

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک  
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن

شبیه سازی عددی میزان گسترش فضای استخراجی در روش گاز کردن زیرزمینی  
زغال سنگ (UCG) به روش منبع احتراق قابل کنترل پسرو (CRIP) در مقیاس تجاری

نگارنده: امین جوکار

اساتید راهنما

دکتر فرهنگ سرشکی

دکتر مهدی نجفی

شهریور ۱۳۹۶

شماره: ۲۰۱۸/۹۶/۲۰۴  
تاریخ: ۹۶/۷/۲۰

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای امین جوکار با شماره دانشجویی ۹۴۰۵۳۰۴ رشته مهندسی معدن گرایش استخراج نحت عنوان شبیه سازی عددی میزان گسترش فضای استخراجی در روش گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG) به روش منبع احتراق قابل کنترل پسر و (CRIP) در مقیاس تجاری که در تاریخ ۱۳۹۶/۶/۲۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: شماره: ۱۸۷۵)  مردود   
 نوع تحقیق:  نظری  عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبط علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	فرهنگ سرشکی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	مهدی نجفی	استادیار	
۳- استاد مشاور	-	-	-
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	مهدی نوروزی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	رضا خالوکاکی	استاد	
۶- استاد ممتحن دوم	سید محمد اسماعیل جلالی	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: علیرضا عرب امیری  
 تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:  
 ۹۶/۷/۲۰



تقدیم به:

## همه‌ی کسانی که قدم در راه حق می‌گذارند

ظاهر پرستان و ظاهر بینان از حال عشاق و شیدائیان آگاهی ندارند و چه طعنه‌ها و کنایه‌هایی که درباره‌ی آن‌ها نمی‌گویند. تاریخ پر است از سرگذشت انسان‌های فداکاری که عاشقانه قدم در راه حق می‌گذارند و تا می‌خواهند کاری را آغاز کنند، ظاهر بینان و متعصبان و جزم‌اندیشان و ساده‌لوحان شروع به سرزنش و شماتت آنان می‌کنند. ابن سینا، سهروردی، گاليله و بسیاری دیگر از دانشمندان علوم تجربی و نیز اکثر اندیشمندان و مصلحین اجتماعی از جمله افرادی هستند که در دوره‌ی خود حتی به مرگ محکوم شدند.

زاهد ظاهرپرست از حال ما آگاه نیست

در حق ما هر چه گوید جای هیچ‌اگره نیست

## تقدیر و تشکر:

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قرب است و به شکر اندرش مزید نعمت. هر نفسی که فرو می‌رود ممد حیات است و چون بر می‌آید مفرح ذات، در هر نفس دو نعمت موجود است و بر هر نعمتی شکری واجب... اکنون که مراحل این تحقیق به اتمام رسیده است بر خود لازم می‌دانم؛

از اساتید راهنمای بزرگوام، آقایان دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر مهدی نجفی به خاطر راهنمایی‌های ارزشمندشان، همکاری صمیمانه و حمایت‌های ایشان که موجب ایجاد انگیزه و دلگرمی در بنده شد،

از دکتر ناصر گودرزی، استاد دانشکده شیمی (گروه شیمی تجزیه) و معاون آموزشی دانشگاه صنعتی شاهرود به خاطر مشاوره‌های ارزشمندشان در مباحث مربوط به شیمی در این تحقیق،

از کارکنان شرکت البرز شرقی به خصوص آقایان مهندس قنبری و دکتر یوسفی به خاطر همکاری صمیمانه،

از دوست خوبم آقای موسی قوام صفت دانشجوی ارشد تربیت بدنی دانشگاه صنعتی شاهرود که در نگارش این متن راهنمایی‌های لازم را انجام دادند،

و بالاخره از پدر و مادر فداکارم که مشوقان و حامیان همیشگی در زندگی من هستند،

کمال تشکر را دارم و برای ایشان از درگاه ایزد منان آرزوی توفیق روزافزون دارم.

## تعهد نامه

اینجانب امین جوکار دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "شبیه سازی عددی میزان گسترش فضای استخراجی در روش گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG) به روش منبع احتراق قابل کنترل پسر و (CRIP) در مقیاس تجاری" تحت راهنمایی دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر مهدی نجفی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه 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 می باشد 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 پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

### تاریخ

#### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزاتی که ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

در دهه‌های اخیر علم با سرعت زیادی در حال پیشرفت و توسعه است. علم معدن‌کاری نیز از این قاعده مستثنی نیست. امروزه روش‌های جدیدی برای استخراج از معادن معرفی و طراحی شده است که جزء روش‌های سطحی و زیرزمینی سنتی نیستند. یکی از این روش‌ها، روش تبدیل به گاز کردن زیرزمینی زغال‌سنگ (UCG: Underground Coal Gasification) است. زغال‌سنگ به دلیل ترکیب شیمیایی خاصی که دارد، قابلیت تبدیل شدن به نفت و گاز را دارد و یکی از منابع مهم انرژی در دنیا محسوب می‌شود. برای شروع عملیات در هر پروژه‌ای نیاز به یک سری طراحی و برنامه‌ریزی قبلی است تا بتوان عملیات را تحت کنترل خود درآورد. در روش UCG به دلیل عدم دسترسی مستقیم پرسنل به زیر زمین، این موضوع اهمیت ویژه‌ای را به خود می‌گیرد. همچنین، به دلیل تاثیر پارامترهای مختلف بر اجرای موفق این فرآیند و پیچیدگی‌های آن، هنوز خلاءهای علمی موجود در این روش به طور کامل برطرف نشده است و اطلاعات کاملی برای اجرای این عملیات در مقیاس تجاری در دسترس نیست. از جمله مهمترین خلاءهای علمی موجود در این روش می‌توان به فقدان دانش لازم برای پیش‌بینی شکل و حجم حفره (کاواک) ایجاد شده در زیر زمین و مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی در مقیاس تجاری اشاره کرد. در این تحقیق این دو موضوع مهم به طور جداگانه مورد بحث و بررسی قرار گرفته شده است. در بخش اول با توجه به شکل فرضی کاواک در روش‌های تک کاناله و اطلاعات موجود در آزمایشات دیگران، یک سری رابطه برای پیش‌بینی شکل کاواک نسبت به زمان معرفی شده است. سپس برای پیش‌بینی حجم کاواک یک مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم افزار COMSOL توسعه داده شده است. این مدل نشان می‌دهد که حجم کاواک قبل از شروع فرآیند گازی کردن به طور دقیق قابل پیش‌بینی است. در بخش بعد با شبیه‌سازی واکنش‌های شیمیایی توسط نرم افزار COMSOL، امکان پیش‌بینی مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی در مقیاس تجاری میسر شده است. نتایج حاصل از این مدل نشان می‌دهد که برای تولید گاز سنتزی با ارزش حرارتی بیشتر، به ترتیب؛ زمان عملیات، فشار کاواک، نرخ

تزریق بخار آب و نرخ تزریق اکسیژن؛ بیشترین تاثیر مثبت را دارند. در پایان یک مطالعه‌ی موردی برای لایه‌ی K10 منطقه تخت انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای تامین خوراک یک نیروگاه برق ۲۷ مگاواتی به مدت ۲۲ سال، باید ۹ کارگاه همزمان با هم فعال باشند. در این مدت از هر کارگاه مقدار ۵۱۰۰ متر مکعب بر ساعت و از مجموع ۹ کارگاه ۴۶۰۰۰ متر مکعب بر ساعت گاز سنتزی با ارزش حرارتی حدود ۶۰۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم تولید می‌شود.

**کلمات کلیدی:** تبدیل به گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG)، شبیه سازی عددی، میزان

گسترش فضای استخراجی، مقدار گاز تولیدی، ارزش حرارتی گاز سنتزی، لایه‌ی K10 منطقه تخت



## مقالات مستخرج از پایان نامه

\*Jowkar, A., Sereshki, F. and Najafi, M. Presenting a new model for increasing the heating value of syngas in Underground Coal Gasification (UCG) process. Journal of Fuel (Under Review)

\*Jowkar, A., Sereshki, F. and Najafi, M. A New Model for Evaluation of Cavity Shape and Volume during Underground Coal Gasification (UCG) process.

## فهرست مطالب

فصل اول: طرح تحقیق .....	۱
۱-۱- مقدمه .....	۲
۱-۲- معرفی فرآیند UCG .....	۳
۱-۳- بیان مسأله .....	۵
۱-۴- ضرورت و اهمیت تحقیق .....	۶
۱-۵- اهداف و روش تحقیق .....	۷
۱-۶- جنبه‌های نوآوری این تحقیق .....	۹
۱-۷- ساختار پایان‌نامه .....	۱۰
فصل دوم: تاریخچه روش UCG .....	۱۳
۲-۱- مقدمه .....	۱۴
۲-۲- تاریخچه تحقیقات در زمینه‌ی UCG .....	۱۵
۲-۳- جمع‌بندی .....	۲۱
فصل سوم: بررسی میزان گسترش فضای استخراجی .....	۲۳
۳-۱- مقدمه .....	۲۴
۳-۲- عوامل موثر بر شکل و حجم کاواک .....	۲۴
۳-۲-۱- روش تبدیل به گاز کردن .....	۲۵
۳-۲-۲- خصوصیات لایه زغال‌سنگ .....	۲۵
۳-۲-۳- تخریب و خصوصیات سنگ‌های در برگیرنده .....	۲۶
۳-۲-۴- نرخ جریان .....	۲۶
۳-۲-۵- فاصله‌ی چاه‌های تزریق و تولید .....	۲۷
۳-۲-۶- سرعت تزریق اکسیدان .....	۲۷
۳-۳- سرعت تزریق و ارتباط آن با شکل کاواک .....	۲۷
۳-۴- پیش‌بینی رشد ابعاد کاواک .....	۳۶
۳-۴-۱- مطالعه‌ی آماری برای پیش‌بینی نرخ رشد ابعاد کاواک .....	۳۹
۳-۴-۲- تعیین نرخ رشد $I_1$ (شعاع کره) .....	۴۵
۳-۵- توسعه‌ی مدل .....	۴۸
۳-۶- بررسی حجم کاواک .....	۴۹
۳-۶-۱- محاسبه‌ی حجم و زمان عملیات .....	۵۱
۳-۶-۲- محاسبه‌ی پارامترهای ورودی نرم‌افزار .....	۵۲
۳-۶-۳- نتیجه‌ی اجرای مدل .....	۵۴
۳-۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری .....	۵۶
فصل چهارم: مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی؛ اعتبارسنجی مدل .....	۵۹
۴-۱- مقدمه .....	۶۰
۴-۲- تعیین حجم پهنه‌های استخراجی .....	۶۰
۴-۳- مشخصات زغال‌سنگ .....	۶۱
۴-۴- بررسی واکنش‌های شیمیایی .....	۶۲

۶۴	.....۵-۴ محاسبه‌ی پارامترهای عملیاتی.....
۶۶	.....۶-۴ شبیه‌سازی در نرم افزار COMSOL.....
۶۷	.....۱-۶-۴ نتایج اجرای مدل.....
۶۹	.....۲-۶-۴ افزایش نرخ تزریق اکسیژن (سناریو ۱).....
۷۰	.....۳-۶-۴ افزایش نرخ تزریق بخار آب (سناریو ۲).....
۷۲	.....۴-۶-۴ افزایش زمان عملیات (سناریو ۳).....
۷۳	.....۵-۶-۴ افزایش فشار (سناریو ۴).....
۷۴	.....۷-۴ مقایسه‌ی ۴ سناریو.....
۷۸	.....۸-۴ بحث.....
۷۹	.....۹-۴ اعتبارسنجی مدل ارائه شده در این تحقیق.....
۸۱	.....۱۰-۴ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....
۸۳	.....فصل پنجم: مطالعه‌ی موردی؛ ایران، لایه‌ی K10 منطقه زغالی تخت.....
۸۴	.....۱-۵ مقدمه.....
۸۵	.....۲-۵ تاریخچه‌ی تحقیقات UCG در ایران.....
۸۶	.....۳-۵ معرفی منطقه زغالی تخت.....
۸۸	.....۱-۳-۵ زغالخیزی منطقه تخت.....
۸۹	.....۲-۳-۵ کیفیت زغال‌های منطقه تخت.....
۸۹	.....۳-۳-۵ مشخصات اکتشافی لایه‌ی زغالی K10.....
۹۱	.....۴-۵ توسعه‌ی الگوی گازی کردن لایه‌ی K10.....
۹۲	.....۵-۵ شبیه‌سازی فرآیند UCG برای لایه‌ی K10 منطقه تخت.....
۹۲	.....۱-۵-۵ مشخصات زغال سنگ.....
۹۳	.....۲-۵-۵ بررسی پارامترهای عملیاتی.....
۹۴	.....۳-۵-۵ نتایج شبیه‌سازی.....
۹۶	.....۶-۵ بحث.....
۹۸	.....۷-۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....
۱۰۱	.....فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....
۱۰۲	.....۱-۶ نتیجه‌گیری.....
۱۰۴	.....۲-۶ پیشنهادات.....
۱۰۶	.....منابع و مآخذ.....
۱۱۱	.....پیوست‌ها.....
۱۱۱	.....پیوست شماره ۱- نمودارها و معادلات مربوط به مطالعه‌ی آماری.....
۱۲۶	.....پیوست شماره ۲- محاسبات مربوط به عناصر موجود در کواک.....
۱۲۷	.....پیوست شماره ۳- محاسبات مربوط به ارزش حرارتی گاز سنتزی از هر کارگاه در لایه‌ی K10 منطقه تخت.....

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- نسبت ذخایر نفت، گاز و زغال سنگ زمین..... ۳
- شکل ۱-۲- شمایی از روش UCG از نوع CRIP دو کاناله در مجموعه بلاوود کریک استرالیا..... ۴
- شکل ۱-۳- الگوریتم مراحل الگوی تجاری..... ۸
- شکل ۳-۱- تاثیر نفوذپذیری بر شکل کاواک..... ۲۶
- شکل ۳-۲- زیرمجموعه‌های روش CRIP..... ۲۸
- شکل ۳-۳- فرض اولیه وضعیت کارگاه‌ها در منطقه (نما از بالا)..... ۲۸
- شکل ۳-۴- نمای کارگاه استخراج از روبرو..... ۲۹
- شکل ۳-۵- نمای کارگاه استخراج از بغل..... ۲۹
- شکل ۳-۶- شکل سه بُعدی کاواک در حالت ثابت بودن نقطه تزریق با سرعت خیلی کم..... ۳۰
- شکل ۳-۷- شکل‌گیری کاواک در روش پسرو UCG..... ۳۰
- شکل ۳-۸- شکل‌گیری کاواک در روش پیشرو UCG..... ۳۱
- شکل ۳-۹- جبهه‌کار تبدیل به گاز شدن (نما از روبرو)..... ۳۲
- شکل ۳-۱۰- جبهه‌کار تبدیل به گاز شدن (نما از بغل)..... ۳۲
- شکل ۳-۱۱- شکل کاواک ایجاد شده در مدل..... ۳۳
- شکل ۳-۱۲- شکل کاواک در تحقیق صراف شیرازی..... ۳۴
- شکل ۳-۱۳- شکل کاواک در تحقیق لیو و همکاران..... ۳۵
- شکل ۳-۱۴- شکل کاواک در تحقیق داگوپاتی و همکاران..... ۳۶
- شکل ۳-۱۵- شکل و ابعاد کاواک در ۵ زمان مختلف..... ۳۷
- شکل ۳-۱۶- شکل کاواک در حالت کلی (نما از بغل) در این تحقیق..... ۳۸
- شکل ۳-۱۷- شکل کاواک در حالت کلی (نما از بالا) در این تحقیق..... ۳۸
- شکل ۳-۱۸- شکل و ابعاد کاواک (x: شعاع، h: ارتفاع، w: فاصله چاه تولید و تزریق)..... ۳۸
- شکل ۳-۱۹- شکل کاواک در آزمایش داگوپاتی و همکاران..... ۳۹
- شکل ۳-۲۰- نمودار نرخ گسترش طولی (h) نسبت به زمان..... ۴۳
- شکل ۳-۲۱- نمودار نرخ گسترش ارتفاع ( $r_h$ ) نسبت به زمان..... ۴۳
- شکل ۳-۲۲- نمودار نرخ گسترش عقب زدگی ( $r_b$ ) نسبت به زمان..... ۴۳
- شکل ۳-۲۳- نمودار نرخ گسترش عرضی در چاه تزریق ( $r_w$ ) نسبت به زمان..... ۴۴
- شکل ۳-۲۴- نمودار نرخ گسترش در لینک اتصال ( $r_2$ ) نسبت به زمان..... ۴۴
- شکل ۳-۲۵- نمودار نرخ گسترش در چاه تولید ( $r_3$ ) نسبت به زمان..... ۴۴
- شکل ۳-۲۶- نمودار منحنی رشد  $r_1$  (شعاع کره)..... ۴۶
- شکل ۳-۲۷- وضعیت کاواک‌های مجاور با تغییر یک در میان محل چاه‌های تزریق و تولید..... ۴۹
- شکل ۳-۲۸- وضعیت کاواک‌های مجاور بدون تغییر محل چاه‌های تزریق و تولید..... ۴۹
- شکل ۳-۲۹- نمودار اجزاء و مقدار گاز تولیدی پس از اجرای مدل..... ۵۵
- شکل ۴-۱- شکل فرضی منطقه در روش CRIP دو کاناله (نما از بالا)..... ۶۰
- شکل ۴-۲- نمودار نسبت بهینه بخار آب به اکسیژن بر ارزش حرارتی گاز تولیدی..... ۶۳
- شکل ۴-۳- شکلی از فضای نرم افزار COMSOL و برخی از اطلاعات داده شده به نرم افزار..... ۶۷
- شکل ۴-۴- وارد کردن واکنش‌های شیمیایی و سنتیک واکنش در نرم افزار COMSOL..... ۶۸

- شکل ۴-۵- نمودار غلظت و اجزاء گاز تولیدی (در دمای ۱۲۷۳ کلوین و فشار ۱ مگاپاسکال)..... ۶۸
- شکل ۴-۶- غلظت گازهای تولیدی با افزایش نرخ تزریق اکسیژن به ۵۷/۶ مول بر ثانیه..... ۷۰
- شکل ۴-۷- غلظت گازهای تولیدی با افزایش نرخ تزریق بخار آب به ۱۱۶/۲ مول بر ثانیه..... ۷۱
- شکل ۴-۸- غلظت گازهای تولیدی با افزایش زمان عملیات به  $10^6 \times 12/6720$  ثانیه..... ۷۲
- شکل ۴-۹- غلظت گازهای تولیدی با افزایش فشار کاواک به 3Mpa..... ۷۳
- شکل ۴-۱۰- مقایسه حجم هر گاز در هر کدام از سناریوها..... ۷۵
- شکل ۴-۱۱- مقایسه حجم کل گاز تولیدی در هر سناریو..... ۷۵
- شکل ۴-۱۲- مقایسه ارزش حرارتی گاز تولیدی در هر سناریو..... ۷۷
- شکل ۵-۱- کروکی راه‌های ارتباطی منطقه اکتشافی تخت..... ۸۷
- شکل ۵-۲- تصویر ماهواره‌ای منطقه اکتشافی تخت..... ۸۸
- شکل ۵-۳- ابعاد پهنه‌ها و محل چاه‌ها برای تبدیل به گاز کردن لایه‌ی K10 منطقه تخت..... ۹۲
- شکل ۵-۴- نمودار غلظت گازهای تولیدی پس از اجرای اولیه مدل (در دمای 1273K و فشار 1MPa)..... ۹۵
- شکل ۵-۵- نمودار غلظت گازهای تولیدی حاصل از یک کارگاه UCG در لایه‌ی K10..... ۹۶

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲- پیشینه UCG در دنیا ..... ۱۵
- جدول ۲-۲- مدل‌های عددی و آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی فرآیند UCG ..... ۱۶
- جدول ۳-۲- مهمترین تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی میزان گسترش فضای استخراجی ..... ۲۰
- جدول ۴-۲- مهمترین تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی ..... ۲۱
- جدول ۱-۳- ابعاد کاواک برای نرخ جریان‌های متفاوت ..... ۲۷
- جدول ۲-۳- اندازه ابعاد کاواک در زمان‌های مختلف ..... ۳۷
- جدول ۳-۳- خلاصه‌ی مطالعه‌ی آماری برای نرخ گسترش طولی ( $h$ ) نسبت به زمان ..... ۴۱
- جدول ۴-۳- خلاصه‌ی مطالعه‌ی آماری برای نرخ گسترش ارتفاع ( $r_h$ ) نسبت به زمان ..... ۴۱
- جدول ۵-۳- خلاصه‌ی مطالعه‌ی آماری برای نرخ گسترش عقب زدگی ( $r_b$ ) نسبت به زمان ..... ۴۱
- جدول ۶-۳- خلاصه‌ی مطالعه‌ی آماری برای نرخ گسترش عرضی در چاه تزریق ( $r_w$ ) نسبت به زمان ..... ۴۲
- جدول ۷-۳- خلاصه‌ی مطالعه‌ی آماری برای نرخ گسترش در لینک اتصال ( $r_2$ ) نسبت به زمان ..... ۴۲
- جدول ۸-۳- خلاصه‌ی مطالعه‌ی آماری برای نرخ گسترش در چاه تولید ( $r_3$ ) نسبت به زمان ..... ۴۲
- جدول ۹-۳- حجم کاواک در زمان‌های مختلف ..... ۴۵
- جدول ۱۰-۳- نتایج محاسبات مربوط به مقدار  $r_1$  (شعاع کره) ..... ۴۶
- جدول ۱۱-۳- توابع تخمین رشد  $r_1$  و مقدار خطای هر تابع ..... ۴۷
- جدول ۱۲-۳- پارامترهای عملیاتی در آزمایش داگوپاتی و همکاران ..... ۴۸
- جدول ۱۳-۳- واکنش‌هایی که در فرآیند UCG اتفاق می‌افتد ..... ۵۲
- جدول ۱۴-۳- مشخصات فرضی زغال سنگ ..... ۵۳
- جدول ۱۵-۳- مشخصات فرضی مواد فرار زغال سنگ ..... ۵۳
- جدول ۱۶-۳- مقدار عناصر موجود در کاواک در این مثال ..... ۵۳
- جدول ۱۷-۳- پارامترهای سنتیکی واکنش‌های شیمیایی همگن ..... ۵۳
- جدول ۱۸-۳- پارامترهای سنتیکی واکنش‌های شیمیایی ناهمگن ..... ۵۴
- جدول ۱۹-۳- پارامترهای ورودی نرم افزار COMSOL ..... ۵۴
- جدول ۲۰-۳- مقدار و اجزای گاز تولیدی (در دمای ۱۲۷۳ کلوین و فشار ۵۰۶ کیلوپاسکال) ..... ۵۵
- جدول ۱-۴- مشخصات فرضی زغال سنگ ..... ۶۱
- جدول ۲-۴- مشخصات فرضی مواد فرار زغال سنگ ..... ۶۱
- جدول ۳-۴- مقدار مول مواد موجود در کاواک در این مثال ..... ۶۱
- جدول ۴-۴- واکنش‌های فاز همگن در حالت کلی ..... ۶۲
- جدول ۵-۴- واکنش‌های فاز همگن در این تحقیق ..... ۶۲
- جدول ۶-۴- واکنش‌های فاز ناهمگن در فرآیند UCG ..... ۶۳
- جدول ۷-۴- بازنویسی واکنش‌های شیمیایی در فاز ناهمگن با اعمال ضرایب ..... ۶۴
- جدول ۸-۴- مقدار  $H_2O$  و  $O_2$  لازم برای فاز ناهمگن ..... ۶۴
- جدول ۹-۴- پارامترهای ورودی نرم افزار ..... ۶۶
- جدول ۱۰-۴- مقدار و اجزای گاز تولیدی پس از اجرای اولیه مدل ..... ۶۹
- جدول ۱۱-۴- مقدار و اجزای گاز تولیدی در حالت ۱ (در دمای 1273 K و فشار 1MPa) ..... ۷۰
- جدول ۱۲-۴- مقدار و اجزای گاز تولیدی در حالت ۲ (در دمای 1273 K و فشار 1MPa) ..... ۷۱

