۴۹	۶/۹۴۴	۰/۰۰۰
باقیمانده (۲)	۱۲/۵۷۴	۲	۶/۲۸۷			
مجموع	۱۳۸۲۵	۶				

غرب شهرستان طیس در استان یزد واقع شده است. در منطقه‌ی مزینو، ۷۵ لایه‌ی زغال‌سنگ شناسایی شده است [۱۷]. زغال‌سنگ‌های ناحیه‌ی مزینو از نوع آنتراسیت و نیمه‌آنتراسیت هستند و شیب لایه‌های زغالی آن کمتر از ۳۰ درجه است که خود نشان‌دهنده‌ی مناسب بودن تمام لایه‌های زغالی برای اجرای *UCG* در این منطقه است. ضخامت لایه‌های زغالی در منطقه‌ی مزینو متفاوت است. از بین لایه‌های منطقه‌ی مزینو، لایه‌های *M5*، *M26*، *M25*، *M4*، *M2* و *M1* دارای ضخامت بیشتر از یک متر هستند و اولویت بالاتری برای اجرای *UCG* دارند.

از آنجا که در این تحقیق هدف برآورد عرض مناسب فضای استخراجی (پهنه) *UCG* در روش *CRIP* دوکاناله است، دو پارامتر ضخامت لایه و ذخیره‌ی زغال‌سنگ دارای اهمیت زیادی هستند. از بین لایه‌های منطقه‌ی مزینو، لایه‌ی *M2* به دلیل ضخامت بالا و ذخیره‌ی زیاد نسبت به سایر لایه‌های بررسی شده، دارای برتری قابل ملاحظه‌ای است و قادر است به مدت بیش از ۱۰۰ سال گاز سنتزی یک نیروگاه ۲۰۰ مگاواتی را تامین نماید. با توجه به بررسی‌های *Shafirovich* و *Arvind* در سال ۲۰۰۹، میزان ذخیره‌ی مورد نیاز برای یک نیروگاه ۲۰۰ مگاواتی در مدت ۲۰ سال در شرایطی که ارزش حرارتی برجای زغال‌سنگ در حدود ۵۰۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم فرض شود، برابر با ۲۴ میلیون تن است [۱۸]. بنابراین این لایه به عنوان لایه‌ی قابل کار برای استخراج به روش *UCG* انتخاب شده است. در جدول ۶ مشخصات لایه‌ی مورد نظر برای تعیین عرض پهنه نشان داده شده است.

جدول ۶- مشخصات لایه‌ی *M2* در مزینوی طیس [۱۷]

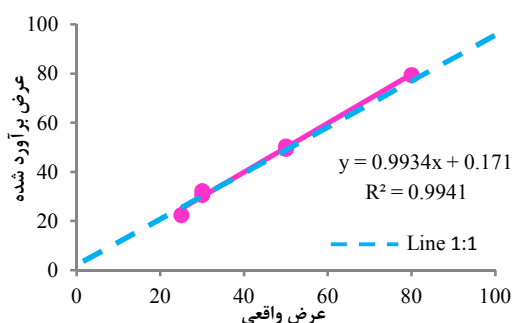
عرض پهنه (m)	<i>CCV</i> (kCal/kg)	<i>CP</i> (داری)	<i>OP</i> (kPa)	<i>D</i> (m)	<i>h</i> (m)	لایه
۴۵	۵۰۶۶	۰٫۰۰۰۸	۵۰۰۰	۶۰۰	۳٫۵	<i>M2</i>

با کاربرد مدل آماری ارائه‌ی شده در این تحقیق، عرض پهنه‌های استخراجی *UCG* به روش *CRIP* در لایه‌ی *M2* در منطقه‌ی زغالی مزینوی طیس، در حدود ۴۵ متر محاسبه شده است. روشن است عرض محاسبه شده یک

جدول ۵- مقایسه‌ی نسبی عرض واقعی با مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل ارائه شده

مجموعه‌ی <i>UCG</i>	عرض واقعی (متر)	عرض شده (متر)	خطای نسبی (درصد)
<i>El Tremedal</i>	۵۰	۵۰٫۳۳	۰
<i>RMI</i>	۳۰	۳۲٫۱۷	۷
<i>Secunda</i>	۵۰	۴۹٫۳۶	۱
<i>Mecsek hills</i>	۸۰	۷۹٫۳۸	۱
<i>Chinchilla</i>	۲۵	۲۲٫۴۱	۱۰
<i>Bloodwood Creek</i>	۳۰	۳۰٫۶۲	۲

در شکل ۴ مقادیر عرض واقعی بر حسب مقدار پیش‌بینی شده آن ترسیم شده است. روشن است که خط با شیب ۴۵ درجه به نحوی است که نسبت مقادیر به صورت برابری در اطراف این خط قرار می‌گیرد. بر اساس موارد بیان شده برای اعتبارسنجی، اعتبار مدل آماری ارائه‌ی شده مورد تایید است و با کمک آن می‌توان عرض مناسب پهنه در مجموعه‌های جدید *UCG* که قرار است به روش *CRIP* به گاز تبدیل شوند، با قابلیت اعتماد بالایی برآورد نمود. از این رابطه برای تعیین عرض مناسب پهنه در روش *CRIP* دوکاناله در منطقه‌ی زغالی مزینوی طیس استفاده شده است.



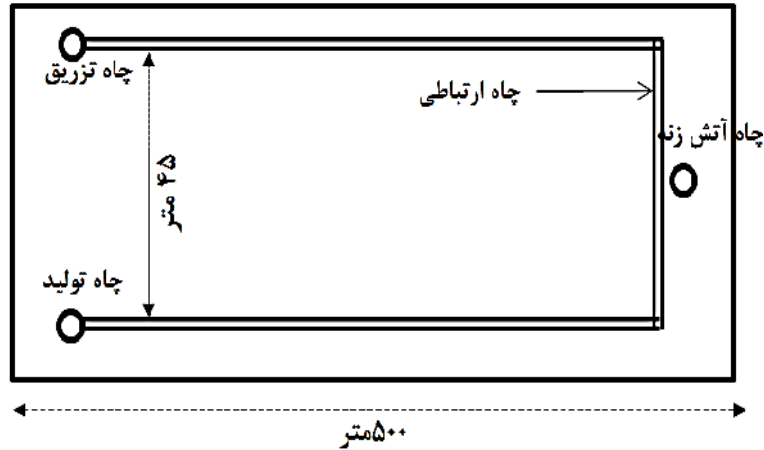
شکل ۴- نمودار مقایسه‌ی مقادیر واقعی عرض پهنه و مقادیر برآورد شده

۷- مطالعه‌ی موردی: منطقه‌ی مزینوی طیس

ناحیه‌ی زغال‌سنگی مزینو، ۸۸۰۰ کیلومتر مربع از حوضه‌ی زغال‌دار طیس را در بر می‌گیرد. این ناحیه در ۸۵ کیلومتری

تصحیح است. بر این اساس ابعاد پیشنهادی پهنه‌های *UCG* در منطقه‌ی زغالی مزینوی طبس در شکل ۵ نشان داده شده است.

طرح اولیه است و همانند سایر روش‌های مرسوم معدن‌کاری که در آن با گذشت زمان و بدست آوردن اطلاعات تفصیلی و دقیق‌تر در حین استخراج، بروزرسانی می‌شود، نیازمند



شکل ۵- طراحی مجموعه‌ی *UCG* مزینوی طبس

مجموعه‌های *UCG* است.

بر اساس مدل ارایه شده، عرض پهنه‌ی استخراجی در منطقه‌ی زغالی مزینوی طبس برابر با ۴۵ متر برآورد شده است. برای پیاده‌سازی تجاری *CRIP* در این منطقه، پیشنهاد می‌شود در ابتدا مطالعات امکانسنجی با هدف تامین گازسنجی یک نیروگاه برق (به عنوان نمونه ۲۰۰ مگاواتی) انجام شود تا بتوان بر اساس آن تعداد پهنه‌های استخراجی که باید سالیانه به گاز تبدیل شود را تعیین نمود. سپس بر اساس آن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و جاری پروژه را محاسبه و در مورد اقتصادی بودن آن تصمیم‌گیری نمود.

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدلی آماری با رگرسیون چند متغیره‌ی غیر خطی برای برآورد عرض پهنه‌های استخراجی *UCG* به روش *CRIP* ارایه شده است. این مدل بر اساس اطلاعات ۶ مجموعه‌ی *UCG* به روش *CRIP* توسعه داده شده و در آن عوامل موثر بر عرض پهنه شامل ضخامت و عمق لایه، نفوذپذیری و ارزش گرمایی زغال‌سنگ و فشار عملیاتی تزریق گاز در نظر گرفته شده است. این مدل می‌تواند عرض پهنه را با قابلیت اطمینان بالایی برآورد نماید. مهم‌ترین کاربرد این مدل، طراحی عرض پهنه‌های استخراجی در

۹- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
h	m	ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ	OP	kPa	فشار عملیاتی تزریق
D	m	عمق لایه	-	-	ضریب رگرسیون (خطی)
CP	$Darcy$	نفوذپذیری زغال‌سنگ	x	-	متغیر مستقل (خطی)
CCV	$kCal/kg$	ارزش گرمایی زغال‌سنگ	y	-	متغیر وابسته (خطی)
Q	mm/min	نرخ جریان ورودی	e	-	خطای تصادفی (خطی)
W	m	عرض فضای استخراجی	Y	-	متغیر وابسته (غیر خطی)
t	min	زمان گاز کردن	-	-	ثابت اختیاری (غیر خطی)
D_w	cm	فاصله‌ی چاه‌های تزریق و تولید	-	-	متغیر مستقل (غیر خطی)