- جدول ۴-۱۳- مقدار و اجزای گاز تولیدی در حالت ۳ (در دمای 1273 K و فشار 1MPa) ..... ۷۲
- جدول ۴-۱۴- مقدار و اجزای گاز تولیدی در حالت ۴ (در فشار 3MPa و دمای 1273K) ..... ۷۴
- جدول ۴-۱۵- مقایسه ترکیب و حجم گاز تولیدی در هر حالت (در دمای 1273 K و فشار 1MPa) ..... ۷۵
- جدول ۴-۱۶- ارزش حرارتی گاز تولیدی در سناریو ۱ ..... ۷۶
- جدول ۴-۱۷- ارزش حرارتی گاز تولیدی در سناریو ۲ ..... ۷۶
- جدول ۴-۱۸- ارزش حرارتی گاز تولیدی در سناریو ۳ ..... ۷۷
- جدول ۴-۱۹- ارزش حرارتی گاز تولیدی در سناریو ۴ ..... ۷۷
- جدول ۴-۲۰- مقدار ارزش حرارتی گاز تولیدی با تغییر همزمان پارامترهای عملیاتی ..... ۷۹
- جدول ۴-۲۱- مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از مدل ارائه شده در این تحقیق با تحقیقات سایر محققان ..... ۸۱
- جدول ۵-۱- تاریخچه UCG در ایران ..... ۸۵
- جدول ۵-۲- آنالیز فنی زغال سنگ لایه‌ی K10 منطقه تخت ..... ۹۰
- جدول ۵-۳- خصوصیات کیفی لایه‌های زغال در منطقه زغالدار تخت ..... ۹۱
- جدول ۵-۴- مشخصات زغال سنگ ..... ۹۲
- جدول ۵-۵- مشخصات مواد فرار ..... ۹۲
- جدول ۵-۶- مقدار عناصر موجود در یک پهنه‌ی لایه‌ی K10 ..... ۹۳
- جدول ۵-۷- مقدار  $H_2O$  و  $O_2$  لازم برای فاز ناهمگن در هر کارگاه در لایه‌ی K10 ..... ۹۳
- جدول ۵-۸- پارامترهای ورودی نرم افزار برای یک کارگاه UCG در لایه‌ی K10 ..... ۹۴
- جدول ۵-۹- مقدار و اجزای گاز تولیدی پس از اجرای اولیه مدل برای هر کارگاه لایه‌ی K10 ..... ۹۵
- جدول ۵-۱۰- مقدار و اجزای گاز تولیدی حاصل از یک کارگاه UCG در لایه‌ی K10 ..... ۹۶
- جدول ۵-۱۱- مقدار مول گاز تولیدی از یک کارگاه UCG در لایه‌ی K10 منطقه تخت ..... ۹۷
- جدول ۵-۱۲- ارزش حرارتی هر یک از گازهای تولیدی از یک کارگاه UCG در لایه‌ی K10 ..... ۹۷
- جدول ۵-۱۳- نتایج اجرای مدل برای یک کارگاه UCG در لایه‌ی K10 منطقه تخت ..... ۹۸

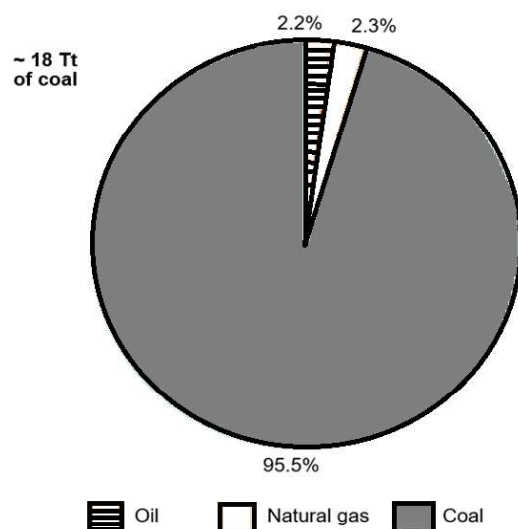
# فصل اول: طرح تحقیق



## ۱-۱- مقدمه

همه‌ی علوم روز به روز در حال پیشرفت و توسعه هستند، علم معدن‌کاری هم از این قاعده مستثنی نیست. امروزه روش‌های جدیدی برای استخراج از معادن معرفی و طراحی شده است که جزء روش‌های سطحی و زیرزمینی سنتی نیستند. مانند روش تبدیل به گاز کردن زیرزمینی زغال‌سنگ<sup>۱</sup> (UCG)، استفاده از رباتیک در معدن، روش معدن‌کاری هیدرولیکی و... این روش‌ها به طور کلی برای بهره‌برداری از منابع غیر معمول معرفی و بعضاً اجرا می‌شوند. این منابع شامل منابعی هستند که از نظر میزان ذخیره اقتصادی نیستند و یا شرایط مناسب برای استخراج با سایر روش‌های معمول را ندارند (جوکار، ۱۳۹۵).

به دلیل محدود بودن منابع نفت و گاز طبیعی و کمبود آن‌ها در آینده نه چندان دور، دانشمندان به دنبال یافتن منابع انرژی جایگزین هستند. زغال‌سنگ به دلیل ترکیب شیمیایی خاصی که دارد، قابلیت تبدیل شدن به نفت و گاز را دارد و یکی از منابع مهم انرژی در دنیا محسوب می‌شود (Smit and Werner, 1976). از طرف دیگر روش‌های مرسوم استخراج زغال‌سنگ در دنیا، برای استخراج لایه‌های زغال‌سنگ با عمق زیاد و ضخامت متغیر، محدودیت دارد و تنها ۵٪ درصد از این ذخایر با روش‌های معمول قابل استفاده و بهره‌برداری است. مطابق شکل ۱-۱، اگر همه‌ی ذخایر نفت، گاز و زغال‌سنگ زمین ۱۰۰٪ در نظر گرفته شود؛ ۹۵/۵٪ آن زغال‌سنگ است (Couch, 2009). این موضوع نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری و اجرای طرح‌های بلند مدت برای بهره‌برداری از ذخایر زغال‌سنگ در آینده، بسیار حائز اهمیت است. به همین منظور در این تحقیق برای استفاده بهتر از ذخایر زغال‌سنگ روش UCG انتخاب شده است.



شکل ۱-۱- نسبت ذخایر نفت، گاز و زغال سنگ زمین (Couch, 2009)

برای شروع عملیات در هر پروژه‌ای نیاز به یک سری طراحی و برنامه‌ریزی قبلی است تا بتوان عملیات را تحت کنترل خود درآورد. در علوم مهندسی به خصوص مهندسی معدن که عملیات در یک مقیاس بزرگ انجام می‌شود، نداشتن طرح و برنامه قبلی، به احتمال قریب به یقین باعث شکست پروژه می‌شود و هزینه‌های گزافی را به همراه خواهد داشت. بنابراین هرچقدر طرح و برنامه‌ریزی قبل از عملیات کامل‌تر و دقیق‌تر باشد به همان میزان احتمال موفقیت در پروژه و بهره‌وری از عملیات بیشتر می‌شود. در استخراج به روش UCG، به دلیل عدم دسترسی مستقیم پرسنل به زیر زمین، این موضوع اهمیت ویژه‌ای را به خود می‌گیرد. به طوری که بدون داشتن یک الگوی مناسب برای تبدیل به گاز کردن، شروع فرآیند گازی کردن، کاری عبث و بیهوده است. به همین منظور در این تحقیق به بررسی شکل و حجم حفره ایجاد شده در زیر زمین (کاواک<sup>۱</sup>)، مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی و پارامترهای فنی وابسته به این دو موضوع مهم برای درک بهتر فرآیند UCG، پرداخته شده است.

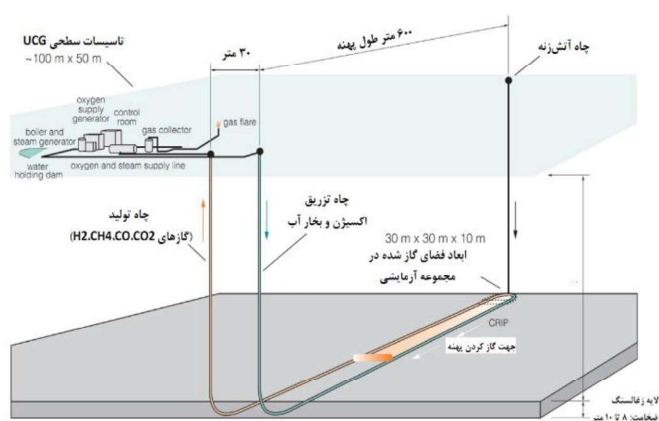
## ۲-۱- معرفی فرآیند UCG

در روش UCG، لایه‌های زغال سنگ با یک فرآیند پیشرفته ترموشیمیایی به صورت برجا در زیر

1- Cavity

زمین به گاز سنتزی تبدیل می‌شود (Robert & Joseph, 1996). مهمترین و اصلی‌ترین گازهایی که در فرآیند UCG تولید می‌شوند گازهای CO، CO<sub>2</sub>، H<sub>2</sub> و CH<sub>4</sub> هستند که ترکیب آن‌ها را گاز سنتزی می‌نامند. در اجرای عملیات UCG با توجه به نیاز صنایع مختلف، هدف می‌تواند تولید هر یک از این گازها (مثلا تولید هیدروژن) و یا تولید گاز سنتزی دارای ارزش حرارتی باشد. گاز حاصل از فرآیند UCG برای تولید برق، گاز شهری، صنایع شیمیایی مانند تولید متانول، تولید سوخت مایع و هیدروژن طبیعی قابل استفاده می‌باشد (نجفی، ۱۳۹۳؛ www.lincenergy.com).

روش‌های مختلفی برای اجرای فرآیند UCG ابداع و بعضا اجرا شده است. در حال حاضر روش منبع احتراق قابل کنترل<sup>۱</sup> (CRIP) برای اجرای UCG در مقیاس تجاری بیش از سایر روش‌ها مورد توجه است. شکل ۱-۲ یکی از پیشرفته‌ترین مجموعه‌های UCG به روش CRIP موازی را در بلاوود کریک<sup>۲</sup> استرالیا نشان می‌دهد. در این کارگاه نخست دو چاه قائم (چاه‌های تزریق و تولید) با فاصله ۳۰ متر از یکدیگر حفر شده است. سپس این دو چاه در کف لایه زغال سنگ با استفاده از حفاری جهت‌دار به طول ۶۰۰ متر پیشروی کرده و انتهای آن‌ها با استفاده از یک چاه قائم (چاه آتش‌زنه) به هم وصل شده است (Couch, 2009).



شکل ۱-۲- شمایی از روش UCG از نوع CRIP دو کاناله در مجموعه بلاوود کریک استرالیا (Couch, 2009)

1- Controlled Retraction Injection Point

2- Bloodwood Creek

همان‌طور که گفته شد، در این روش دسترسی مستقیم به زیر زمین و لایه‌ی زغال وجود ندارد به همین دلیل به دانش بالایی (از جمله معدن، زمین‌شناسی، شیمی، سیالات و ...) جهت کنترل بهینه‌ی فرآیند UCG نیاز است. با توجه به پیچیدگی و زمان‌بر بودن بررسی همه‌ی روش‌های اجرای فرآیند UCG، در این تحقیق شکل و حجم کاواک فقط در روش‌های تک کاناله UCG بررسی شده است.

### ۱-۳- بیان مسأله

با پیشرفت تکنولوژی مهندسی معدن همواره به دنبال افزایش سود، افزایش ایمنی، حفاظت از محیط زیست و کاهش هزینه‌ها بوده‌اند بنابراین باید به دنبال توسعه‌ی روش‌هایی بود که به روند این پیشرفت کمک می‌کند. روش UCG تقریباً همه‌ی منافع ذکر شده را پوشش می‌دهد ولی چون این روش، روشی جدید است و تاکنون اطلاعات کافی برای اجرای آن در دسترس نیست و یا این اطلاعات انحصاری برخی شرکت‌های خاص مانند شرکت لینک انرژی<sup>۱</sup> و CS انرژی<sup>۲</sup> هستند؛ بسیاری از مسائل مربوطه برای اجرای موفق آن در مقیاس تجاری بدون جواب مانده است.

در اثر اجرای فرآیند UCG یک حفره در زیر زمین ایجاد می‌شود که اصطلاحاً به آن کاواک می‌گویند. یکی از مهمترین خला‌های علمی موجود در روش UCG، عدم دانش لازم برای پیش‌بینی شکل و حجم کاواک در مقیاس تجاری است. حال آنکه طراحی ابعاد پهنه و لنگه‌های برجای مانده بین هر کارگاه، فاصله‌ی چاه‌ها، مقدار اکسیدان مورد نیاز برای گازی کردن هر کارگاه، زمان عملیات و به طور کلی همه‌ی پارامترهای فنی در فرآیند UCG، تحت تاثیر شکل و حجم کاواک هستند. یکی دیگر از مباحث مهم برای اجرای موفق UCG، پیش‌بینی مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی است، که دانستن آن برای انجام تحلیل‌های اقتصادی ضروری است. اطلاعات کافی در این زمینه هم در دسترس نیست.

---

1 -Link Energy

2-CS Energy

در این تحقیق مسائل ذکر شده در مقیاس تجاری بررسی شده است.

## ۱-۴- ضرورت و اهمیت تحقیق

ضرورت انجام این تحقیق را می‌توان از دو جنبه اجرای UCG در کشور و نیز بررسی میزان گسترش فضای استخراجی، مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی مورد ارزیابی قرار دارد. در ادامه به مهمترین آن‌ها به طور خلاصه اشاره شده است.

- در ایران بخش زیادی از ذخایر زغالی در عمق واقع شده است و یا ضخامت کمی دارد؛ برای استحصال و استفاده از این منابع، کاربرد UCG می‌تواند به عنوان بهترین گزینه‌ی مطرح باشد (در حال حاضر فقط درصد کمی از ذخایر زغالی کشور با روش‌های سنتی و معمول استخراج می‌شود).

- در مناطقی که بیشتر زغال سنگ‌های کشور واقع شده است (طیس و کرمان)، نفت و گاز طبیعی وجود ندارد و گاز لازم برای نیروگاه‌های برق از سایر مناطق کشور تامین می‌شود که هزینه‌های زیادی برای حمل و نقل و ذخیره‌سازی گاز در این مناطق صرف می‌شود. اما با اجرای روش UCG در مناطق مذکور، این‌گونه هزینه‌های اضافه انجام نمی‌شود. بنابراین هزینه‌های استخراج، فرآوری و انتقال زغال سنگ به نیروگاه با این روش کاهش می‌یابد.

- برق ایران عمدتاً از طریق نیروگاه‌های حرارتی تامین شده و از گاز طبیعی به دلیل قیمت کم آن (در مقایسه با اروپا) به عنوان سوخت اصلی استفاده می‌شود و از منابعی مانند زغال سنگ که سهم بسیاری در تولید برق در سطح دنیا دارد غفلت شده است.

- اگر قرار باشد از زغال سنگ‌های حرارتی در نیروگاه تولید برق بر پایه‌ی بخار استفاده شود، بسیار پرهزینه خواهد بود؛ زیرا ابتدا باید زغال سنگ با استفاده از روش‌های سنتی و پرهزینه‌ی معدن کاری استخراج شود بعد مورد استفاده قرار بگیرد. از طرفی، پس از استفاده از زغال سنگ‌های حرارتی که خاکستر زیادی تولید می‌کند، باید تدابیر خاصی برای امحای خاکستر حاصل از سوختن زغال سنگ اندیشید و طبیعتاً نمی‌توان از هزینه و مشکلات زیست‌محیطی آن چشم‌پوشی کرد.

- با توجه به موارد بیان شده، واضح است که به کارگیری روش گازی کردن زیرزمینی زغال سنگ در باره‌ی ذخایر با ارزشی که در حال حاضر در کشور بدون استفاده مانده است، سبب می‌شود که زمینه برای وارد شدن سبد جدیدی از انرژی در کشور فراهم شود. این امر می‌تواند سهم مهمی در رفع موانع و تهدیدها، توزیع کم هزینه و مناسب انرژی، افزایش فرهنگ تولید و مصرف انرژی و در نهایت، اشتغال‌زایی و کارآفرینی داشته باشد (جلالی و همکاران، ۱۳۹۲).

بنابراین برای این که صنعت معدن‌کاری کشور از قافله‌ی معدن‌کاری در سطح جهان عقب نماند بررسی این روش در کشور ضروری می‌باشد تا در صورت داشتن شرایط مناسب برای اجرای آن، تصمیمات لازم توسط مسئولین ذی‌ربط گرفته شود.

تاکنون مدل‌های عددی و آزمایشگاهی گوناگونی برای بررسی میزان گسترش فضای استخراجی UCG ارائه شده است. بیشتر این مدل‌ها بر روی پهنه‌های UCG در مقیاس سنتی بوده است و تاکنون اطلاعاتی در مورد میزان گسترش فضای استخراجی UCG در مقیاس تجاری و با ابعاد پهنه‌ی بزرگ در دسترس نیست. همچنین اطلاعات کافی برای پیش‌بینی مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی که برای انجام تحلیل‌های اقتصادی ضروری می‌باشند در دسترس نیست.

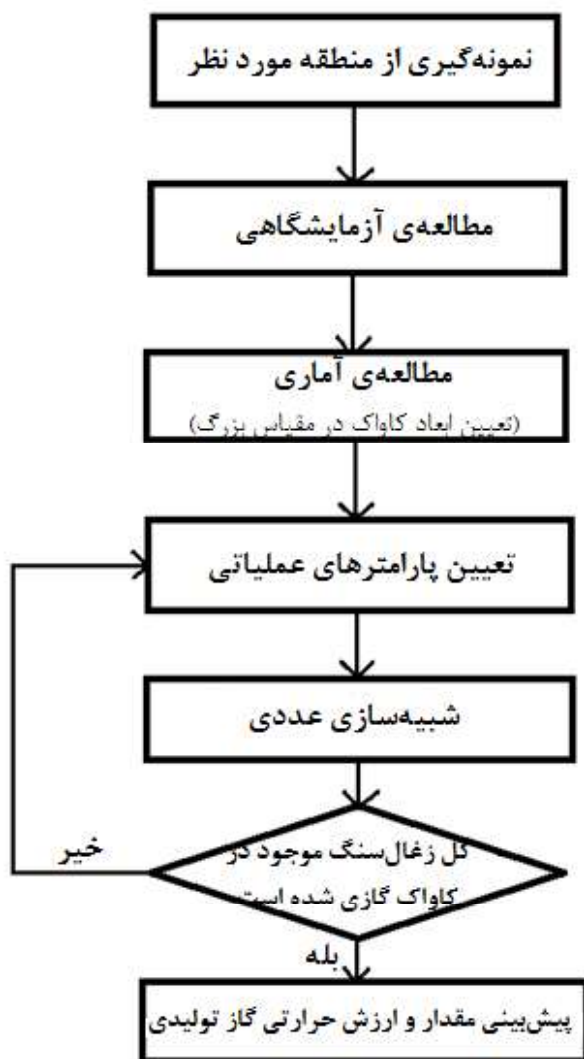
بنابر آنچه که گفته شد به طور کلی بررسی مسائل پایه (مانند شکل کاواک، حجم کاواک، مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی) در دانش UCG برای تجاری‌سازی آن و همچنین نیاز به اجرای این عملیات برای رفع گوشه‌ای از مسائل و مشکلات موجود در کشور؛ ضرورت انجام این تحقیق را روشن می‌کند.

## ۱-۵- اهداف و روش تحقیق

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد از جمله مهمترین خلاهای علمی موجود در روش UCG، فقدان دانش لازم برای پیش‌بینی میزان گسترش فضای استخراجی و همچنین مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی می‌باشد. هدف در این تحقیق این بوده است که علاوه بر این که دانش لازم در مطالب ذکر شده

افزایش یابد، کارایی روش UCG برای لایه‌های زغالی کشور بهتر مشخص شود. در همین راستا یک مطالعه‌ی موردی برای لایه‌ی K10 منطقه تخت انجام شده است.

از آنجا که اجرای مجموعه‌های UCG و به دست آوردن اطلاعات مورد نیاز از آنها؛ وقت‌گیر، پرهزینه و مشکل است، انجام کارهای آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی، کاربرد گسترده‌ای در مدل‌سازی فرآیند UCG پیدا کرده است. در این تحقیق با استفاده از نتایج آزمایشات دیگران و به کمک شبیه‌سازی فرآیند در نرم افزار COMSOL، یک الگوی تجاری معرفی شده است. مراحل این الگو به صورت شکل ۳-۱ توسط یک الگوریتم نشان داده شده است.



شکل ۳-۱- الگوریتم مراحل الگوی تجاری

همان‌طور که در شکل ۱-۳ مشاهده می‌شود، طبق این الگو در ابتدا نمونه زغال‌سنگ از منطقه مورد نظر که قرار است فرآیند UCG در آنجا اجرا شود، تهیه می‌شود. سپس فرآیند در آزمایشگاه شبیه‌سازی می‌شود، زغال‌سنگ در آزمایشگاه گازی می‌شود و نرخ رشد ابعاد کاواک در زمان‌های مختلف ثبت می‌شود. بعد از این مرحله، یک مطالعه آماری بر روی داده‌های آزمایشگاهی انجام می‌شود و نرخ رشد ابعاد کاواک در مقیاس بزرگ (تجاری) مشخص می‌شود. سپس پارامترهای عملیاتی (نرخ تزریق اکسیدان و زمان عملیات) تعیین می‌شود. در ادامه فرآیند UCG توسط نرم‌افزار COMSOL شبیه‌سازی می‌شود. پس از اجرای مدل اگر کل زغال‌سنگ موجود در پهنه گازی شده باشد بنابراین طراحی کامل است و مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی پیش‌بینی می‌شود، در غیر این صورت به مرحله تعیین پارامترهای عملیاتی بازگشته و پارامترهای عملیاتی تغییر داده می‌شود و باز مراحل تکرار می‌شود. نرم‌افزار COMSOL مجموعه‌ی کامل شبیه‌سازی چند فیزیکی است که قادر به حل معادلات دیفرانسیل جزئی (PDE) و کامل (ODE) برای تحلیل و بررسی رفتار سیستم‌های خطی و غیر خطی به روش المان محدود (FEM) در فضاها، دو و سه بعدی است. این نرم‌افزار در سال ۱۹۸۶ توسط دانشجویان مؤسسه سلطنتی فناوری سوئد با نام FEMLAB ایجاد شد و در سال ۲۰۰۵ به COMSOL Multiphysics تغییر نام داد. زمینه کاربردی این نرم‌افزار در حل انواع معادلات دیفرانسیل جفت شده، طراحی و شبیه‌سازی سامانه‌های فیزیکی، نانو فیزیکی، مهندسی برق، مهندسی مکانیک، علوم زمین، مهندسی شیمی، نجوم و بررسی سامانه‌های کوانتومی است (شاپان‌مهر و همکاران، ۱۳۹۳). ماژول شیمی این نرم‌افزار بسیار قدرتمند است و انواع راکتورها در محیط آن تعریف شده است که به راحتی قابل استفاده است. به همین دلیل در این تحقیق برای طراحی راکتور و بررسی فرآیند UCG از این نرم‌افزار استفاده شده است.

## ۱-۶- جنبه‌های نوآوری این تحقیق

از جمله مهمترین جنبه‌های نوآورانه این تحقیق که آن را از سایر تحقیقات متمایز می‌کند به



شرح زیر هستند:

- توسعه‌ی یک شکل ساده برای پیش‌بینی شکل کاواک در روش گازی کردن تک کاناله، برای هر دو حالت پیشرو و پسرو، البته با محدودیت و طبق یک‌سری شرایط خاص در مقیاس تجاری
- ارائه‌ی یک مدل برای پیش‌بینی حجم کاواک در مقیاس تجاری
- پیش‌بینی مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی در مقیاس تجاری
- امکان تحلیل حساسیت برای هر یک از پارامترهای عملیاتی در مقیاس تجاری

## ۱-۷- ساختار پایان‌نامه

با توجه به اهداف مورد نظر، مراحل این تحقیق در ۶ فصل به شرح زیر تدوین شده است.

در **فصل اول** به ذکر مقدمه و معرفی کلی روش UCG و همچنین طرح تحقیق شامل بیان مسئله، ضرورت و اهمیت انجام تحقیق، اهداف و روش تحقیق و جنبه‌های نوآورانه این تحقیق پرداخته شده است.

در **فصل دوم** به پیشینه و تاریخچه روش UCG پرداخته شده است، به این ترتیب که ابتدا ایده‌های اولیه و سپس برخی از مهمترین کارهایی که در این زمینه تا امروز در سراسر دنیا انجام شده است، به طور مختصر معرفی شده است.

در **فصل سوم** میزان گسترش فضای استخراجی در قالب دو بخش متفاوت یعنی شکل کاواک و حجم کاواک بررسی شده است. بدین صورت که ابتدا یک الگوی ساده برای شکل کاواک در روش تک کاناله (پیشرو و پسرو) با توجه به نتایج آزمایشات دیگران معرفی شده است. سپس با مدل‌سازی فرآیند UCG توسط نرم‌افزار COMSOL، با توجه به گازی شدن حجم مشخصی از زغال سنگ، یک الگوی دقیق برای پیش‌بینی حجم کاواک معرفی شده است.

در **فصل چهارم** با شبیه‌سازی واکنش‌های شیمیایی توسط نرم‌افزار COMSOL؛ مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی در مقیاس تجاری بررسی شده است. همچنین تاثیر پارامترهایی از قبیل زمان

عملیات، فشار کاواک، نرخ تزریق اکسیژن و نرخ تزریق بخار آب بر ارزش حرارتی گاز تولیدی در حالت‌های مختلف بررسی شده است. در نهایت نشان داده شد که این مدل قابلیت پیش‌بینی تاثیر پارامترهای فنی بر مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی و در نتیجه انجام تحلیل‌های اقتصادی پیش از عملیات UCG، را دارد.

در **فصل پنجم** با توجه به مدل ارائه شده در این تحقیق، یک مطالعه‌ی موردی برای لایه‌ی زغالی K10 منطقه تخت ک شور انجام شده است. با توجه به مشخصات زمین شناسی لایه‌ی K10، شبیه‌سازی فرآیند UCG توسط نرم افزار COMSOL انجام شده و در نهایت مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی از هر کارگاه در این منطقه بررسی شده است.

در **فصل ششم** ضمن ذکر کردن مهمترین نتایج این تحقیق، پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده ارائه شده است.



# فصل دوم: تاریخچه روش UCG

## ۲-۱-مقدمه

ایده‌ی گاز کردن زیرزمینی زغال‌سنگ را ویلیام زیمنس<sup>۱</sup>، دانشمند آلمانی، برای اولین بار در سال ۱۸۶۸ پیشنهاد کرده است. در همان زمان شیمی‌دان روسی، دیمیتری مندلیف<sup>۲</sup> نیز ایده‌ی کنترل، تزریق و احتراق زیرزمینی زغال‌سنگ به صورت خودبه‌خودی و حفاری چاه‌های تزریق و تولید را پیشنهاد کرد (لطفی‌آزاد و همکاران، ۱۳۹۱).

اولین ثبت اختراع در زمینه‌ی UCG در سال ۱۹۰۹ میلادی توسط بتس<sup>۳</sup> در بریتانیا به ثبت رسید. بعد از گذشت چند سال، ویلیام رمسی<sup>۴</sup> در سال ۱۹۱۲ میلادی ایده بتس را در اولین کارگاه آزمایشی UCG به کار گرفت اما به دلیل وقوع جنگ جهانی اول و مرگ وی، این آزمایش ناتمام ماند. مطالعات و سخنرانی‌های رمسی در مورد UCG موجب شد که لنین<sup>۵</sup> (رهبر وقت اتحاد جماهیر شوروی)، علاقه‌ی فراوانی به این روش نشان دهد. رمسی در سال ۱۹۱۳ مقاله‌ای در مورد مزایای روش UCG در مقایسه با شرایط کار سخت در معادن سنتی زغال‌سنگ به چاپ رساند. تلاش‌های قابل توجهی در ایالات متحده آمریکا در زمینه‌ی توسعه‌ی آزمایش‌های UCG در دهه‌ی ۱۹۸۰ انجام شد. در طول این مدت حدود ۵۰ هزار تن زغال‌سنگ در بیش از ۱۵ میدان آزمایشی به گاز سنتزی تبدیل شد (نجفی، ۱۳۹۳).

در سال‌های اخیر علاقه‌مندی به این روش افزایش یافته است و بسیاری از کشورها توسعه‌ی این تکنولوژی را در دستور کار خود قرار داده‌اند که از جمله این کشورها می‌توان به 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 اشاره نمود. سه کشور استرالیا، ایالات متحده و روسیه توانسته‌اند روش UCG را در مقیاس صنعتی و بسیار بزرگ اجرا کنند و

1-William Siemens  
4-William Ramsey

2-Dmitry Mendeleev  
5-Lenin

3-A.G. Betts

نیروگاه‌های بزرگ تولید برق را با استفاده از این فناوری تاسیس کنند (جلالی و همکاران، ۱۳۹۲).

در اجرای فرآیند UCG، هدف می‌تواند تولید گاز سسنتزی دارای ارزش حرارتی، تولید گاز هیدروژن و یا سایر گازهای موجود در زغال سنگ به طور جداگانه باشد. بسته به نیاز صنایع مختلف و کارایی گاز تولیدی این هدف تعریف می‌شود. بنابراین تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی UCG با اهداف مختلفی صورت گرفته است. در ادامه به برخی از مهمترین آن‌ها اشاره شده است.

## ۲-۲- تاریخچه تحقیقات در زمینه‌ی UCG

در جدول ۱-۲ برخی از فعالیتهای گسترده در زمینه‌ی UCG، با اهداف خاص و تحت شرایط مختلف در سراسر دنیا گردآوری شده است.

جدول ۱-۲- پیشینه UCG در دنیا (نجفی، ۱۳۹۳)

کشور	نوع فعالیت	تاریخ شروع فعالیت
اتحاد جماهیر شوروی سابق	شروع فعالیت در زمینه‌ی UCG، اجرای بیش از ۱۰ پروژه در مقیاس تجاری (۲ عدد در حال کار)، اجرای عملیات جدید در عمق ۳۰۰ تا ۴۰۰ متری بر روی منابع عظیم زغال‌سنگ	از ۱۹۳۰ تاکنون
ایالات متحده آمریکا	شروع فعالیت و انجام آزمایش‌های میدانی، انجام بیش از ۳۰ پایلوت UCG، راه‌اندازی نیروگاه سیکل ترکیبی گازی بر پایه‌ی UCG با ظرفیت ۲۰۰ تا ۵۰۰ مگاوات توسط شرکت‌های BP و Gas Technology	از ۱۹۷۵ تاکنون
هند	تحقیقات فراوان در زمینه‌ی تجاری سازی UCG برای احداث نیروگاه برق ۲۵۰ مگاواتی برای مدت ۳۰ سال، امضای تفاهم نامه با شرکت‌های استرالیایی در سال ۲۰۰۸ برای بسط و توسعه‌ی UCG در این کشور	از ۱۹۸۰ تاکنون
چین	در طول ۲۰ سال گذشته بیش از ۱۶ پایلوت UCG اجرا شده است. اجرای یک پروژه UCG با ظرفیت ۱۵۰ هزار متر مکعب گاز خروجی در روز، برنامه‌ریزی برای تجاری سازی کامل UCG در سایت‌های پیش‌بینی شده تا سال ۲۰۲۰	از ۱۹۹۰ تاکنون
کانادا	انجام تعداد زیادی پایلوت و نمونه تجاری، اجرای عمیق‌ترین پایلوت UCG در مقیاس تجاری در دنیا در عمق ۱۴۰۰ متری با هزینه‌ی ۳۰ میلیون دلار	از ۱۹۹۰ تاکنون
استرالیا	شروع فعالیت از سال ۱۹۹۰، اجرای پروژه بسیار بزرگ چینچیل در سال ۲۰۰۸-۲۰۱۰، برنامه‌ریزی برای تجاری سازی UCG در دنیا	از ۱۹۹۰ تاکنون
آفریقای جنوبی	انجام آزمایشات UCG توسط شرکت Eskom، برنامه‌ریزی احداث نیروگاه‌های برق با ظرفیت ۳۵۰ مگاوات	از ۲۰۰۷ تاکنون
اتحادیه اروپا	تولید هیدروژن از UCG با همکاری کشورهای لهستان، آلمان، جمهوری چک، اکرین، بلژیک و هلند	از ۲۰۰۷ تاکنون

مدل‌های عددی و آزمایشگاهی زیادی برای شبیه‌سازی فرآیند UCG ارائه شده است. مهمترین

آن‌ها به شرح جدول ۲-۲ هستند.

جدول ۲-۲- مدل‌های عددی و آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی فرآیند UCG (نجفی، ۱۳۹۳)

ردیف	بخش مدل‌سازی شده	پژوهشگر	توضیحات
۱	ژئومکانیکی و راکتور	Thompson et al., 1977	نتایج حاصل از این مدل نشان می‌دهد که: - تغییر شکل سقف فضای استخراجی UCG به خصوصیات تغییر شکل‌پذیری روباره، عمق و ابعاد فضای استخراجی بستگی دارد. - خشک شدن سقف در اثر دما منجر به ایجاد یک زون با مقاومت بالا در اطراف فضای استخراجی می‌گردد.
۲	ارتباطی	Dinsmoor et al., 1978	یک مدل تک بعدی است که در آن فرض شده است که شکل فضای استخراجی درون لایه زغال‌سنگ به صورت استوانه‌ای است و واکنش‌های شیمیایی در دیواره آن به وقوع می‌پیوندد. - پدیده‌ی انتقال حرارت و واکنش‌های شیمیایی در مدل در نظر گرفته شده است.
۳	راکتور	Wilks, 1983	در این مدل شکل فضای استخراجی در اطراف چاه تزریق به صورت گلابی در نظر گرفته شده که قسمت بزرگ آن در مجاورت چاه تزریق و قسمت باریک آن در نزدیکی چاه تولید قرار دارد. همچنین فرض شده است کلیه واکنش‌های سوختن و گازی کردن به صورت یکنواخت در تمام نقاط فضای استخراجی توزیع می‌شوند. در این مدل از قانون داری برای محاسبه میدان‌های گاز در داخل فضا و نحوه انتشار آن استفاده شده و بر اساس آن نرخ گسترش فضای استخراجی پیش‌بینی شده است.
۴	راکتور	Chang et al., 1985	- یک مدل تک بعدی است که در آن شکست ترمومکانیکی زغال‌سنگ در اثر حرارت و پدیده انتقال حرارت در نظر گرفته شده است.
۵	راکتور	Britten & Thorsness, 1989	نتایج حاصل از این مدل نشان می‌دهد که: - گسترش فضای استخراجی در اثر شکست ترمومکانیکی زغال‌سنگ اتفاق می‌افتد. - مقداری زغال‌سنگ نیم‌سوز در کف فضای استخراجی و نزدیک چاه تزریق، بر جای می‌ماند. - از یک مدل دو بعدی متقارن برای شبیه‌سازی روش CRIP استفاده شده است. - برای زغال‌سنگ‌های بدون خاصیت آماس پذیری قابل کاربرد است. - فرض شده است که فضای استخراجی به صورت متقارن است. - از محدودیت‌های این مدل این است که برای لایه‌های ضخیم و فشار عملیاتی کمتر از ۱۰ مگاپاسکال توسعه داده شده است. - در این مدل نحوه‌ی تخریب سقف و نشست سطح زمین محاسبه نمی‌شود. - از یک مدل نیمه تحلیلی برای بررسی واکنش‌های بین زغال‌سنگ، خاکستر و جریان آب منطقه استفاده شده است.

ادامه‌ی جدول ۲-۲

<p>-یک مدل سه بعدی است که در دانشگاه صنعتی دلف<sup>۱</sup> هلند توسعه داده شده است. در این مدل پدیده‌های انتقال جرم، انتقال حرارت و رفتار ترمومکانیکی همگی با یکدیگر در نظر گرفته می‌شود. نتایج حاصل از این مدل نشان می‌دهد که:</p> <p>-یک منطقه با حداقل نفوذپذیری در بین چاه‌ها وجود دارد که منجر به برقراری ارتباط می‌شود.</p> <p>-یک لایه خاکستر با حداقل نفوذپذیری در کف فضای استخراجی تشکیل می‌شود.</p> <p>-این مدل قادر است شکل فضای استخراجی و میزان گسترش آن را پیش‌بینی نماید.</p> <p>-در این مدل دما وابسته به ویسکوزیته در نظر گرفته شده است.</p> <p>-از معادلات دارسی برای حل معادلات جریان استفاده شده است.</p> <p>-پدیده‌ی تخریب زغال‌سنگ به صورت جزئی با توجه به پوسته شدن با نرخ ثابت در نظر گرفته شده است.</p> <p>از محدودیت‌های این مدل می‌توان به این نکته که واکنش‌های بین زغال‌سنگ، خاکستر و جریان آب منطقه در نظر گرفته نشده است، اشاره کرد.</p>	<p>Biezen et al., 1995; Biezen, 1996</p>	<p>راکتور</p>	<p>۶</p>
<p>-یک مدل دو بعدی است که شامل کوپلینگ پدیده‌های انتقال جرم و انتقال حرارت و واکنش‌های شیمیایی است و فرض شده است که این پدیده‌ها در مرزهای فضای استخراجی به وقوع می‌پیوندند.</p>	<p>Perkins et al., 2003</p>	<p>راکتور</p>	<p>۷</p>
<p>در این تحقیق یک مدل برای برآورد گسترش فضای استخراجی ارائه داده شده است. این مدل بر اساس خصوصیات زغال‌سنگ است و قادر است با مدل‌سازی ریاضی نرخ گسترش فضای استخراجی را محاسبه نماید. مقایسه‌ی نتایج این مدل با مجموعه‌های UCG، نشان دهنده‌ی کارایی مناسب آن در محاسبه‌ی گسترش فضای استخراجی است ولی این مدل ریاضی دارای پیچیدگی‌های زیادی است و مدلی تجربی ارائه ننموده است تا کاربر بتواند به راحتی از آن استفاده نماید.</p>	<p>Perkins, 2005</p>	<p>راکتور</p>	<p>۸</p>
<p>-این مدل برای لایه‌های شیب‌دار عمیق ارائه شده است.</p> <p>-نتایج این مدل نشان داده است که افزایش زمان گازی کردن سبب کاهش فشار در داخل کانال گازی کردن می‌شود.</p> <p>-نگه داشتن سیستم در یک دمای بالا سبب افزایش پایداری فرآیند و بالا رفتن ارزش حرارتی گاز خروجی می‌شود.</p> <p>-در این مدل، مدل‌های ریاضی برای درجه حرارت، فشار و میدان‌های غلظت گاز در داخل فضای استخراجی در نظر گرفته شده است.</p> <p>-پدیده‌های انتقال جرم و حرارت در نظر گرفته شده است.</p> <p>-پدیده‌ی نشست گاز از فضای استخراجی در نظر گرفته شده است.</p> <p>-از پدیده‌ی پوسته شدن زغال‌سنگ و تخریب سقف صرف نظر شده است.</p>	<p>Yang L., 2004</p>	<p>زغال‌سنگ</p>	<p>۹</p>
<p>-در این مدل رژیم‌های مناسب عملیاتی برای بالا بردن بازدهی گاز کردن در نظر گرفته شده است. خروجی مدل شامل تغییرات دما و تخلخل است.</p>	<p>Beath &amp; Mallet, 2006</p>	<p>زغال‌سنگ</p>	<p>۱۰</p>



ادامه‌ی جدول ۲-۲

<p>-مدل سه بعدی از روش CRIP که قادر است تغییرات حجم فضای استخراجی و ترکیب گاز تولید شده را پیش‌بینی نماید.</p>	<p>Beath &amp; Mallet, 2006</p>	<p>راکتور</p>	<p>۱۱</p>
<p>-یک مدل یک بعدی است که تاثیر شرایط عملیاتی و خصوصیات زغال‌سنگ را بر گسترش فضای استخراجی و بازدهی انرژی پیش‌بینی می‌نماید. نتایج حاصل از این مدل نشان می‌دهد که: -نرخ گسترش فضای استخراجی رابطه‌ی عکس با آب وارد شده به داخل فضای استخراجی دارد. -با افزایش رطوبت محتوی، دما و مواد فرار زغال‌سنگ، گسترش فضای استخراجی افزایش می‌یابد. -تشکیل لایه خاکستر در کف فضای استخراجی سبب کاهش نرخ گسترش فضای استخراجی می‌شود.</p>	<p>Perkins &amp; Sahajwalla, 2006</p>	<p>راکتور</p>	<p>۱۲</p>
<p>نتایج حاصل از این مدل نشان می‌دهد که: -زمان ارتباط بین چاه‌ها متناسب با ریشه دوم فاصله بین آن‌ها است. -دمای سوختن در روش پیشرو خیلی بیشتر از روش پسرو است. -فضای استخراجی تشکیل شده در روش پیشرو دارای شکل گلابی است در حالی که در روش پسرو به طور نسبی کم پهناتر و تقریباً استوانه‌ای است.</p>	<p>Blinder man et al., 2008; Blinder man &amp; Klimenko, 2007</p>	<p>ارتباطی</p>	<p>۱۳</p>
<p>-تاثیر عوامل عملیاتی بر نرخ گسترش فضای استخراجی UCG با انجام آزمایشات بر روی بلوک‌های زغال‌سنگ مورد بررسی قرار گرفته است. -یک سری روابط تجربی برای گسترش فضای استخراجی ارائه شده است. -از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای شبیه‌سازی جریان گاز در داخل فضای استخراجی UCG استفاده شده است.</p>	<p>Daggupati et al., 2010; 2011</p>	<p>راکتور- آزمایشگاهی</p>	<p>۱۴</p>
<p>-شبیه‌سازی فرآیند UCG در محیط سه بعدی با استفاده از نرم افزار STARS انجام شده است. -این مدل برای فرآیند UCG در اعماق زیاد ارائه شده است. -پدیده‌های انتقال جرم، حرارت و واکنش‌های شیمیایی در آن در نظر گرفته شده است. -خصوصیات رفتاری زغال‌سنگ و سنگ دربرگیرنده (تخلخل، نفوذپذیری، درصد خاکستر و ...) در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. -فرآیندهای ژئومکانیکی در نظر گرفته نشده است. نتایج حاصل از این مدل نشان می‌دهد که: -نرخ گسترش فضای استخراجی در جهت افقی بیشتر از جهت قائم است. این مدل قادر است شکل فضای استخراجی ایجاد شده را پیش‌بینی نماید. -تغییرات گاز خروجی با توجه به نرخ جریان گاز ورودی محاسبه شده است. -در این مدل به مسائل ژئومکانیکی مربوط به گسترش پهنه پرداخته نشده است.</p>	<p>Nourozieh et al., 2010</p>	<p>راکتور</p>	<p>۱۵</p>
<p>برنامه‌ریزی برای ارائه‌ی جامع‌ترین مدل سه بعدی برای فرآیند UCG در آزمایشگاه لورنس لیور مور آمریکا که همه‌ی فرآیندهای درگیر را در بر بگیرد. در آزمایشگاه لورنس تاکنون مدل‌های کوچکی از گسترش فضای استخراجی در اثر فرآیندهای شیمیایی، هیدرولوژی و ژئومکانیک تهیه شده است ولی هنوز برای رسیدن به مدل جامع نیاز به تحقیقات فراوانی است.</p>	<p>Nitao et al., 2010; 2011</p>	<p>راکتور</p>	<p>۱۶</p>

ادامه‌ی جدول ۲-۲

<p>-در این مدل تاثیر ضخامت لایه‌ی خاکستر و نرخ ورودی جریان اکسیژن بر گسترش فضای استخراجی با مدل‌سازی آزمایشگاهی UCG در داخل یک تنه درخت و بلوک زغال‌سنگ بررسی شده است.</p> <p>-در این مدل نرخ پیشروی فضای استخراجی در جهت قائم و افقی و نیز میزان گسترش فضای استخراجی در بلوک‌های بالایی و پایینی کانال ارتباطی در داخل یک بلوک زغال‌سنگ بررسی شده است.</p> <p>-درصد خاکستر عامل اصلی گسترش فرآیند در بلوک‌های بالایی و پایینی کانال ارتباطی است و به نحوی است که هرچه درصد خاکستر زغال‌سنگ کمتر باشد نرخ گسترش فضای استخراجی در بلوک پایینی بیشتر است.</p>	<p>Prabu &amp; Jayanti, 2011</p>	<p>راکتور- آزمایشگاهی</p>	<p>۱۷</p>
<p>-از نرم افزار COMSOL برای شبیه‌سازی روش CRIP تک کاناله استفاده شده است. از این نرم افزار برای بررسی میزان گسترش فضای استخراجی استفاده شده است. میزان گسترش فضای استخراجی و مساحت آن تحت فشارهای مختلف تزریق مورد بررسی قرار گرفته است.</p> <p>-از نرم افزار Fluent به منظور بررسی نرخ گسترش فضای استخراجی و نیز ترکیب گازهای خروجی استفاده شده است.</p> <p>-اثر پارامترهای قابل کنترل بر میزان گسترش فضای استخراجی مورد بررسی قرار گرفته است.</p>	<p>Saraf Shirazi, 2012</p>	<p>راکتور</p>	<p>۱۸</p>

همانطور که گفته شد، یکی از مهمترین مسائلی که در استخراج به روش UCG مطرح است بررسی میزان گسترش فضای استخراجی است که از ابتدای به کارگیری روش UCG مورد توجه بوده است. در زمینه رشد فضای استخراجی (رشد کاواک) مطالعات زیادی انجام شده است. در اکثر آنها تاثیر پارامترهای قابل کنترل و غیرقابل کنترل بر رشد فضای استخراجی در مقیاس آزمایشگاهی با روش عددی مورد بررسی قرار گرفته شده است. از جمله مهمترین مطالعات انجام شده در این زمینه به شرح جدول ۲-۳ است.