۱۰- منابع ها

- [1] Burton, E., Friedmann, J., & Upadhye, R. (2006). *Best Practices in Underground Coal Gasification*. US DOE Contract No. W-7405-Eng-48. Livermore, CA, USA: Lawrence Livermore National Laboratory. <https://www.purdue.edu/discoverypark/energy/assets/pdfs/cctr/BestPracticesinUCG-draft.pdf>.
- [2] Couch, G. R. (2009). *Underground Coal Gasification*. IEA Clean Coal Centre. ISBN 978-92-9029-471-9. <http://www.coalonline.info/DocId=7790>.
- [3] Younger, P. L. (2011). Hydrogeological and Geomechanical Aspects of Underground Coal Gasification and its Direct Coupling to Carbon Capture and Storage. *Mine Water and the Environment*, 30(2), 127-140. <http://dx.doi.org/10.1007/s10230-011-0145-5>.
- [4] Perkins, G. M. P. (2005). *Mathematical Modeling of Underground Coal Gasification*. PhD Thesis: School of Materials Science & Engineering, Faculty of Science, The University of New South Wales. <http://handle.unsw.edu.au/1959.4/25518>.
- [5] Sarraf Shirazi, A., Mmbaga, J. P., Gupta, and Hayes, R. E. (2011). Modeling Cavity Growth during Underground Coal Gasification. *2011 COMSOL Conferences in Boston*. ISBN: 9780983968825. http://www.comsol.com/paper/download/83903/shirazi_paper.pdf.
- [۶] لطفی آزاد، ع. ا. (۱۳۹۱). برآورد میزان نشت در کارگاه‌های استخراج UCG. مطالعه‌ی موردی معدن زغال‌سنگ مزینوی طبس. پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۷] نجفی، م.، جلالی، س. م. ا.، و خالوکاکی، ر. (۱۳۹۱). بررسی پارامترهای موثر بر رشد کواک ایجاد شده در اثر فرآیند گاز کردن زیرزمینی زغال‌سنگ (UCG). چهارمین کنفرانس مهندسی معدن. دانشگاه تهران.
- [۸] موسوی، م. (۱۳۹۰). تحلیل پایداری کارگاه‌های استخراج UCG. مطالعه‌ی موردی معدن زغال‌سنگ تخت. پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد، دانشگاه یزد.
- [9] Dinsmoor, B., Galland, J. M., & Edgar, T. F. (1978). The Modeling of Cavity Formation during Underground Coal Gasification. *Journal of Petroleum Technology*, 30(5), 695-704. <http://dx.doi.org/10.2118/6185-PA>.
- [10] Creedy, D. P., Garner, K., Holloway, S., Jones, N., & Ren, T. X. (2001). *Review of Underground Coal Gasification Technological Advancements*. Harwell Laboratory, Coal R & D Programme. ASIN: B0018UFW04.
- [11] Daggupati, S., Mandapati, R. N., Mahajani, S. M., Ganesh, A., Mathur, D. K., Sharma, R. K., & Aghalayam, P. (2010). Laboratory Studies on Combustion Cavity Growth in Lignite Coal Blocks in The Context of Underground Coal Gasification. *Energy*, 35(6), 2374-2386. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.015>.
- [12] Bhutto, A. W., Bazmi, A. A., & Zahedi, G. (2013). Underground Coal Gasification: from Fundamentals to Applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 39(1), 189-214. <http://dx.doi.org/10.1016/j.peccs.2012.09.004>.
- [13] Sarraf Shirazi, A. (2012). *CFD Simulation of Underground Coal Gasification*. MSc Thesis: Department of Chemical and Materials Engineering, University of Alberta. <http://hdl.handle.net/10402/era.28099>.
- [14] DTI. (2004). *Review of the Feasibility of Underground Coal Gasification in the UK*. Cleaner Fossil Fuels Programme. <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+http://www.berr.gov.uk/files/file19143.pdf>.
- [15] Dennis, S. (2006). *Rocky Mountain 1 Underground Coal Gasification Test Project Hanna, Wyoming*. Final Technical Report for the Period 1986 to 2006. U.S. Department of Energy. CN: DE-FC21-86LC11063.

[16] Mallett, C., & Burl, D. (2010). Bloodwood Creek UCG Pilot, 2008-2010. *International Pittsburgh Coal Conference* (pp. 250-253). Istanbul, Turkey. ISBN: 9781617823213.

[۱۷] شرکت زغال‌سنگ پروده طبس. (۱۳۷۹). خلاصه نتایج گزارشات عملیات اکتشاف مقدماتی منطقه‌ی ۱ مزینو.

[18] Shafirovich, E., Mastalerz, M., Rupp, J., & Varma, A. (2008). *The Potential for Underground Coal Gasification in Indiana*. Presentations of Phase I Report to Indiana Center for Coal Technology Research (CCTR). <http://www.purdue.edu/discoverypark/energy/assets/pdfs/ctr/presentations/UCG-09-16-08.pdf>.