جدول ۲-۳- مهمترین تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی میزان گسترش فضای استخراجی

محققان	ملاحظات
Perkins and Sahajwalla, 2006	مدل یک بُعدی برای بررسی تاثیر شرایط عملیاتی و مشخصات زغال سنگ بر روی رشد کاواک- نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که شرایط عملیاتی شامل دمای عملیات، جریان آب و فشار گاز و مشخصات زغال سنگ شامل خاکستر و ثابت کربن، بیشترین تاثیر را بر روی نرخ رشد کاواک دارند.
Luo et al., 2009	مدل دو بُعدی ریاضی برای بررسی رشد کاواک- از شبیه‌سازی CFD برای بررسی واکنش‌های احتراق و گازی شدن استفاده شده است- در نهایت نشان داده شده است که این مدل توانایی پیش‌بینی شکل کاواک، پروفایل دما و مقدار زغال سنگ مصرف شده را دارد.
Daggupati et al., 2010	در این تحقیق یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی شکل‌گیری احتراق کاواک، تاثیر پارامترهای عملیاتی و طراحی مختلف مانند فاصله‌ی بین چاه‌ها (چاه‌های تزریق و تولید)، نرخ خوراک ورودی و زمان عملیات در سیر تکاملی فرآیند گازی کردن، بررسی شده است.
Daggupati et al., 2011	با استفاده از شبیه‌سازی CFD و بر اساس توزیع زمان-مکان (RTD) جریان در کاواک به عنوان یک شبکه‌ی ساده شده از راکتور ایده‌آل در نظر گرفته شده و مدل‌سازی نموده‌اند. هدف اصلی این تحقیق شناخت توزیع سرعت و اندازه‌گیری الگوهای جریان غیر خطی در کاواک UCG بوده است.
prabu and Jayanti, 2011	یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی شکل هندسی کاواک (سه بُعدی) انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که شکل کاواک به شدت تحت تاثیر نرخ جریان اکسیژن قرار می‌گیرد- مقاومت خاکستر موجود در زغال سنگ باعث کاهش در نرخ واکنش می‌شود- شکل کاواک بعد از این که تغییرات قابل توجهی در جهات مختلف انجام داد سرانجام به یک شکل پایدار می‌رسد.
Seifi et al., 2011	مدل سه بُعدی با در نظر گرفتن آثار انتقال جرم و حرارت و سنتیک شیمیایی در طول سوختن زغال سنگ به روش CRIP توسعه داده شده است. انگیزه‌ی اصلی این تحقیق، ارائه‌ی یک روش شبیه‌سازی با استفاده از یک رویکرد جامع در محیط متخلخل برای درک بهتر وضعیت‌های بحرانی در فرآیند UCG بوده است.
Sarraf Shirazi, 2012	یک مدل CFD سه بُعدی- فرآیند UCG بر روی یک بلوک زغالی کوچک مقیاس در ابعاد $3 \times 1.5 \times 2$ cm آزمایش شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که رسانایی گرمایی زغال سنگ، نفوذپذیری اولیه درزه‌ها و میزان تزریق اکسیژن تاثیر عمده‌ای بر فرآیند گازی شدن دارند. به طوری که اگر نفوذپذیری زغال سنگ زیاد باشد کاواک عریض تر می‌شود و اگر نفوذپذیری کم باشد کاواک کشیده‌تر می‌شود. همچنین در نرخ جریان کم کاواک پیازی شکل و در نرخ جریان زیاد شکل کاواک کشیده‌تر می‌شود.
Najafi et al., 2015	یک مطالعه‌ی آماری برای تعیین نرخ گسترش کاواک انجام شده است. در این تحقیق یک مدل ساده برای تعیین نرخ رشد کاواک با استفاده از آنالیز رگرسیون غیر خطی توسعه داده شده است. داده‌های آماری مطالعه شده در این تحقیق، داده‌های واقعی ۱۱ مجموعه‌ی UCG در دنیا بوده است. مقایسه‌ی نتایج حاصل از این تحقیق با داده‌های واقعی از میادین UCG، نشان می‌دهد که این مدل بسیار به واقعیت نزدیک است.
Samdani et al., 2016	یک مدل CFD برای شبیه‌سازی فرآیند UCG توسعه داده‌اند. در این تحقیق فرآیند UCG به دو فاز مجزا تقسیم شده است. در فاز اول زغال سنگ نزدیک به چاه تزریقی مصرف می‌شود و کاواک در جهت عمودی رشد می‌کند تا به روباره برسد، پس از آن فاز دوم شروع می‌شود که در آن کاواک در جهت افقی و به سمت چاه تولید رشد می‌کند. مدل توسعه داده شده در این تحقیق، سنتیک واکنش، انتقال حرارت، انتقال جرم، محدودیت نفوذپذیری و اثرات شکست ترمو مکانیکی (حرارتی- مکانیکی) را برای زغال سنگ مورد نظر به صورت یکپارچه بررسی می‌کند. این مدل در مقیاس آزمایشگاهی تست شده و نتایج حاصل از آن نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند ترکیب و ارزش حرارتی گاز تولیدی و نرخ رشد کاواک را پیش‌بینی کند.

در زمینه‌ی مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی هم تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است.

چکیده‌ای از مهمترین این تحقیقات در جدول ۲-۴ گردآوری شده است.

جدول ۲-۴- مهمترین تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی

محققان	ملاحظات
Perkins & Sahajawalla, 2008	یک مدل CFD برای پیش‌بینی ترکیب و ارزش حرارتی گاز تولیدی توسعه داده اند، نتایج این مدل نشان می‌دهد که ارزش حرارتی گاز تولیدی به واکنش‌پذیری زغال سنگ و نسبت سطح در حال واکنش به واحد حجم داخل کانال، بسیار حساس است.
Daggupati et al., 2011, B	یک تحقیق گسترده برای بررسی ر شد کاواک و تاثیر پارامترهای عملیاتی (مانند زمان عملیات و ترکیب گاز تزریقی) بر ارزش حرارتی گاز تولیدی توسعه داده اند.
Andrianopoulos et al., 2015	در یک تحقیق، واکنش‌های شیمیایی در فرآیند UCG را توسط نرم‌افزار اسپین پلاس شبیه‌سازی کرده و در نهایت کیفیت گاز تولیدی را تحت شرایط مختلف بررسی کرده‌اند.
Zogała & Janoszek, 2015	یک شبیه‌سازی CFD توسط نرم‌افزار انسیس فلونت توسعه داده‌اند. هدف در این تحقیق بررسی تاثیر بخار آب به عنوان عامل گازی شدن بر ترکیب و ارزش حرارتی گاز تولیدی بوده است. نتیجه‌ی این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش مقدار بخار آب، ارزش حرارتی گاز تولیدی تا جایی افزایش می‌یابد و پس از آن به دلیل کاهش زیاد دما واکنش‌های شیمیایی تحت تاثیر قرار می‌گیرد و ارزش حرارتی گاز تولیدی کم می‌شود.
Laciak et al., 2016	در این تحقیق با شبیه‌سازی فرآیند گازی شدن زغال سنگ در آزمایشگاه، بر روی مقدار و ترکیب گاز تولیدی تحت شرایط فشاری مختلف تحقیق شده است.
Wiatowski et al., 2016	در این تحقیق فرآیند UCG در آزمایشگاه شبیه‌سازی شده است، حداکثر فشار ۵ مگاپاسکال و حداکثر دما به ۱۶۰۰ درجه سانتی‌گراد رسیده است، در نهایت ترکیب و ارزش حرارتی گاز تولیدی در زمان‌های مختلف بحث و بررسی شده است.

## ۲-۳- جمع‌بندی

در این فصل به مطالعه‌ی پیشینه‌ی روش UCG، از ایده‌های اولیه تا مهمترین تحقیقات انجام شده در این زمینه تاکنون، به طور مختصر پرداخته شده است. ابتدا طرح‌های کلی برای انجام این روش در چند کشور پیشگام در جدول ۲-۱ معرفی شده سپس در جداول ۲-۲ مهمترین مدل‌های عددی و آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی فرآیند UCG به طور خلاصه ذکر شده است. همانطور که در این تحقیقات مشاهده می‌شود بعد از این که زیمنس و مندلیف ایده اولیه اجرای UCG را دادند، از سال ۱۹۰۹ با ثبت اختراع بتس تا امروز هرکسی با دانش خود به بررسی گوشه‌ای از خلاهای موجود در درک این روش پرداخته است، در این روش دسترسی مستقیم به زیر زمین و لایه‌ی زغال وجود ندارد به همین دلیل به

دانش بالایی جهت کنترل بهینه فرآیند UCG نیاز است.

در ادامه در جدول ۲-۳ و ۲-۴ چکیده‌ای از مهمترین تحقیقات به ترتیب در زمینه‌های میزان گسترش فضای استخراجی و ارزش حرارتی گاز تولیدی گردآوری شده است. با این که در زمینه‌ی بررسی شکل و حجم کاواک، مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی تحقیقات مختلفی انجام شده است اما با توجه به این که این تحقیقات در مقیاس سنتی، تحت شرایط خاص، انحصاری برخی شرکت‌ها و به طور کلی اطلاعات کامل و دقیقی از آنها برای اجرای فرآیند در مقیاس تجاری در دسترس نیست، انجام تحقیق حاضر برای افزایش دانش UCG در کشور ضروری به نظر می‌رسد.

فصل سوم: بررسی میزان گسترش فضای استخراجی

### ۳-۱- مقدمه

یکی از مهمترین خलाهای علمی در روش UCG، فقدان دانش لازم برای پیش‌بینی دقیق میزان گسترش فضای استخراجی است. دانستن میزان گسترش فضای استخراجی برای طراحی و ارائه‌ی الگوی تبدیل به گاز کردن ضروری می‌باشد. چرا که پارامترهای فنی و اقتصادی را به شدت تحت تاثیر خود قرار می‌دهد. پیش‌بینی مقدار زغال‌سنگ تبدیل به گاز شده، ابعاد پهنه، ابعاد لنگه‌ها و میزان نشست زمین از جمله مهمترین پارامترهایی هستند که تحت تاثیر میزان گسترش فضای استخراجی قرار دارند. در این فصل، میزان گسترش فضای استخراجی در قالب دو موضوع شکل کاواک و حجم کاواک مورد بحث و بررسی قرار گرفته شده است. در ابتدا با توجه به مهمترین نتایج به دست آمده از مطالعات کتابخانه‌ای (تحقیقات معرفی شده در فصل ۲) مهمترین پارامترهای موثر بر میزان گسترش فضای استخراجی به طور خلاصه بیان شده است. سپس با توجه به این تحقیقات، یک شکل ساده برای کاواک در روش تک کاناله معرفی شده است. رشد ابعاد این شکل با یک تحقیق آماری تو سعه داده شده است. در نهایت با شبیه‌سازی فرآیند UCG توسط نرم‌افزار COMSOL، حجم کاواک مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳-۲- عوامل موثر بر شکل و حجم کاواک

به طور کلی عوامل زیادی بر روی شکل و حجم کاواک موثر هستند اما مهمترین آن‌ها عبارت‌اند از: روش تبدیل به گاز کردن، خصوصیات لایه زغال‌سنگ، تخریب و خصوصیات سنگ‌های در برگیرنده، نرخ جریان، فاصله‌ی چاه‌های تزریق و تولید و بالاخره سرعت تزریق اکسیدان و زمان آن (این نتیجه از مطالعات کتابخانه‌ای انجام شده به شرح منابع ذکر شده در فصل پیشینه تحقیق، گرفته شده است). در ادامه هر یک از این موارد به طور مختصر شرح داده شده است.

### ۳-۲-۱- روش تبدیل به گاز کردن

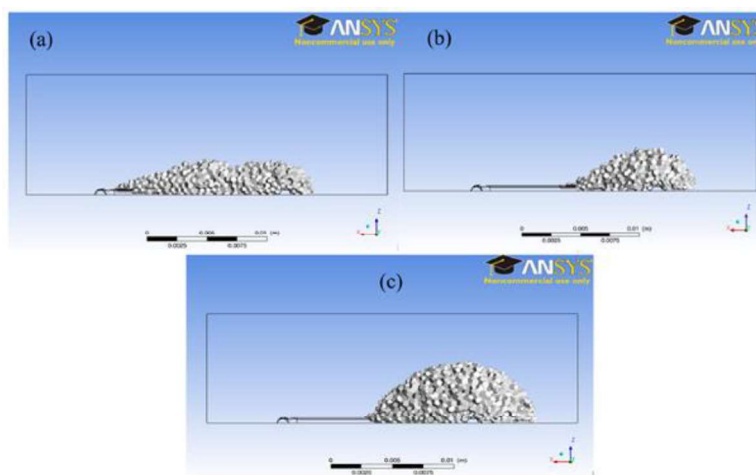
تاکنون روش‌های متفاوتی برای اجرای UCG در سراسر جهان معرفی و بعضاً اجرا شده است. در هر یک از این روش‌ها، چاه‌های تزریق، تولید، آتش و اتصال با آرایش‌های متفاوت حفاری شده‌اند و با هم در ارتباط هستند. از جمله مهم‌ترین این روش‌ها عبارت‌اند از روش اتاقی، روش گمانه‌ای، روش گالری شیب‌دار، روش چاه قائم (روسی)، روش EUCG، روش تونل بلند دو مرحله‌ای (تونلی) و روش‌های CRIP که به صورت یک یا چند کاناله اجرا می‌شوند.

بخش زیادی از محدوده‌ی فضای گازی شدن توسط مکان و نوع حفاری چاه‌ها تعیین می‌شود. بنابراین با اجرای هر یک از این روش‌ها فضای درگیر زغال‌سنگ در فرآیند و ابعاد کاواک ایجاد شده در زیر زمین متفاوت خواهد بود (Couch, 2009).

### ۳-۲-۲- خصوصیات لایه زغال‌سنگ

مهم‌ترین ویژگی‌های زغال‌سنگ عبارت است از ثابت کربن، مواد فرار، رطوبت محتوا و خاکستر. اگر این مواد به طور یکسان در زغال‌سنگ پخش شده باشد یعنی زغال‌سنگ همگن باشد شکل کاواک متقارن می‌شود و تحلیل آن راحت‌تر است در غیر این صورت شکل کاواک به سادگی قابل پیش‌بینی نیست. از دیگر خصوصیت لایه‌ی زغال که تاثیر زیادی بر روی شکل کاواک دارد، نفوذپذیری آن است به این صورت که اگر نفوذپذیری زغال‌سنگ زیاد باشد گسترش عرضی زیاد می‌شود و اگر نفوذپذیری آن کم باشد گسترش طولی زیاد می‌شود (Sarraf Shirazi, 2012). این موضوع در شکل ۳-۱ به خوبی نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در حالتی که نفوذپذیری زغال‌سنگ ۱ میلی‌داری است گسترش طولی نسبت به سایر حالات بیشتر است. در حالتی که نفوذپذیری زغال‌سنگ ۱۰ داری است گسترش عرضی بیشتر است و در حالتی که نفوذپذیری ۱۰۰ میلی‌داری است حالتی بینابین اتفاق افتاده است.





شکل ۳-۱- تاثیر نفوذپذیری بر شکل کاواک (a) 1mD، (b) 100mD، (c) 10D (Sarrafi Shirazi, 2012)

### ۳-۲-۳- تخریب و خصوصیات سنگ‌های در برگیرنده

جنس و نوع سنگ‌های در برگیرنده می‌تواند بر روی انتقال حرارت و در نتیجه کاهش دمای درون کاواک تاثیر بگذارد که این امر بر روی شکل کاواک موثر است زیرا کاهش دما در کاواک موجب کاهش رشد ابعاد کاواک می‌شود (Perkins, G., 2005). وجود درزه، شکاف و ناپیوستگی در سنگ‌های در برگیرنده باعث نشت گاز می‌شود که این موضوع می‌تواند بر روی پارامترهای عملیاتی تاثیر منفی بگذارد و در نتیجه شکل کاواک را تحت تاثیر قرار دهد. همچنین تخریب و ریزش سنگ‌های در برگیرنده به درون کاواک علاوه بر این که باعث تغییر در شکل کاواک می‌شود ممکن است باعث مسدود شدن کاواک و در نتیجه متوقف شدن فرآیند گازی شدن شود.

### ۳-۲-۴- نرخ جریان

اگر نرخ جریان ورودی کم باشد، کاواک پیازی شکل می‌شود، درحالی که در نرخ جریان بالا، کاواک بیشتر در جهت تولید کشیده می‌شود. جدول ۳-۱ نرخ رشد ابعاد کاواک نسبت به جریان‌های ورودی مختلف را نشان می‌دهد (Sarrafi Shirazi, 2012). در این جدول ابتدا ابعاد کاواک برای نرخ جریان  $0.05 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$  ذکر شده و سپس با افزایش نرخ جریان درصد افزایش هر یک از ابعاد آورده شده است.

جدول ۳-۱- ابعاد کاواک برای نرخ جریان‌های متفاوت (Sarraf Shirazi, 2012)

جریان ورودی (kg/m <sup>2</sup> s)	۰/۰۵	۰/۱	۰/۲	۰/۳
طول کاواک (mm)	۴/۷	+٪۶۵	+٪۱۰۳	+٪۱۶۳
ارتفاع کاواک (mm)	۲/۲۸	+٪۲۲/۸	+٪۲۸	+٪۳۳/۷
عقب‌زدگی (mm)	۲/۰۷	+٪۱۵	+٪۳۱	+٪۵۷/۹
عرض کاواک (mm)	۲/۳۵	+٪۸	+٪۲۵/۱	+٪۴۲/۸

### ۳-۲-۵-فاصله‌ی چاه‌های تزریق و تولید

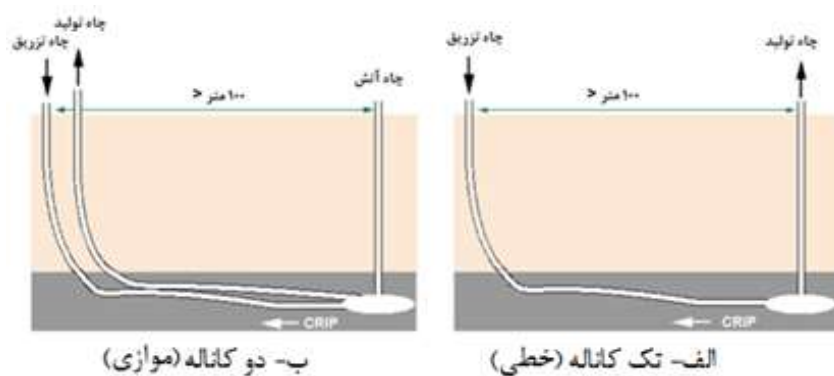
با افزایش فاصله‌ی بین چاه‌ها، افت فشار در کانال خروجی افزایش می‌یابد همچنین رشد طولی و عقب‌زدگی در کاواک کاهش می‌یابد که در نتیجه‌ی آن حجم کاواک کاهش می‌یابد (Daggupati et al., 2010, B).

### ۳-۲-۶-سرعت تزریق اکسیدان

این سرعت به شدت بر روی نرخ گسترش ابعاد کاواک و در نتیجه شکل نهایی کاواک موثر است. در ادامه این موضوع مفصل‌تر بحث شده است.

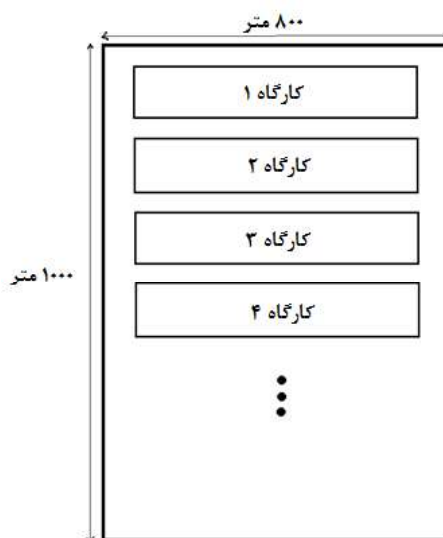
### ۳-۳-سرعت تزریق و ارتباط آن با شکل کاواک

در این تحقیق روش تبدیل به گاز کردن تک کاناله (خطی) مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این روش یک نقطه احتراق متحرک در زیر زمین و در رگه زغال ایجاد می‌شود که وقتی زغال در اطراف نقطه‌ی مورد نظر سوخته و مصرف شد به عقب کشیده می‌شود تا جایی که کل محدوده مورد نظر مصرف شود. گاز سنتزی تولید شده برای پالایش به سطح زمین منتقل می‌شود. این روش کنترل مطلوبی بر روی راکتور تبدیل به گاز شدن فراهم می‌کند. یکی از روش‌های تک کاناله روش CRIP تک کاناله است. در شکل ۳-۲ روش CRIP تک کاناله و دو کاناله نمایش داده شده است.



شکل ۳-۲- زیرمجموعه‌های روش CRIP (Couch, 2009)

فرض کنید یک لایه‌ی زغال سنگ به ضخامت، عرض و طول به ترتیب ۵، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ متر در عمق ۴۰۰ متری از سطح زمین با روش UCG استخراج شود، در این صورت تعدادی کارگاه استخراج در طول لایه به صورت شکل ۳-۳ ایجاد می‌شود.

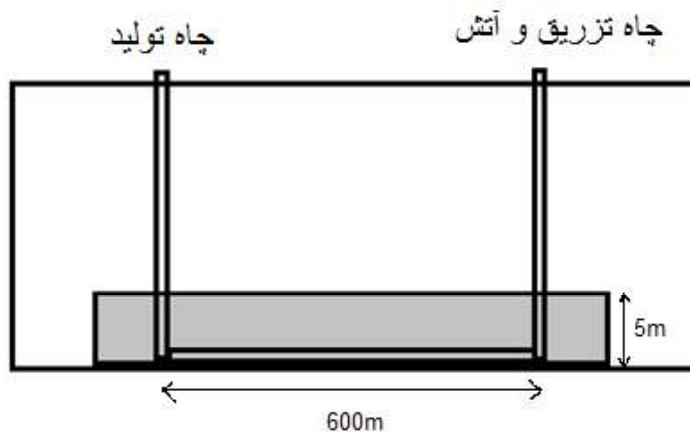


شکل ۳-۳- فرض اولیه وضعیت کارگاه‌ها در منطقه (نما از بالا)

طول کارگاه متناسب با ضخامت و تجربیات گذشته انتخاب می‌شود، در ادامه طبق مدل ارائه شده می‌توان با توجه به سایر پارامترها آن را کمتر یا بیشتر در نظر گرفت. فرض کنید طول کارگاه استخراج ۶۰۰ متر در نظر گرفته شود ( $w=600m$  و  $r=5m$ ).

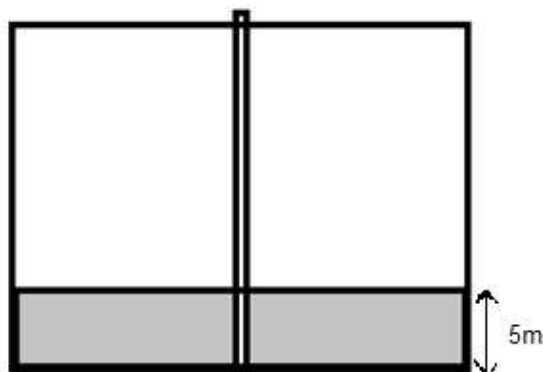
برای شروع فرآیند به روش احتراق قابل کنترل (CRIP) ابتدا چاه‌های تولید، تزریق و اتصال مانند شکل‌های ۳-۴ و ۳-۵ (از دو نمای مختلف) با فاصله و قطر مشخص حفاری می‌شود. عملیات گازی

شدن می‌تواند در دو حالت پسرو (CRIP) و یا پیشرو ادامه یابد.



شکل ۳-۴- نمای کارگاه استخراج از روبرو

چاه تزریق، آتش و تولید

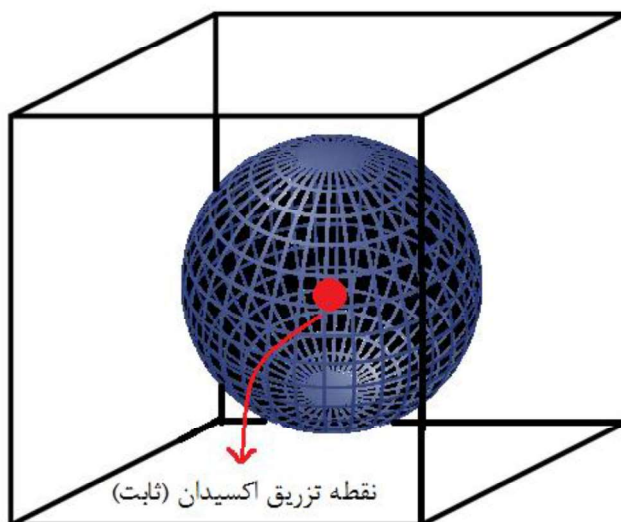


شکل ۳-۵- نمای کارگاه استخراج از بغل

در حالت پیشرو پس از وارد کردن اکسیدان و آتش، فرآیند گازی شدن از چاه تزریق و در لینک اتصالی شروع می‌شود، اگر فرض شود که نفوذپذیری زغال سنگ (در واقع احتراق آن) در تمامی جهات یکسان است بنابراین رشد کاواک به صورت یک کره که مرکز آن نقطه‌ی شروع احتراق است اتفاق می‌افتد. بینهایت نقطه در فاصله‌ی بین دو چاه در لینک اتصالی وجود دارد که به تدریج رشد کره مفروض در آن‌ها از نقطه‌ی شروع احتراق تا رسیدن به چاه تولید، شروع می‌شود.

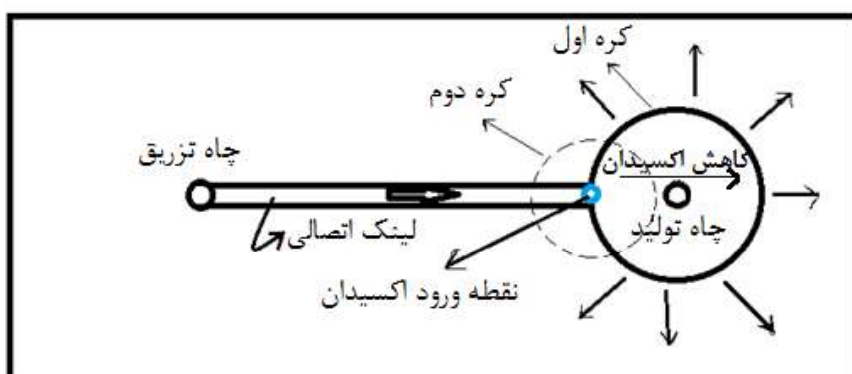
برای درک بهتر مدل، یک محیط ۳ بعدی مملو از زغال سنگ را در نظر بگیرید؛ اگر فرض شود که یک نقطه ثابت تزریق اکسیدان با سرعت خیلی کم در مرکز این محیط باشد و احتراق از آن نقطه

شروع شود در این صورت گسترش کاواک تا پایان عملیات به صورت یک کره مطابق شکل ۳-۶ ادامه می‌یابد.



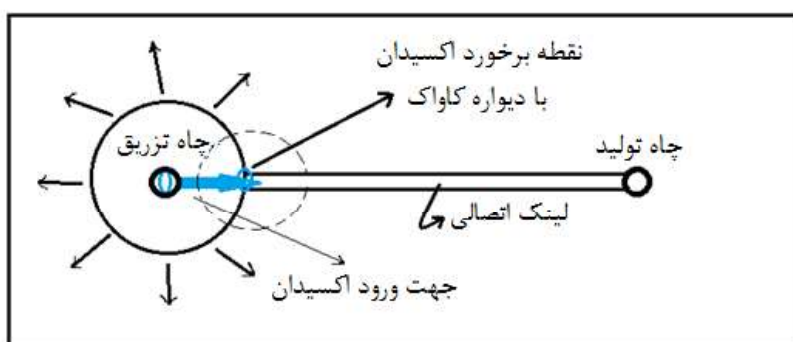
شکل ۳-۶- شکل سه بُعدی کاواک در حالت ثابت بودن نقطه تزریق با سرعت خیلی کم

اما اگر نقطه تزریق اکسیدان درون یک کانال باشد و به صورت شکل ۳-۷ به نقطه‌ی احتراق تزریق شود (یعنی آنچه در فرآیند UCG اتفاق می‌افتد)، در این صورت مقدار زیادی از اکسیدان در نواحی اولیه ورود به کاواک، وارد واکنش می‌شود و مقدار کمتری از آن به نواحی آخر می‌رسد. بنابراین رشد در نواحی آخر، کمتر می‌شود. در این تحقیق فرض شده است که نقطه‌ی ورود اکسیدان به عنوان مرکز کره‌ای دیگر باشد و رشد در آن به تدریج شروع شود. به این ترتیب عملیات رشد در کره‌های مجاور به صورت شکل ۳-۹ تا پایان ادامه می‌یابد.



شکل ۳-۷- شکل‌گیری کاواک در روش پسر و UCG

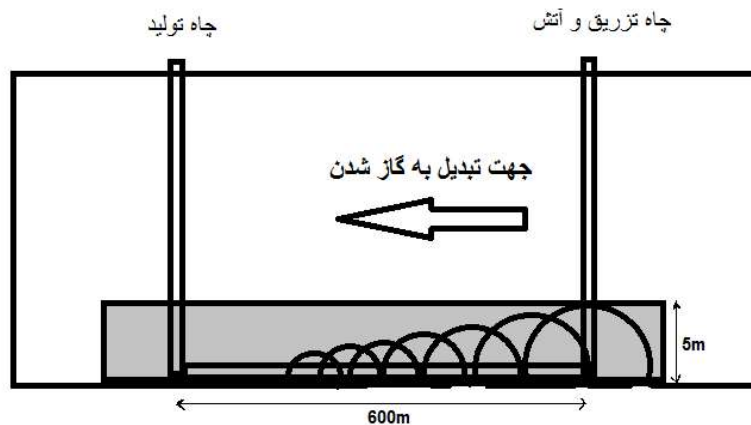
شکل ۳-۷، گسترش کاواک و نقطه ورود اکسیدان به کاواک را در حالت پسرو نشان می‌دهد اما این الگو برای حالت پیشرو هم قابل استفاده است با این تفاوت که محل ورود اکسیدان تغییر کرده و به وسیله لینک اتصالی و سرعت تزریق در جهت چاه تولید ادامه می‌یابد. شکل ۳-۸ رشد کاواک را در روش پیشرو نشان می‌دهد.



شکل ۳-۸- شکل‌گیری کاواک در روش پیشرو UCG

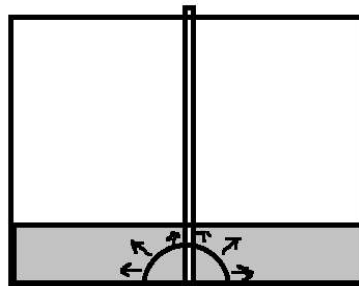
بنابراین این الگوی کلی برای رشد کاواک هم در حالت پیشرو هم در حالت پسرو در روش تک کاناله قابل توجیه است. تفاوت آن‌ها در این است که در روش پیشرو عرض فضای گازی شده بیشتر می‌شود چون غلظت اکسیدان در کره‌های ابتدایی بیشتر است. بنابراین در حالت گازی شدن پیشرو، تعداد کارگاه موجود در منطقه کمتر می‌شود و در نتیجه مقدار کل حفاری مورد نیاز کمتر می‌شود (هزینه‌های حفاری کاهش می‌یابد).

همان طور که در شکل ۳-۹ مشاهده می‌شود نقطه شروع احتراق در کف لایه زغال (در لینک اتصالی) قرار دارد. بنابراین رشد کاواک در قسمت پایین آن (با فرض احتراق ناپذیر بودن سنگ‌های در برگیرنده)، اتفاق نمی‌افتد بلکه به صورت یک نیم‌کره مانند شکل‌های ۳-۹ و ۳-۱۰ در اطراف نقطه مفروض اتفاق می‌افتد.



شکل ۳-۹- جبهه کار تبدیل به گاز شدن (نما از روبرو)

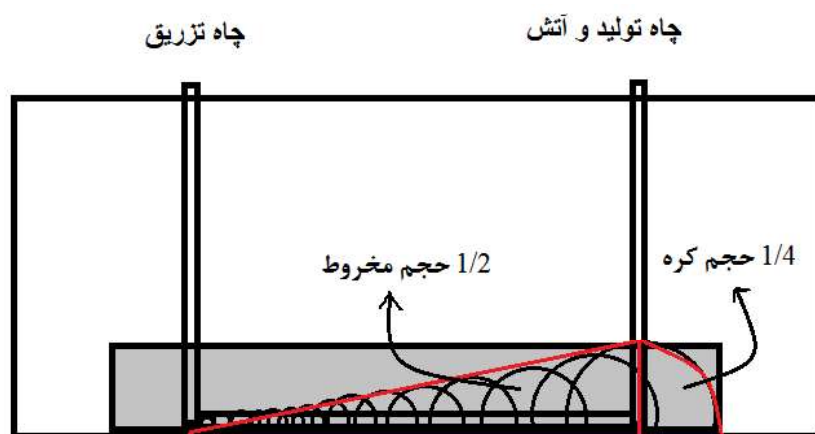
چاه تزریق، آتش و تولید



شکل ۳-۱۰- جبهه کار تبدیل به گاز شدن (نما از بغل)

همان طور که گفته شد، بینهایت نقطه در فاصله‌ی بین چاه تزریق تا تولید وجود دارد که هر کدام مرکز کره‌ای هستند که به تدریج در حال رشد کردن هستند، اگر این کره‌ها به صورت پیوسته در نظر گرفته شود نهایتاً در پایان عملیات شکل کاواک به صورت شکل ۳-۱۱ خواهد بود. در این تحقیق فرض شده است که فاصله‌ی بین چاه‌ها و نرخ تزریق به طور بهینه طراحی شده است و بزرگترین نیم کره (کره ای به مرکز نقطه شروع احتراق) به طور کامل در لایه‌ی زغالی واقع شده است. اگر فاصله‌ی چاه‌ها بیشتر از این حالت در نظر گرفته شود بخشی از محفظه درون سنگ‌های در برگیرنده تشکیل می‌شود و گسترش عرضی کاواک در کره‌های اولیه بیشتر می‌شود، و اگر فاصله‌ی چاه‌ها کمتر در نظر گرفته شود رشد کره‌های اولیه کمتر می‌شود. بنا بر شرایط واقعی و الگوی طراحی در مقیاس تجاری این فاصله و بالاخره حجم گازی کردن انتخاب می‌شود و متعاقباً پارامترهای عملیاتی به گونه‌ای طراحی می‌شود که

نتیجه مطلوب طراحی، حاصل شود. نحوه‌ی محاسبه‌ی پارامترهای طراحی متناسب با حجم انتخاب شده در ادامه بررسی شده است.

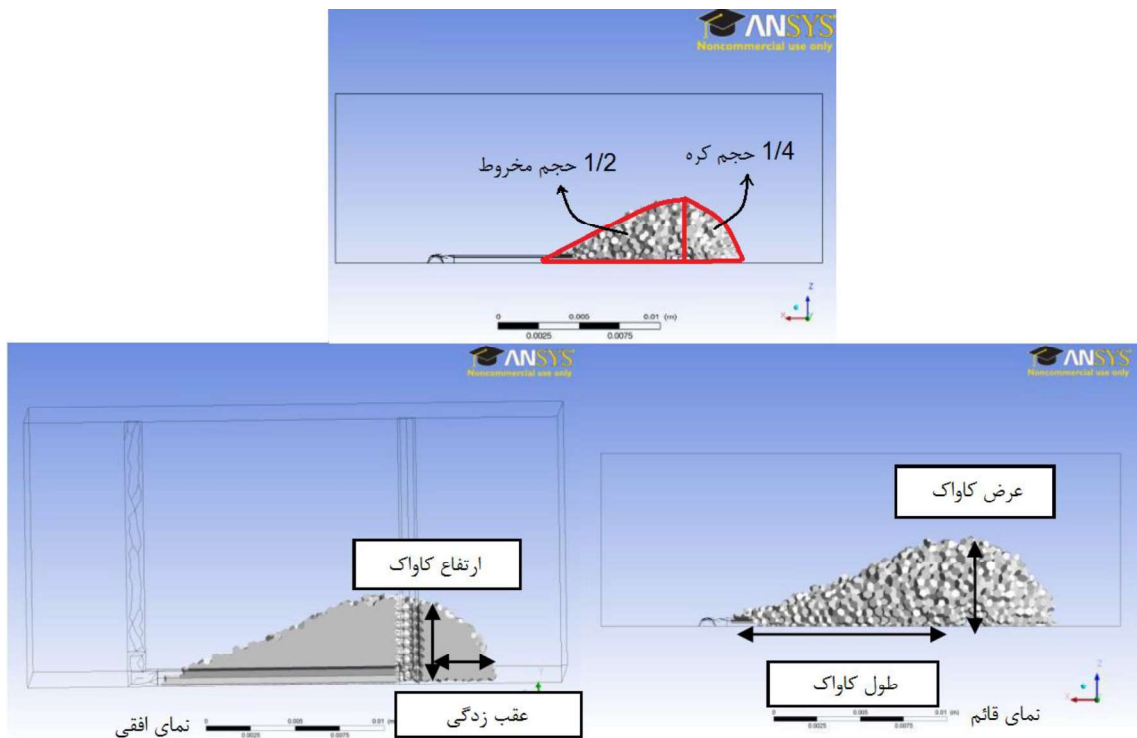


شکل ۳-۱۱- شکل کاواک ایجاد شده در مدل

این ایده برای شکل کاواک از شکل کاواک ایجاد شده در کارهای آزمایشگاهی و پژوهش‌های دیگران گرفته شده است. در سراسر دنیا محققان زیادی به دنبال بررسی و ارائه‌ی الگویی برای شکل و حجم کاواک بوده‌اند. در ادامه چند مورد از مهمترین این تحقیقات ذکر شده است.

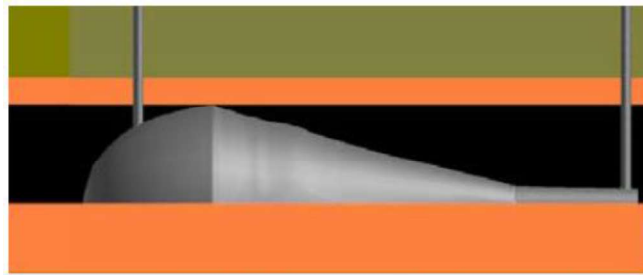
صراف شیرازی (۲۰۱۲) یک مدل CFD سه بُعدی از فرآیند UCG شبیه‌سازی کرده است. نتایج به دست آمده از این مدل نشان می‌دهد که رسانایی گرمایی زغال سنگ، نفوذپذیری اولیه درزه‌ها و میزان تزریق اکسیژن تأثیر عمده‌ای بر روند تبدیل به گاز شدن دارند. شکل کاواک ایجاد شده در این تحقیق به صورت شکل ۳-۱۲ است (Sarrafi Shirazi, 2012).



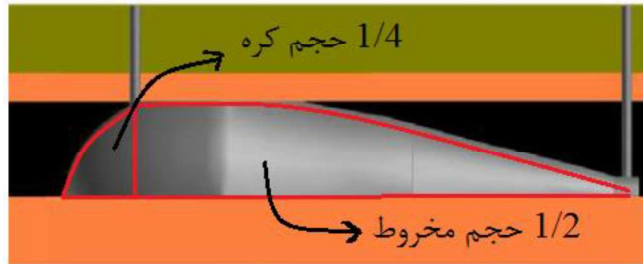


شکل ۳-۱۲- شکل کاواک در تحقیق صراف شیرازی (Sarrafi Shirazi, 2012)

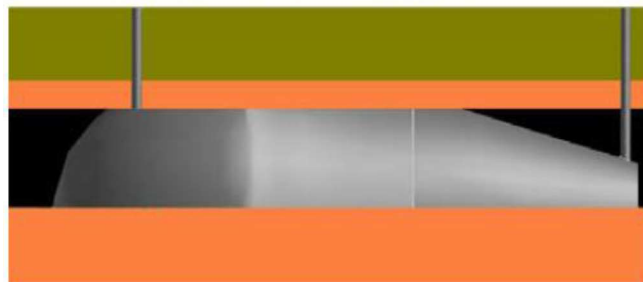
لیو و همکاران (۲۰۰۹) یک مدل ریاضی دو بُعدی از رشد کاواک برای فرآیند تبدیل به گاز کردن برجای زغال سنگ طراحی کرده‌اند و مقدار تاثیر عوامل طبیعی و غیر طبیعی بر انتقال حرارت و جرم در یک کاواک بررسی شده‌است. شکل کاواک در این پروژه به صورت شکل ۳-۱۳ است (Luo et al., 2009).



(a) شکل و ابعاد کاواک بعد از ۲/۵ روز



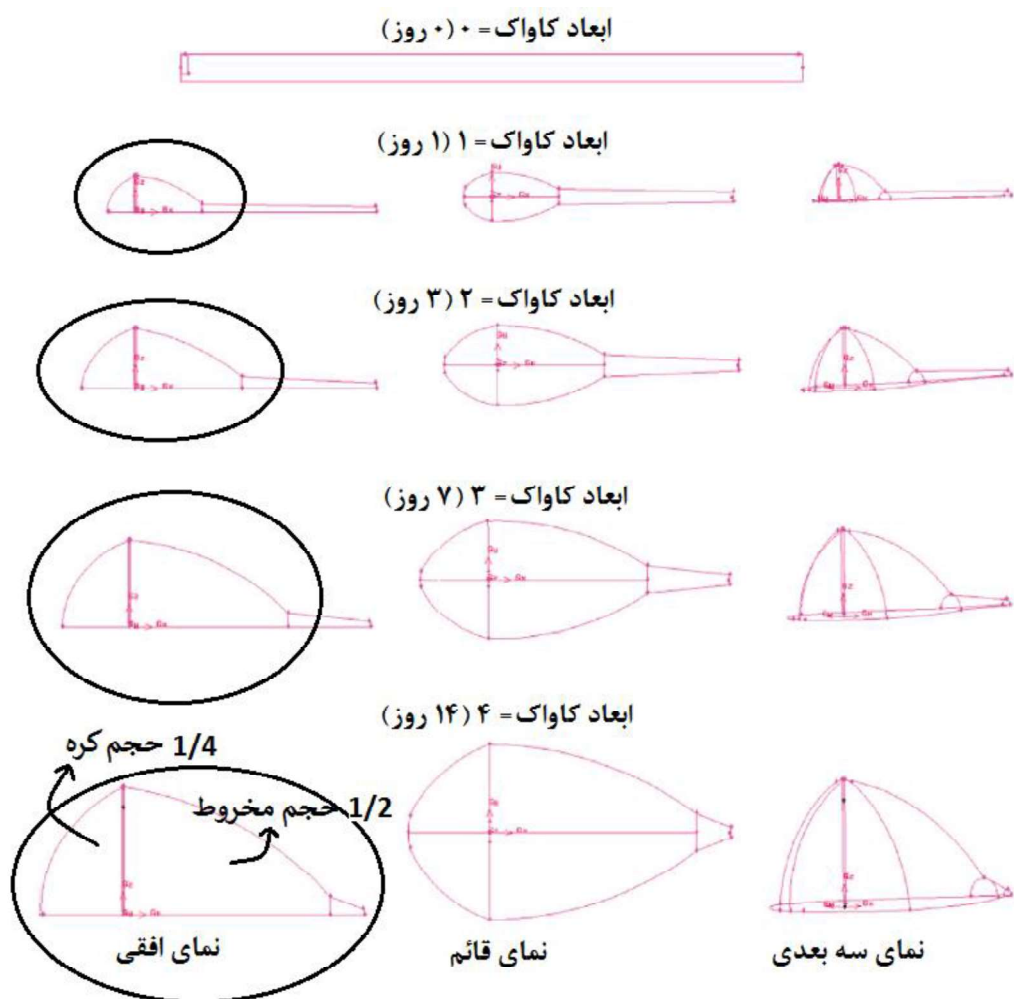
(b) شکل و ابعاد کاواک بعد از ۵ روز



(c) شکل و ابعاد کاواک بعد از ۱۰ روز

شکل ۳-۱۳- شکل کاواک در تحقیق لیو و همکاران (Luo et al., 2009)

داگوپاتی و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از شبیه‌سازی CFD و بر اساس توزیع زمان-مکان (RTD)، فضای استخراجی واقعی UCG در زمان‌های مختلف به عنوان یک شبکه‌ی ساده شده از راکتور ایده‌آل در نظر گرفته شده و مدل‌سازی شده است. شکل و ابعاد کاواک در این تحقیق به صورت شکل ۳-۱۴ است (Daggupati et al., 2011, A).



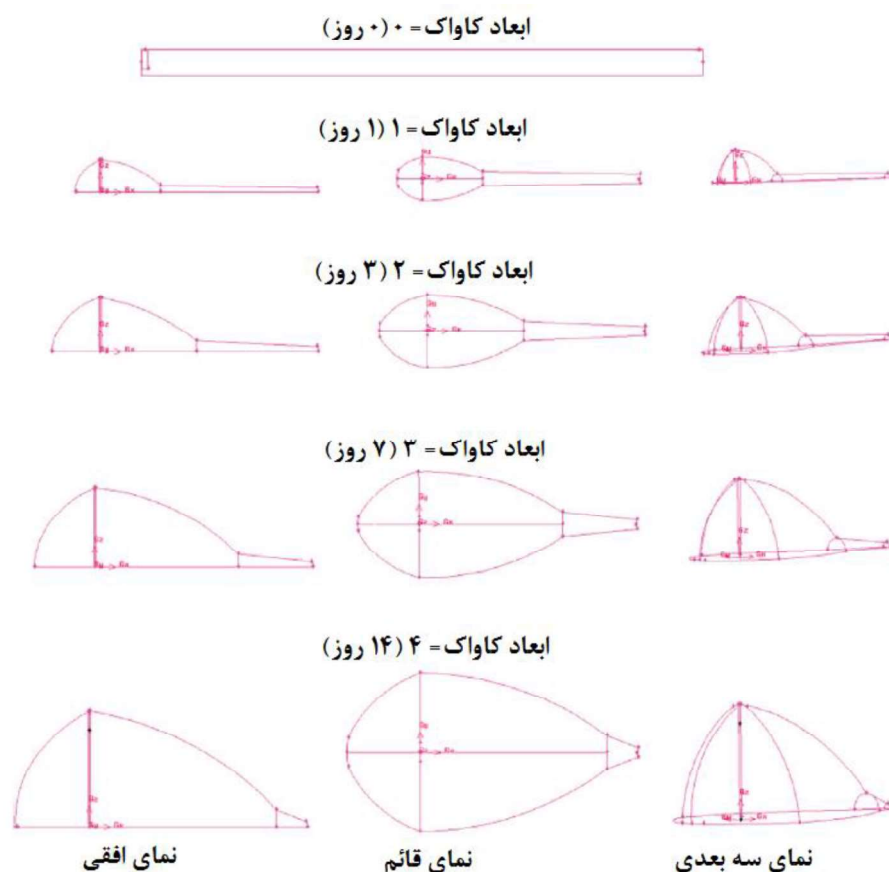
شکل ۳-۱۴- شکل کاواک در تحقیق داگوپاتی و همکاران (Daggupati et al., 2011, A)

همان طور که مشاهده می شود به نظر می رسد شکل کاواک در این تحقیقات به صورت نصف یک گلابی (1/4 حجم کره + 1/2 حجم مخروط) است. این موضوع نشان می دهد که شکل فرضی ما برای کاواک (شکل ۳-۱۱) با تحلیل انجام شده، بسیار به واقعیت نزدیک است. با توجه به این مشاهده کیفی در ادامه به بررسی رشد ابعاد این شکل پرداخته شده است.

### ۳-۴- پیش بینی رشد ابعاد کاواک

در این قسمت با توجه به اطلاعات فوق و آزمایشات دیگران، یک کار آماری برای پیش بینی ابعاد کاواک انجام شده است. آزمایش داگوپاتی و همکاران برای گازی کردن زیرزمینی زغال سنگ با استفاده

از روش تک کاناله پیشرو بوده است (Daggupati et al., 2011, A). با شروع عملیات گازی شدن در این آزمایش، شکل و ابعاد کاواک در ۵ زمان مختلف به صورت شکل ۳-۱۵ و جدول ۳-۲ گزارش شده است.



شکل ۳-۱۵- شکل و ابعاد کاواک در ۵ زمان مختلف (Daggupati et al., 2011, A)

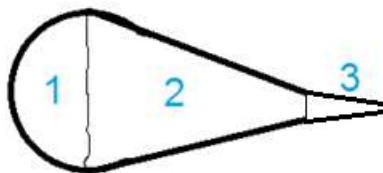
جدول ۳-۲- اندازه ابعاد کاواک در زمان‌های مختلف (Daggupati et al., 2011, A)

زمان					نماد	ابعاد کاواک
۴ (روز ۱۴)	۳ (روز ۷)	۲ (روز ۳)	۱ (روز ۱)	۰ (روز ۰)		
۹/۱	۹/۱	۹/۱	۹/۱	۹/۱	W	فاصله‌ی بین چاه‌های تزریق و تولید (m)
۳	۲/۵	۲	۱	۰/۰۱	$r_1'$ ( $r_b$ )	عقب‌زدگی در پشت چاه تزریق (m)
۷/۸	۶	۴	۲/۵	۰	h	طول کاواک از چاه تزریق (m)
۴/۷	۳/۲	۲/۲	۱/۳۲	۰/۲	$r_1$ ( $r_h$ )	ارتفاع کاواک (m)
۳/۳	۲/۲	۱/۵	۰/۹	۰/۲	$r_1''$ ( $r_w$ )	عرض کاواک در چاه تزریق (m)
۰/۷	۰/۵۲	۰/۴۲	۰/۳	۰/۲	$r_2$	عرض کاواک در لینک اتصال (m)
۰/۴	۰/۳	۰/۲۵	۰/۲	۰/۲	$r_3$	عرض کاواک در چاه تولید (m)
۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	d	قطر چاه‌های تولید و تزریق (m)

با شروع فرآیند گازی کردن، اگر فرض شود تمام محفظه درون لایه‌ی زغال باشد برای ساده کردن شکل کاواک در هر لحظه، محفظه به صورت شکل‌های ۱۶-۳ و ۱۷-۳ شامل؛  $\frac{1}{4}$  حجم کره +  $\frac{1}{2}$  حجم مخروط بریده شده + لینک اتصال‌ی مخروطی شکل که هنوز فرآیند گاز کردن به طور کامل در آنجا شروع نشده است ( $\frac{1}{2}$  حجم مخروط بریده شده)، در نظر گرفته شده است.



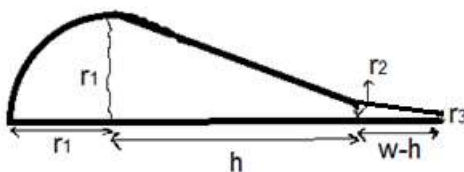
شکل ۱۶-۳- شکل کاواک در حالت کلی (نما از بغل)- ۱: ربع کره ۲: نصف مخروط بریده ۳: نصف مخروط بریده



شکل ۱۷-۳- شکل کاواک در حالت کلی (نما از بالا)- ۱: ربع کره ۲: نصف مخروط بریده ۳: نصف مخروط بریده

با توجه به شکل ۱۸-۳ و با توجه به معادله‌ی حجم کره و مخروط، با شروع شدن فرآیند گازی کردن حجم کاواک (بر حسب متر مکعب) در هر لحظه به صورت رابطه‌ی ۱-۳ محاسبه می‌شود.

$$V_t = \frac{1}{4} \left( \frac{4}{3} \pi r_1^3 \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{3} \pi h (r_1^2 + r_2^2 + r_1 r_2) \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{3} \pi (w-h) (r_2^2 + r_3^2 + r_2 r_3) \right) \quad (1-3)$$

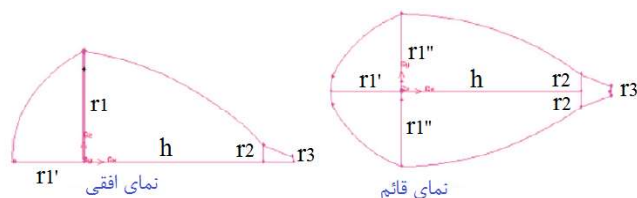


شکل ۱۸-۳- شکل و ابعاد کاواک (r شعاع، h ارتفاع، w: فاصله چاه تولید و تزریق)

در رابطه‌ی ارائه شده برای حجم کاواک (رابطه‌ی ۱-۳)، w (فاصله‌ی چاه تزریق و تولید) با توجه به طراحی اولیه مشخص است. در ادامه برای یافتن یافتن r (گسترش عرضی؛ r1، r2 و r3) و h (گسترش طولی) یک تحقیق آماری انجام شده است. برای این منظور در ادامه از اطلاعات ابعاد به دست آمده برای کاواک در جدول ۲-۳ استفاده شده است.

### ۳-۴-۱- مطالعه آماری برای پیش‌بینی نرخ رشد ابعاد کاواک

در کار داگوپاتی و همکاران شکل کاواک به صورت شکل ۳-۱۹ در نظر گرفته شده است.



شکل ۳-۱۹- شکل کاواک در آزمایش داگوپاتی و همکاران (Daggupati et al., 2011, A)

همانطور که مشاهده می‌شود در شکل ۳-۱۹، شکل کاواک از دو نمای بالا و بغل رسم شده است. پارامترهای موجود در این اشکال شامل  $r_1$  ( $r_h$ ),  $r_1'$  ( $r_w$ ),  $r_1''$  ( $r_w$ ),  $r_2$ ,  $r_3$  و  $h$  به ترتیب ارتفاع کاواک، عقب‌زدگی، گسترش عرضی در چاه تزریق، گسترش عرضی در لینک اتصالی، گسترش عرضی در چاه تولید و گسترش طولی کاواک هستند.

در این قسمت برای تعیین نرخ رشد هر یک ابعاد کاواک نسبت به زمان عملیات از اطلاعات موجود در جدول ۳-۲ استفاده شده است. برای این منظور ابتدا نمودار اندازه-زمان هر یک از ابعاد، برای ۶ تابع مختلف رسم شده است. این ۶ تابع عبارت‌اند از تابع خطی، تابع چند جمله‌ای درجه ۲، تابع چند جمله‌ای درجه ۳، تابع چند جمله‌ای درجه ۴، تابع لگاریتمیک و تابع پاور<sup>۱</sup>. سپس مقدار خطای هر یک از توابع اندازه‌گیری شده و در نهایت تابعی با کمترین خطا برای پیش‌بینی نرخ رشد هر یک از ابعاد کاواک، انتخاب شده است. مقدار خطای هر تابع به صورت رابطه‌ی ۳-۲ محاسبه شده است.

$$\text{میانگین خطای هر تابع} = \frac{\sum_{i=1}^4 \left| \frac{x_i - x}{x} \right|}{4} \quad (2-3)$$

در این رابطه  $x$  مقدار واقعی (در جدول ۳-۲)،  $x_i$  مقدار محاسبه شده (با توجه به تابع مورد نظر) و عدد ۴، تعداد را نشان می‌دهد. در ادامه در جدول ۳-۳ تا ۳-۸ و شکل ۳-۲۰ تا ۳-۲۵ نتیجه‌ی کار

آماري انجام شده براي هر بعد كاواك به طور خلاصه آورده شده است. همهي نمودارها و معادلات مربوط به اين قسمت به طور كامل در پيوست ۱ آورده شده است. در توابع ارائه شده در اين شكلها،  $t$  معرف زمان بر حسب روز و ساير پارامترها بر حسب متر هستند.

جدول ۳-۳- خلاصه‌ی مطالعه‌ی آماری برای نرخ گسترش طولی (h) نسبت به زمان

زمان	h واقعی	خطی	خطای نسبی %	چند جمله‌ای توان ۲	خطا %	چند جمله‌ای توان ۳	خطا %	چند جمله‌ای توان ۴	خطا %	لگاریتمیک	خطا %	پاور	خطا %
۱	۲/۵	۲/۱۰۹	۲۰/۴۳۶۰٪	۲/۵۴۶۷	۱/۸۶۸۰٪	۲/۵۰۰۱	۰/۰۰۴۰٪	۲/۵۰۰۱	۰/۰۰۴۰٪	۲/۲۱۶۵	۱۱/۳۴۰۰٪	۲/۵۰۱۹	۰/۰۷۶۰٪
۳	۴	۲/۷۹۷۳	۵۱/۰۶۷۵٪	۲/۹۱۷۱	۲/۰۷۲۵٪	۴/۰۰۰۳	۰/۰۰۷۵٪	۴/۰۰۰۳	۰/۰۰۷۵٪	۴/۴۲۶۷	۱۰/۶۶۷۵٪	۴/۰۴۱	۱/۰۳۵۰٪
۷	۶	۵/۳۷۰۱	۱۰/۴۹۸۳٪	۶/۰۴۳۵	۰/۷۲۵۰٪	۵/۹۹۹۹	۰/۰۰۱۷٪	۵/۹۹۹۹	۰/۰۰۱۷٪	۶/۱۳۱۳	۲/۱۸۸۳٪	۵/۸۴۸۸	۲/۵۳۰۰٪
۱۴	۷/۸	۸/۱۲۲۵	۴/۱۳۴۶٪	۷/۷۹۳۵	۰/۰۸۳۳٪	۷/۷۸۹۸	۰/۱۳۰۸٪	۷/۷۸۹۸	۰/۱۳۰۸٪	۷/۵۲۵۷	۲/۵۱۶۷٪	۷/۹۱۴۸	۱/۴۷۱۸٪
میانگین خطا			۱۰/۰۳۴۱٪		۱/۱۸۷۲٪		۰/۰۳۶۰٪		۰/۰۳۶۰٪		۶/۹۲۸۱٪		۱/۲۷۳۳٪

جدول ۳-۴- خلاصه‌ی مطالعه‌ی آماری برای نرخ گسترش ارتفاع (h<sub>1</sub>) نسبت به زمان

زمان	h <sub>1</sub> واقعی	خطی	خطای نسبی %	چند جمله‌ای توان ۲	خطای نسبی %	چند جمله‌ای توان ۳	خطای نسبی %	چند جمله‌ای توان ۴	خطای نسبی %	لگاریتمیک	خطای نسبی %	پاور	خطای نسبی %
۱	۳۲/۱	۱/۵۳۹۵	۱۶/۶۳٪	۱/۳۸۷۷	۵/۱۳	۱/۲۳	۰	۱/۲۳	۰	۱/۰۹۰۶	۱۷/۳۸	۱/۳۰۷۵	۰/۹۴۷
۳	۲/۲	۲/۰۴۰۷	۷/۲۴	۲/۰۷۹۳	۵/۴۹	۲/۲۰۰۴	۰/۰۱۸۲	۲/۲۰۰۴	۰/۰۱۸۲	۲/۴۵۴۷	۱۱/۵۸	۲/۲۰۵۲	۰/۳۳۶۴
۷	۲/۲	۲/۰۴۲۱	۴/۹	۲/۲۶۰۹	۱/۹	۲/۲۰۵۲	۰/۱۶۲۵	۲/۲۰۵۲	۰/۱۶۲۵	۲/۵۰۶۸	۹/۵۹	۲/۳۰۰۳	۲/۱۳۱۲
۱۴	۴/۷	۴/۷۹۷۳	۹/۷۳	۴/۶۸۱۹	۰/۰۰۴	۴/۷۴۰۳	۰/۸۵۷۴	۴/۷۴۰۳	۰/۸۵۷۴	۴/۳۶۷۵	۷/۰۷	۴/۵۸۹۵	۲/۳۵۱۱
میانگین خطا			۹/۶۲۵		۳/۱۳۱		۰/۲۵۹۵		۰/۲۵۹۵		۱۱/۴۰۵		۱/۶۶۶۴

جدول ۳-۵- خلاصه‌ی مطالعه‌ی آماری برای نرخ گسترش عمق زدگی (h<sub>2</sub>) نسبت به زمان

زمان	h <sub>2</sub> واقعی	خطی	خطای نسبی %	چند جمله‌ای توان ۲	خطای نسبی %	چند جمله‌ای توان ۳	خطای نسبی %	چند جمله‌ای توان ۴	خطای نسبی %	لگاریتمیک	خطای نسبی %	پاور	خطای نسبی %
۱	۱	۱/۴۱۳۹	۴۱/۳۹	۱/۱۳۷۶	۱۳/۷۶	۰/۹۹۹۹	۰/۰۱	۰/۹۹۹۹	۰/۰۱	۱/۰۶۳۱	۶/۳۱	۱/۰۹۷۴	۹/۷۴
۳	۲	۱/۶۸۴۷	۱۵/۷۶۵	۱/۷۵۵۸	۱۲/۱۶	۱/۹۹۸۷	۰/۰۶۵	۱/۹۹۸۷	۰/۰۶۵	۱/۸۸۴۳	۵/۷۹	۱/۷۷۳۹	۱۳/۸۰۵
۷	۲/۵	۲/۲۲۶۳	۱۰/۹۴۸	۲/۶۳۰۴	۵/۲۱۶	۲/۶۸۶۷	۰/۵۲۲	۲/۴۸۶۷	۰/۵۳۲	۲/۵۱۷۵	۰/۷	۲/۴۴۲۲	۲/۲۲۲
۱۴	۳	۲/۱۷۴۱	۵/۸۰۳۳	۲/۹۸۸۸	۰/۳۷۳۳	۲/۹۰۱۸	۲/۷۷۳۳	۲/۹۰۱۸	۲/۷۷۳۳	۲/۰۳۵۵	۱/۱۸۳۳	۲/۲۲۷۴	۸/۲۴۶۷
میانگین خطا			۱۸/۴۷۶۶		۷/۸۷۷۳		۰/۹۷۰۱		۰/۹۷۰۱		۳/۴۹۵۸		۸/۵۲۵۹



جدول ۳-۶- خلاصه‌ی مطالعه‌ی آماری برای نرخ گسترش عرضی در چاه تزریق (۳) نسبت به زمان

زمان	واقعی T <sub>۳</sub>	خطی	% خطای نسبی	چند جمله‌ای توان ۲	% خطای نسبی	چند جمله‌ای توان ۳	% خطای نسبی	چند جمله‌ای توان ۴	% خطای نسبی	انگار بیشمک	% خطای نسبی	پاور	% خطای نسبی
۱	۰/۹	۱/۰۳۸	۱۵/۳۳۳	۰/۹۴۵۸	۵/۰۸۸۹	۰/۹	۰	۰/۹	۰	۰/۷۲۶	۱۹/۳۳۳	۰/۸۸۶۸	۱/۴۶۶۷
۳	۱/۵	۱/۳۹۵	۷	۱/۴۱۶۸	۵/۵۴۶۷	۱/۵۰۰۴	۰/۰۲۶۷	۱/۵۰۰۴	۰/۰۲۶۷	۱/۱۶۹۱۷	۱۲/۷۸	۱/۵۱۲۷	۰/۸۴۶۷
۷	۲/۲	۲/۱۰۹	۴/۱۳۶۴	۲/۲۴۱۸	۱/۹	۲/۲۰۶۸	۰/۳۰۹۱	۲/۲۰۶۸	۰/۳۰۹۱	۲/۴۳۶۴	۱۰/۷۴۵۵	۲/۲۸۲۶	۲/۸
۱۴	۲/۳	۲/۲۵۸۵	۱/۷۷۲۷	۲/۲۸۹۷	۰/۳۱۲۱	۲/۳۵۸۳	۱/۷۶۶۷	۲/۳۵۸۳	۱/۷۶۶۷	۲/۰۴۵۷	۷/۷۰۶۱	۲/۱۹۸۶	۲/۰۷۲۷
میانگین خطا/			۷/۰۶۰۶		۳/۲۱۱۹		۰/۵۲۵۶		۰/۵۲۵۶		۱۲/۶۴۱۲		۲/۲۹۶۵

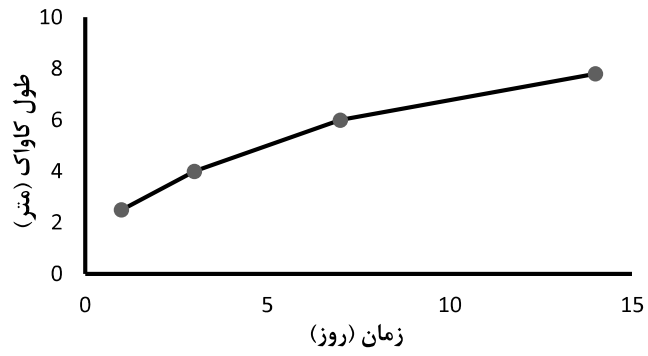
جدول ۳-۷- خلاصه‌ی مطالعه‌ی آماری برای نرخ گسترش در لیک اتصال (۲) نسبت به زمان

زمان	واقعی T <sub>۲</sub>	خطی	% خطای نسبی	چند جمله‌ای توان ۲	% خطای نسبی	چند جمله‌ای توان ۳	% خطای نسبی	چند جمله‌ای توان ۴	% خطای نسبی	انگار بیشمک	% خطای نسبی	پاور	% خطای نسبی
۱	۰/۳	۰/۳۳۱	۱۰/۷	۰/۳۱۴۱	۴/۷	۰/۳۰۰۱	۰/۰۳۳۳	۰/۳۰۰۱	۰/۰۳۳۳	۰/۲۷۸۵	۷/۱۶۶۷	۰/۲۹۶۹	۱/۰۳۳۳
۳	۰/۴۲	۰/۳۹۰۲	۷/۰۷۱۴	۰/۳۹۵۱	۵/۹۲۸۶	۰/۴۲۱۵	۰/۳۵۷۱	۰/۴۲۱۵	۰/۳۵۷۱	۰/۴۳۸۱	۴/۳۰۹۵	۰/۴۱۸۴	۰/۳۸۱
۷	۰/۵۲	۰/۵۰۶۷	۲/۵۵۷۷	۰/۵۳۲۱	۲/۵۱۹۲	۰/۵۳۷۱	۲/۲۸۸۵	۰/۵۳۷۱	۲/۲۸۸۵	۰/۵۶۱۲	۷/۹۲۳۱	۰/۵۴۵۳	۴/۸۴۶۲
۱۴	۰/۷	۰/۷۱۰۴	۱/۴۸۵۷	۰/۶۹۷۶	۰/۳۴۲۹	۰/۸۳۱۸	۱۸/۸۲۸۶	۰/۸۳۱۸	۱۸/۸۲۸۶	۰/۶۶۱۹	۵/۴۴۲۹	۰/۶۷۶۹	۲/۳
میانگین خطا/			۵/۴۵۳۷		۲/۳۲۷۷		۵/۶۲۶۹		۵/۶۲۶۹		۶/۲۱۰۵		۲/۳۹۰۱

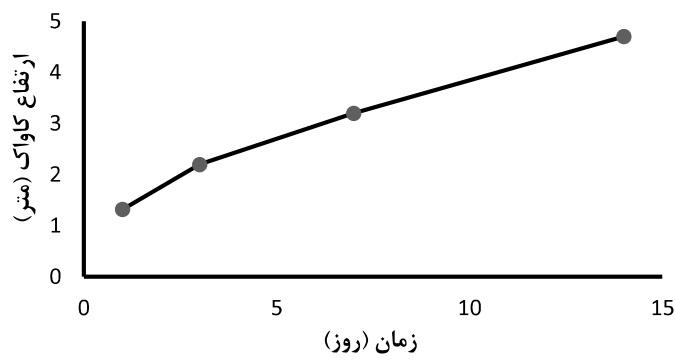
۲

جدول ۳-۸- خلاصه‌ی مطالعه‌ی آماری برای نرخ گسترش در چاه تولید (۱) نسبت به زمان

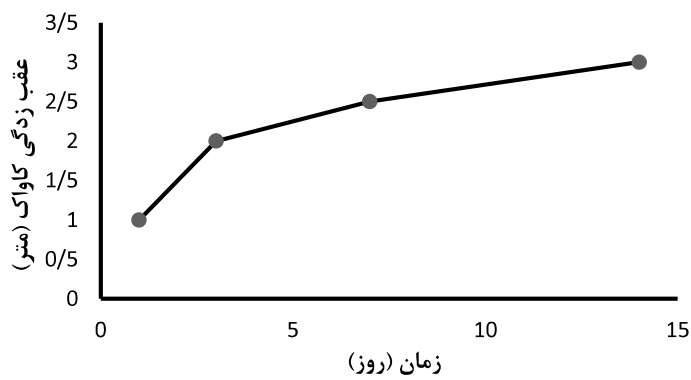
زمان	واقعی T <sub>۱</sub>	خطی	% خطای نسبی	چند جمله‌ای توان ۲	% خطای نسبی	چند جمله‌ای توان ۳	% خطای نسبی	چند جمله‌ای توان ۴	% خطای نسبی	انگار بیشمک	% خطای نسبی	پاور	% خطای نسبی
۱	۰/۳	۰/۳۰۹۷	۴/۸۵	۰/۳۰۵۴	۲/۷	۰/۲	۰	۰/۲	۰	۰/۱۸۵	۷/۵	۰/۱۹۴۱	۲/۹۵
۳	۰/۲۵	۰/۲۳۹۳	۴/۲۸	۰/۲۴۰۸	۲/۶۸	۰/۲۵۰۶	۰/۲۴	۰/۲۵۰۶	۰/۲۴	۰/۲۶۴۲	۵/۶۸	۰/۲۵۶۵	۲/۶
۷	۰/۳	۰/۲۹۸۵	۰/۵	۰/۳۰۶۸	۲/۲۶۶۷	۰/۳۰۸۶	۲/۸۶۶۷	۰/۳۰۸۶	۲/۸۶۶۷	۰/۲۲۵۳	۸/۴۳۳۳	۰/۲۱۸۱	۶/۰۳۳۳
۱۴	۰/۴	۰/۴۰۲۱	۰/۵۲۵	۰/۴۰۶۹	۱/۷۲۵	۰/۴۷۱۷	۱۷/۹۲۵	۰/۴۷۱۷	۱۷/۹۲۵	۰/۳۷۵۳	۶/۱۷۵	۰/۳۷۹۲	۵/۲
میانگین خطا/			۲/۵۳۸۸		۲/۵۹۲۹		۵/۶۵۷۹		۵/۶۵۷۹		۶/۹۴۷۱		۴/۱۹۵۸



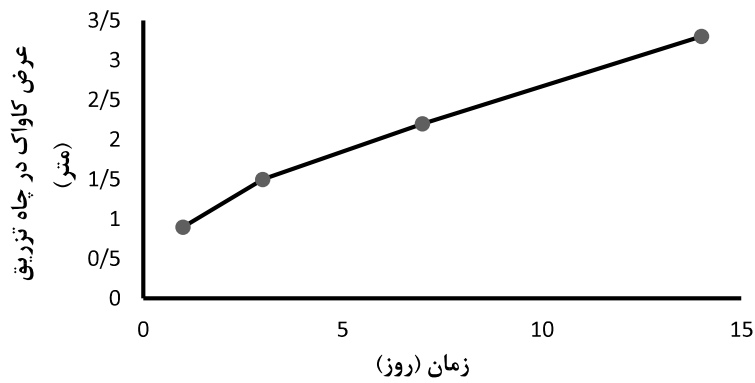
شکل ۳-۲۰- نمودار نرخ گسترش طولی ( $l$ ) نسبت به زمان



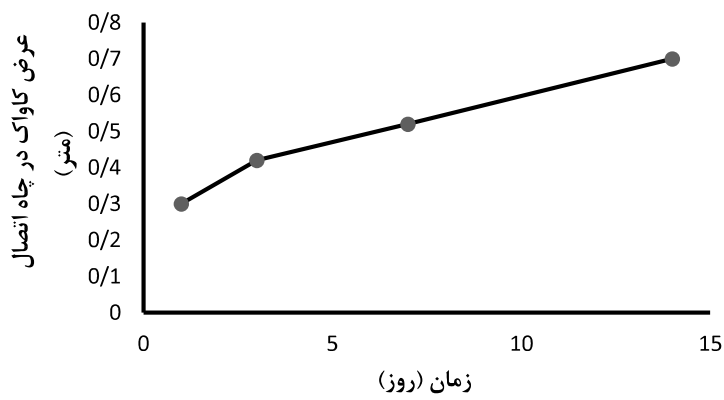
شکل ۳-۲۱- نمودار نرخ گسترش ارتفاع ( $l_h$ ) نسبت به زمان



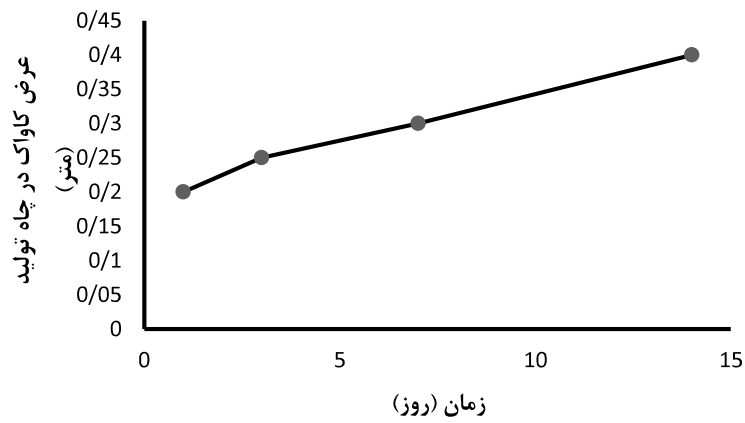
شکل ۳-۲۲- نمودار نرخ گسترش عقب زدگی ( $l_b$ ) نسبت به زمان



شکل ۳-۲۳- نمودار نرخ گسترش عرضی در چاه تزریق ( $r_w$ ) نسبت به زمان



شکل ۳-۲۴- نمودار نرخ گسترش در لینک اتصال ( $r_2$ ) نسبت به زمان



شکل ۳-۲۵- نمودار نرخ گسترش در چاه تولید ( $r_3$ ) نسبت به زمان

در نهایت نرخ گسترش هر یک از ابعاد کاواک با توجه به زمان عملیات به صورت روابط ۳-۳ تا ۳-۸ ارائه شده است.

$$r_h = 0/0022t^3 - 0/0557t^2 + 0/6344t + 0/7391 \quad (۳-۳)$$

$$r_b = 0/0044t^3 - 0/1113t^2 + 0/8874t + 0/2194 \quad (۴-۳)$$

$$r_w = 0/0015t^3 - 0/0371t^2 + 0/4291t + 0/5065 \quad (۵-۳)$$

$$r_2 = 0/2969t^{0/3123} \quad (۶-۳)$$

$$r_3 = 0/0148t + 0/1949 \quad (۷-۳)$$

$$h = 0/0015t^3 - 0/0582t^2 + 0/9634t + 1/5934 \quad (۸-۳)$$

### ۳-۴-۲- تعیین نرخ رشد $r_1$ (شعاع کره)

در این تحقیق برای توجیه نظریه‌ی معرفی شده برای شکل کاواک از ۳ بعد ارتفاع ( $r_h$ )، عقب زدگی ( $r_b$ ) و گسترش عرضی در چاه تزریق ( $r_w$ )، یک مقدار معادل به عنوان شعاع کره در نقطه‌ی شروع احتراق ( $r_1$ ) معرفی شده است. به همین منظور در ادامه با توجه به این که حجم واقعی کاواک مطابق جدول ۳-۹ در دسترس است، با جایگذاری این مقدار در رابطه‌ی ارائه شده برای حجم کاواک (رابطه‌ی ۳-۱)، مقدار  $r_1$  به گونه‌ای به دست آمده است که حداقل خطا را داشته باشد.

جدول ۳-۹- حجم کاواک در زمان‌های مختلف (Daggupati et al., 2011, A)

شماره	زمان گازی شدن (روز)	حجم کاواک (متر مکعب)
۰	۰	۱/۱۴۶
۱	۱	۴/۱۲
۲	۳	۱۵/۸۶
۳	۷	۴۶/۴۸
۴	۱۴	۱۲۴/۵۵

در این قسمت طبق رابطه‌ی ۱-۳، توسط نرم‌افزار لینگو<sup>۱</sup> یک تابع هدف به صورت رابطه‌ی ۹-۳ برای تعیین شعاع کره ارائه شده است.

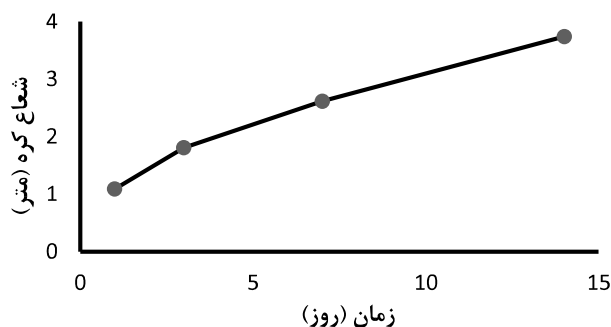
$$V=1.0472*r_1^3+.5236*h*(r_1^2+r_2^2+r_1*r_2)+.5236*(w-h)*(r_2^2+r_3^2+r_2*r_3) \quad (9-3)$$

در ادامه ابتدا با توجه به روابط ۳-۳ تا ۸-۳ و همچنین جدول ۹-۳؛ همه‌ی پارامترهای موجود در این تابع به غیر از  $r_1$  به صورت جدول ۱۰-۳ محاسبه شده است سپس با حل تابع هدف توسط نرم‌افزار، مقدار  $r_1$  در هر مرحله محاسبه شده است. نتایج به دست آمده توسط نرم‌افزار لینگو به صورت خلاصه در جداول ۱۰-۳ ارائه شده است.

جدول ۱۰-۳- نتایج محاسبات مربوط به مقدار  $r_1$  (شعاع کره)

زمان				پارامتر
۱۴ روز	۷ روز	۳ روز	۱ روز	
۰/۶۷۶۹	۰/۵۴۵۲	۰/۴۱۸۴	۰/۲۹۶۹	$r_2$
۰/۴۰۲۱	۰/۲۹۸۵	۰/۲۳۹۳	۰/۲۰۹۷	$r_3$
۷/۷۸۹۸	۵/۹۹۹۹	۴/۰۰۰۳	۲/۵۰۰۱	$h$
۹/۱۰۰۰	۹/۱۰۰۰	۹/۱۰۰۰	۹/۱۰۰۰	$w$
۱۲۴/۵۵۰۰	۴۶/۴۸۰۰	۱۵/۸۶۰۰	۴/۱۲۰۰	$v$
۳/۷۳۸۸	۲/۶۱۴۲	۱/۸۰۷۲	۱/۰۸۹۷	$r_1$

در ادامه برای یافتن رابطه‌ی ای برای نرخ رشد  $r_1$  (شعاع کره) یک مطالعه‌ی آماری همانند مراحل قبل با ۶ تابع مختلف توسعه داده شده است. خلاصه‌ی نتایج این بخش به صورت جدول ۱۱-۳ و نمودار رشد  $r_1$  در شکل ۲۶-۳ نشان داده شده است.



شکل ۲۶-۳- نمودار منحنی رشد  $r_1$  (شعاع کره)

<sup>1</sup>- LINGO 11.0

جدول ۱-۳- توابع تخمین رشد  $T_1$  و مقدار خطای هر تابع

زمان	واقعی $T_1$	خطی	خطای نسبی %	چند جمله‌ای توان ۲	خطای نسبی %	چند جمله‌ای توان ۳	خطای نسبی %	خطای نسبی %	چند جمله‌ای توان ۴	خطای نسبی %	خطای نسبی %	لگاریتمیک	خطای نسبی %	خطای نسبی %	پاور	خطای نسبی %
۱	۱/۰۸۹۶۸۴	۱/۲۸۴۲	۱۷/۸۵۰۷	۱/۱۴۳۱	۴/۹۰۲	۱/۰۸۹۶	۰/۰۰۷۷	۱/۰۸۹۶	۰/۰۰۷۷	۰/۹۳۳۱	۱۵/۲۸۷۴	۱/۰۸۴۶	۰/۳۶۶۶	۱/۰۸۴۶	۰/۳۶۶۶	
۳	۱/۸۰۷۲۰۳	۱/۹۷۶	۷/۲۶	۱/۷۱۱۹	۵/۲۷۳۵	۱/۸۰۶	۰/۰۶۶۶	۱/۸۰۶	۰/۰۶۶۶	۱/۹۹۷۳	۱۰/۵۱۸۹	۱/۸۰۴۲۴۸	۰/۱۶۹	۱/۸۰۴۲۴۸	۰/۱۶۹	
۷	۲/۶۱۴۱۸۷	۲/۴۵۹۶	۵/۹۱۳۴	۲/۶۶۳۳	۱/۸۴۰۵	۲/۶۰۲۸	۰/۴۳۵۶	۲/۶۰۲۸	۰/۴۳۵۶	۲/۸۲۵۸	۸۰۰۹۴۸	۲/۵۷۱۲۷۸	۲/۱۸۳۹	۲/۵۷۱۲۷۸	۲/۱۸۳۹	
۱۴	۲/۷۳۸۸۰۹	۲/۸۳۰۹	۲/۴۶۳۱	۲/۷۲۴۹	۰/۳۷۲	۲/۶۵۸۴	۲/۱۵۰۷	۲/۶۵۸۴	۲/۱۵۰۷	۲/۵۰۳۶	۶/۲۹۱	۲/۶۸۲۶۱۳	۱/۵۰۳	۲/۶۸۲۶۱۳	۱/۵۰۳	
میانگین خطا			۸/۳۷۱۸		۲/۰۹۷		۰/۶۶۵۱		۰/۶۶۵۱		۱۰/۰۴۸		۱/۰۸۰۶		۱/۰۸۰۶	

در نهایت نرخ رشد شعاع کره به صورت رابطه‌ی ۳-۱۰ معرفی شده است. در این رابطه  $t$  زمان بر حسب روز و  $r_1$  شعاع کره بر حسب متر می‌باشد.

$$r_1 = 0/0017t^3 - 0/0452t^2 + 0/5169t + 0/6162 \quad (۳-۱۰)$$

### ۳-۵- توسعه‌ی مدل

روابط ارائه شده در این تحقیق برای استفاده از آن در مقیاس تجاری در صورتی صحیح است که پارامترهای عملیاتی موجود در جدول ۳-۱۲، مشخصات و نفوذپذیری زغال‌سنگ مشابه آزمایش اولیه (آزمایش داگوپاتی و همکاران) باشد. در این صورت نرخ رشد ابعاد کاواک نسبت به زمان به صورت روابط ۳-۵ تا ۳-۸، قابل پیش‌بینی است.

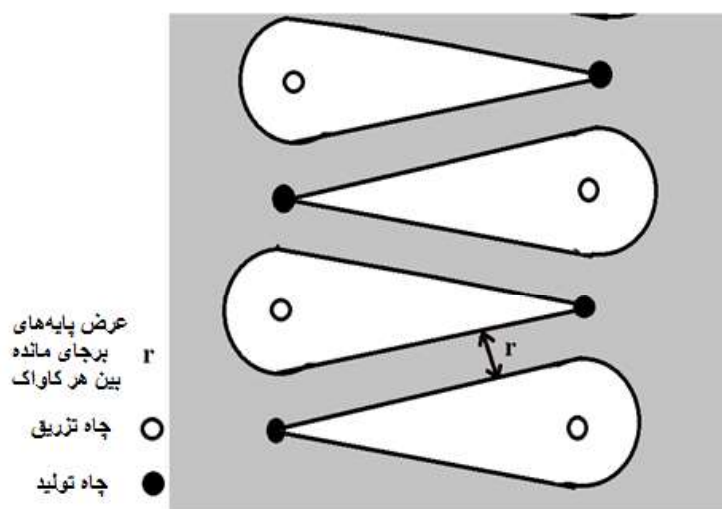
جدول ۳-۱۲- پارامترهای عملیاتی در آزمایش داگوپاتی و همکاران (Daggupati et al., 2011, A)

پارامتر	مقدار
سرعت ورود	4 m/s
سیال ورودی (در دمای ۱۲۷۳ کلوین)	oxygen
دمای کاواک (ثابت)	1273 K
فشار	5 atm

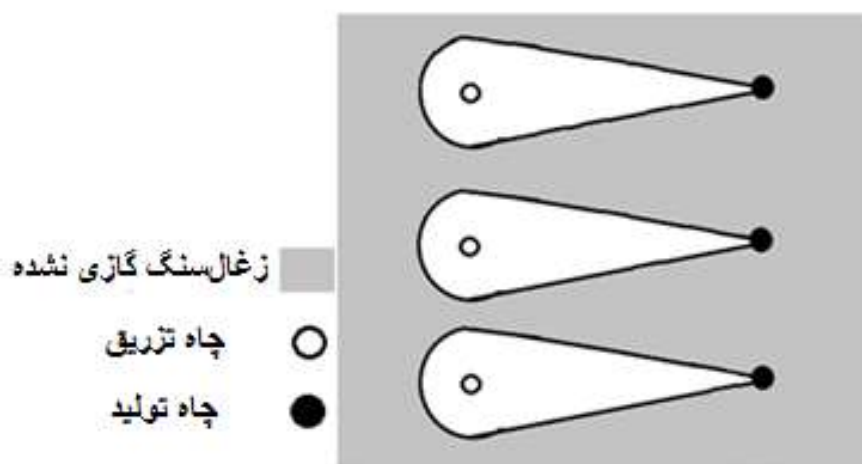
بنابراین برای توسعه‌ی مدل ارائه شده در این تحقیق تحت شرایط مختلف، ابتدا باید نمونه زغال‌سنگ از منطقه‌ی مورد نظر تهیه شود و در آزمایشگاه، فرآیند UCG بر روی این نمونه شبیه‌سازی شود. در مرحله‌ی اول اطلاعات مربوط به رشد ابعاد و حجم کاواک در زمان‌های مختلف مطابق جدول ۳-۲ جمع‌آوری شود سپس سایر مراحل مطابق آنچه در این تحقیق انجام شده است، انجام شود.

برای تجاری‌سازی مدل و تبدیل به گاز کردن حداکثر زغال‌سنگ موجود در منطقه، باید جای چاه‌های تزریق و تولید یک در میان در کارگاه‌های مجاور عوض شود که در این صورت نهایتاً شکل شماتیک کارگاه‌های استخراج موجود در منطقه به صورت شکل ۳-۲۷ خواهد بود. اما اگر این کار انجام نشود همان‌طور که در شکل ۳-۲۸ مشاهده می‌شود مقدار زیادی از زغال‌سنگ بدون استفاده باقی

می ماند.



شکل ۳-۲۷- وضعیت کاواک‌های مجاور با تغییر یک در میان محل چاه‌های تزریق و تولید در روش پیشرو (نما از بالا)



شکل ۳-۲۸- وضعیت کاواک‌های مجاور بدون تغییر محل چاه‌های تزریق و تولید در روش پیشرو (نما از بالا)

### ۳-۶- بررسی حجم کاواک

همانطور که پیشتر ذکر شد شکل کاواک و ابعاد آن به پارامترهای مختلفی بستگی دارد بنابراین ارائه‌ی یک الگوی جامع برای پیش‌بینی ابعاد آن بسیار پیچیده است، اما در مورد حجم کاواک (حجم زغال سنگ سوخته شده) این موضوع متفاوت است. اگر لایه‌ی زغال سنگ، همگن فرض شود یعنی توزیع کربن و سایر عناصر آن یکسان باشد با در دسترس بودن حجم گاز تولیدی و مقدار دقیق کربن موجود در آن می‌توان حجم کاواک را به دست آورد. این مقدار با مقداری که قبل از اجرا کردن مدل



(اجرای فرآیند) به دست آمد، دقیقاً برابر است. علت این امر این است که اکسیدان به همان مقدار محاسبه شده وارد کاواک شده است. در ادامه به کمک نرم افزار COMSOL این مطلب نشان داده شده است.

به طور کلی دو نوع واکنش در فرآیند UCG در حال انجام است، یکی واکنش در فاز همگن و دیگری واکنش در فاز ناهمگن. واکنش‌هایی که در فاز ناهمگن انجام می‌شوند موجب رشد کاواک و در نتیجه افزایش حجم کاواک می‌شوند این واکنش‌ها در دیواره‌های کاواک انجام می‌شوند. مطابق جدول ۳-۱۳، واکنش‌های ۱ تا ۵ در فاز همگن و واکنش‌های ۶ تا ۹ در فاز ناهمگن اتفاق می‌افتد (Perkins and Sahajwalla, 2008).

جدول ۳-۱۳- واکنش‌هایی که در فرآیند UCG اتفاق می‌افتد

واکنش	شماره
$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$	(۱)
$CO + 1/2 O_2 \rightarrow CO_2$	(۲)
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	(۳)
$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$	(۴)
$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3 H_2$	(۵)
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	(۶)
$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	(۷)
$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	(۸)
$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	(۹)

بخشی از اکسیدان تزریقی در فاز همگن و بخشی از آن در فاز ناهمگن مصرف می‌شود اما مقدار دقیق اکسیدان مصرفی در هر فاز مشخص نیست. بنابراین در این قسمت هدف تعیین نرخ تزریق اکسیدان و مقدار کل اکسیدان لازم برای تبدیل به گاز کردن حجم مشخصی از زغال سنگ است. در ادامه این کار توسط نرم افزار COMSOL انجام داده شده است و نرخ تزریق اکسیدان برای تبدیل به گاز کردن کل محفظه مورد نظر (فاز ناهمگن) با تاثیر فاز همگن به دست آمده است.

همان‌طور که گفته شد، با شروع فرآیند گازی کردن ممکن است شکل کاواک به دلیل تاثیر پارامترهای زیادی که بحث شد، دقیقاً طبق طراحی و پیش‌بینی‌های انجام شده نباشد اما در مدل ارائه

شده در این بخش، مقدار اکسیدان مورد نیاز برای گازی کردن مقدار مشخصی از زغال سنگ با تاثیر هر دو فاز همگن و ناهمگن و با اعتماد به ماژول شیمی نرم افزار COMSOL برآورد می شود. بنابراین می توان گفت که اگر نرخ و میزان تزریق اکسیدان به میزان محاسبه شده در این مدل باشد، بعد از اجرای فرآیند UCG مقدار زغال سنگ تبدیل به گاز شده با مقدار اولیه (مرحله ی طراحی) دقیقا برابر است. در ادامه این موضوع با شبیه سازی عددی فرآیند، نشان داده شده است.

گام اول برای توسعه ی این مدل تخمین یک حجم اولیه برای کاواک است (تعیین پهناهای استخراجی). در ادامه از روابط به دست آمده در بخش قبل برای تعیین یک حجم اولیه برای کاواک استفاده شده است. اما به دست آوردن حجم پهناهای استخراجی با توجه به هندسه لایه زغال سنگ، تجربیات گذشته و یا سایر روش هایی که توسط محققین دیگر ارائه شده است (از جمله نجفی، ۱۳۹۳) امکان پذیر است. یعنی می توان این بخش از تحقیق را به طور جداگانه و بدون استفاده از بخش قبل در نظر گرفت. لازم به ذکر است که اگر از روابط به دست آمده از بخش قبل استفاده شود باید سایر پارامترهای عملیاتی هم مطابق جدول ۳-۱۲ و آنچه که در بخش ۳-۵ برای توسعه ی مدل گفته شود، تعیین شود.

### ۳-۶-۱- محاسبه ی حجم و زمان عملیات

با توجه به گسترش طولی و عرضی و ضخامت لایه ی زغال و همچنین طراحی هایی که برای طول و پهناهای برجای مانده بین دو کارگاه با توجه به تجربه های گذشته، از قبل طراحی شده است ابتدا مقدار  $I_1$  انتخاب شده، سپس زمان و سایر ابعاد کاواک با توجه به فرمول های مربوطه محاسبه شده است. لازم به ذکر است که مقدار  $I_1$  هرچقدر بیشتر باشد، گسترش عرضی کاواک بیشتر می شود و در نتیجه تعداد کارگاه های موجود در منطقه کمتر می شود. در این بخش فرض شد که  $I_1$  برابر با ضخامت رگه زغال باشد. همان طور که گفته شد اگر  $I_1$  بیشتر از ضخامت لایه باشد مقداری از حجم کاواک به صورت مجازی در سنگ های در برگیرنده تشکیل می شود که باید این حجم را از حجم کل

زغال موجود در محفظه، کم کرد. اگر  $r_1$  کمتر از ضخامت لایه زغال سنگ باشد مقداری از زغال موجود در منطقه به گاز تبدیل نمی شود و در کاواک بدون استفاده می ماند. طول کارگاه را می توان پس از به دست آوردن گسترش عرضی و متناسب با گسترش طولی انتخاب کرد.

ضخامت لایه ی زغال سنگ ۲۰ متر ( $r_1=20$  m) و طول کارگاه (w) ۱۰۰ متر فرض شده است. در این صورت با توجه به معادلات به دست آمده برای نرخ رشد ابعاد کاواک محاسبات زیر انجام شده است.

$$r_1 = 0/0017t^3 - 0/0452t^2 + 0/5169t + 0/6162=20 \rightarrow t=29.42 \text{ days}$$

$$r_2 = 0/2969t^{0/3123}=85$$

$$r_3=0/0148t + 0/1949=.63$$

$$h=0/0015t^3 - 0/0582t^2 + 0/9634t + 1/5934=17.76$$

اگر  $W=100$ m باشد در این صورت حجم کاواک ( $V_t$ ) با توجه به رابطه ی ۳-۱،  $12335/4890$  متر مکعب به دست آمده است.

### ۳-۶-۲- محاسبه ی پارامترهای ورودی نرم افزار

با توجه به مقدار و نوع مواد موجود در زغال سنگ و با داشتن حجم و زمان عملیات که از مرحله قبل محاسبه شد، دبی ورودی اکسیدان را می توان محاسبه کرد. پس از آن میزان گاز تولیدی و دبی خروجی گاز سنتزی و متناسب با آنها قطر چاه های تزریق و تولید محاسبه می شود. در این مدل یک راکتور (semibatch) در نرم افزار COMSOL طراحی شده است. در ادامه پارامترهای ورودی این راکتور شامل مشخصات زغال سنگ و مقدار اجزای موجود در هر کارگاه، واکنش های شیمیایی و سنتیک آنها، دما، فشار و سایر پارامترهای استفاده شده در این شبیه سازی محاسبه شده است.

فرض کنید مشخصات زغال سنگ به صورت جدول های ۳-۱۴ و ۳-۱۵ باشد.

جدول ۳-۱۴- مشخصات فرضی زغال سنگ

کربن ثابت <sup>۴</sup> (درصد وزنی)	رطوبت محتوی <sup>۳</sup> (درصد وزنی)	خاکستر <sup>۲</sup> (درصد وزنی)	مواد فرار <sup>۱</sup> (درصد وزنی)	چگالی (تن بر متر مکعب)
۳۸/۳	۷	۲۴/۳	۳۰/۴	۱/۴

جدول ۳-۱۵- مشخصات فرضی مواد فرار زغال سنگ

CH4 (درصد وزنی)	CO2 (درصد وزنی)	CO (درصد وزنی)	NH3, CL, N2O, SO2 and other (درصد وزنی)
۱۰	۸/۴	۷	۵

مقدار مواد موجود در محفظه کاواک شامل C، H<sub>2</sub>O، CH<sub>4</sub>، CO<sub>2</sub> و CO به صورت جدول ۳-۱۶ محاسبه شده است. جزئیات محاسبات مربوط به این قسمت در پیوست ۲ آورده شده است.

جدول ۳-۱۶- مقدار عناصر موجود در کاواک در این مثال

مقدار (میلیون مول)	نماد	نام
۵۵۰/۶۸۶۰	C	کربن
۶۷/۱۰۳۰	H <sub>2</sub> O	بخار آب
۱۰۷/۶۴۵۰	CH <sub>4</sub>	متان
۳۲/۹۶۲۳	CO <sub>2</sub>	دی اکسید کربن
۴۳/۱۵۸۳	CO	منو اکسید کربن

۹ واکنش اصلی که قبل تر ذکر شد و سنتیک واکنش ها به صورت جدول های ۳-۱۷ و ۳-۱۸ برای شبیه سازی فرآیند، در نظر گرفته شده است.

جدول ۳-۱۷- پارامترهای سنتیکی واکنش های شیمیایی همگن (Perkins and Sahajwalla, 2008)

واکنش k	معادله سرعت واکنش	A <sub>k</sub>	α <sub>k</sub>	E <sub>k</sub>
۱	$K_{f,1} [H_2]^{1/4} [O_2]^{2/3}$	$۲/۵۰ \times ۱۰^{+۱۸}$	-۱/۰	۱۶۷/۴
۲	$K_{f,2} [CO] [O_2]^{1/4}$	$۳/۹۸ \times ۱۰^{+۱۹}$	۰/۰	۱۶۷/۴
۳	$K_{f,3} [CH_4]^{1/2} [O_2]^{5/4}$	$۴/۴۰ \times ۱۰^{+۱۵}$	۰/۰	۱۲۵/۵
۴	$K_{f,4} [CO] [H_2O]$	$۲/۷۸ \times ۱۰^{+۱}$	۰/۰	۱۲/۶
۵	$K_{f,5} [CH_4] [H_2O]$	$۳/۱۲ \times ۱۰^{+۱}$	۰/۰	۳۰/۰

1-Volatile matter

2- Ash

3- Moisture

4- Fixed carbon

در جدول ۳-۱۷ ضریب معادله‌ی سرعت هر واکنش به صورت رابطه‌ی ۳-۱۱ تعیین می‌شود (Perkins and Sahajwalla, 2008).

$$k_{f,k} = A_k T^{\alpha_k} \exp(-E_k/RT) \quad (3-11)$$

جدول ۳-۱۸- پارامترهای سنتیکی واکنش‌های شیمیایی ناهمگن (Perkins and Sahajwalla, 2008)

واکنش k	n	A <sub>k</sub>	α <sub>k</sub>	E <sub>k</sub>
۶	۱/۰	$۲/۵۰۳ \times ۱۰^{+۱۷}$	۱/۰	۱۷۹/۴
۷	۰/۵	$۸/۵۹۳ \times ۱۰^{+۲}$	۰/۵	۲۳۱/۰
۸	۰/۵	$۸/۵۹۳ \times ۱۰^{-۱}$	۰/۵	۲۱۱/۰
۹	۱/۰	$۲/۳۳۷ \times ۱۰^{-۶}$	۱/۰	۱۵۰/۰

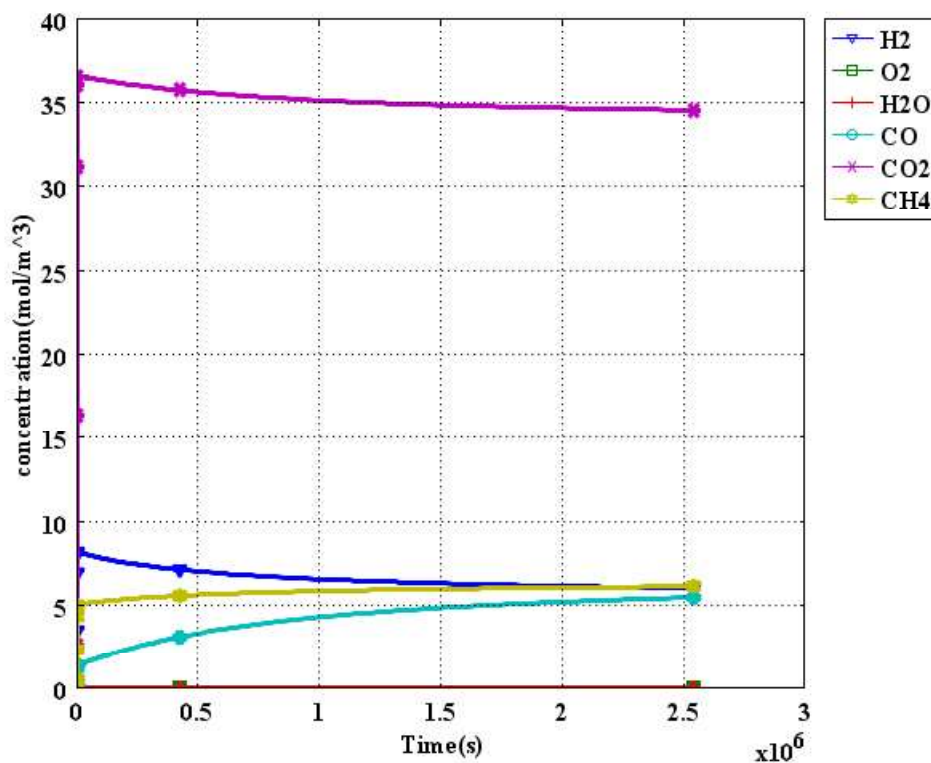
در این مدل، فشار و دمای درون کاواک ثابت فرض شده است. پارامترهای ورودی نرم افزار به صورت جدول ۳-۱۹ در نرم افزار COMSOL در نظر گرفته شده است.

جدول ۳-۱۹- پارامترهای ورودی نرم افزار COMSOL

پارامتر ورودی	مقدار
دما (k)	۱۲۷۳
فشار (kpa)	۵۰۶/۶۲۵
ثابت گازها (J/mol.k)	۸/۳۱۴۴۱
نرخ تزریق اکسیژن (mol/s)	؟
زمان عملیات (s)	$۲/۵۴۲۳ \times ۱۰^{+۶}$

### ۳-۶-۳- نتیجه‌ی اجرای مدل

در ادامه با وارد کردن اطلاعات به دست آمده در نرم‌افزار COMSOL، نرخ تزریق اکسیدان با سعی و خطا تا جایی افزایش داده شد که همه‌ی زغال (کربن) موجود در محفظه به گاز تبدیل شود. مقدار آن پس از اجرا کردن مدل،  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  به دست آمده است. در نهایت مقدار و اجزای گاز تولیدی در شکل ۳-۲۹ و جدول ۳-۲۰ به دست آمده است.



شکل ۳-۲۹- نمودار اجزاء و مقدار گاز تولیدی پس از اجرای مدل

جدول ۳-۲۰- مقدار و اجزای گاز تولیدی (در دمای ۱۲۷۳ کلوین و فشار ۵۰۶ کیلوپاسکال)

مقدار (میلیون متر مکعب)	گاز تولیدی
۱۱/۱۴۸	CO <sub>2</sub>
۱/۹۴۳	H <sub>2</sub>
۱/۹۷۸	CH <sub>4</sub>
۱/۷۶۷	CO
۱۶/۸۳۶	کل گاز تولیدی

طبق موازنه جرم در این مثال مقدار کل کربن موجود در محفظه قبل از عملیات که به صورت جامد در زغال سنگ بوده و پس از عملیات که به صورت گاز سنتزی بوده برابر بوده و مقدار آن ۷۳۴/۴۳ میلیون مول است. این مطلب نشان می دهد که حجم کاواک بعد از اجرای فرآیند گازی کردن با مقدار آن قبل از فرآیند (مقدار محاسبه شده در مرحله ی طراحی) با هم برابر است.

با توجه به کل حجم گاز تولیدی و زمان کل عملیات، اگر فرض شود دبی خروجی در طول عملیات همواره ثابت است این مقدار مطابق رابطه ی ۳-۱۲، ۶/۶۲ متر مکعب بر ثانیه به دست آمده است.

$$Q_{out} = \frac{V_t}{T} \quad (3-12)$$

در این رابطه  $Q_{out}$  دبی خروجی،  $V_t$  و  $T$  به ترتیب حجم کل گاز تولیدی و زمان کل عملیات هستند.

### ۳-۷- جمع بندی و نتیجه گیری

برای اجرای موفق فرآیند گازی کردن زیرزمینی زغال سنگ در مقیاس تجاری به دلیل عدم دسترسی مستقیم به زیر زمین به اطلاعات دقیقی نیاز است. در این بخش بسیاری از اطلاعات مورد نیاز، از پژوهش‌ها و آزمایشات دیگران گرفته شد و به بررسی شکل و حجم کاواک پرداخته شد. شکل کاواک به پارامترهای زیادی وابسته است که از جمله مهمترین آن‌ها روش گازی کردن، سرعت تزریق اکسیدان و جنس زغال سنگ است. با توجه به شکل کاواک در کار دیگران و اطلاعات موجود، یک سری رابطه برای پیش‌بینی رشد ابعاد کاواک نسبت به زمان معرفی شد که البته این الگو جامع نیست زیرا مختص یک سری شرایط خاص است. بنابراین برای توسعه‌ی مدل و اجرای فرآیند UCG در هر منطقه، مراحل باید به ترتیب آنچه در این بخش گفته شده است انجام شود. پیش‌بینی دقیق شکل کاواک برای کنترل بهینه‌ی فرآیند تبدیل به گاز کردن، طراحی ابعاد و لنگه‌های برجای مانده در کارگاه‌های مجاور (و جلوگیری از نشست گاز به کارگاه مجاور)، پیش‌بینی تعداد کارگاه مورد نیاز برای گازی کردن حداکثر زغال سنگ موجود در منطقه، مکان دقیق هر یک از چاه‌های تولید و تزریق، میزان نشست زمین و ... ضروری است.

در ادامه برای بررسی حجم کاواک یک مدل توسط نرم افزار COMSOL طراحی شد. در این بخش مقدار اکسیدان لازم برای گازی شدن مقدار مشخصی از زغال سنگ (فاز ناهمگن) با وجود تاثیر فاز همگن بررسی شد. این مدل نشان می‌دهد که حجم کاواک قبل و بعد از اجرای مدل یکسان است زیرا اکسیدان به مقدار مورد نیاز وارد کاواک می‌شود.

بنابراین در مدل ارائه شده پیش‌بینی شکل کاواک به دلیل پارامترهای گسترده‌ای که در

شکل‌گیری آن دخیل است محدود به یک سری شرایط خاص است و برای هر منطقه مطالعات آزمایشگاهی و سایر مراحل مانند آنچه در این تحقیق ذکر شده است انجام شود. اما حجم کاواک پیش از شروع فرآیند گازی کردن، با توجه به پارامترهای عملیاتی طراحی شده، به طور دقیق قابل پیش‌بینی است.





فصل چهارم: مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی؛ اعتبار نسبی مدل

## ۴-۱- مقدمه

مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی مهمترین هدف در عملیات UCG می‌باشد. در این فصل با شبیه‌سازی فرآیند UCG توسط نرم افزار COMSOL، یک مدل CFD برای پیش‌بینی مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی با توجه به پارامترهای عملیاتی، توسعه داده شده است. با ارائه‌ی یک مدل CFD برای تبدیل به گاز کردن هر کارگاه استخراج، اولاً کنترل بهینه‌ی پارامترهای فنی (مانند نرخ تزریق، فشار کاواک، زمان عملیات و...) در عملیات امکان‌پذیر می‌شود، ثانیاً امکان انجام تحلیل‌های اقتصادی با توجه به اکسیدان مصرفی، مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی، در مقیاس تجاری میسر می‌شود. در ادامه مراحل ساخت این مدل به ترتیب بیان شده است.

## ۴-۲- تعیین حجم پهنه‌های استخراجی

برای درک بهتر شبیه‌سازی انجام شده در این بخش مدل با یک مثال عددی معرفی شده است. فرض کنید برای گازی کردن یک لایه زغال سنگ، روش CRIP دو کاناله انتخاب شده باشد. با توجه به ضخامت، گسترش عرضی و طولی این لایه، تحلیل‌های زمین شناسی و تجربیات گذشته، فاصله‌ی چاه‌های تزریق و تولید ۱۰ متر و فاصله این دو تا چاه آتش ۲۰۰ متر در نظر گرفته شده است. شکل فرضی منطقه به صورت شکل ۴-۱ خواهد بود. فرض کنید ضخامت لایه زغال ۳ متر باشد.



- چاه تزریق
- چاه تولید
- ⊗ چاه آتش

شکل ۴-۱- شکل فرضی منطقه در روش CRIP دو کاناله (نما از بالا)

گام اول برای شبیه‌سازی فرآیند، تخمین حجم فضای استخراج با توجه به ضخامت لایه زغال سنگ، ابعاد کارگاه استخراج و تجربیات گذشته می‌باشد. با توجه به شکل ۴-۱ فرض کنید حجم

کل کاواک ۷۹۴۲ متر مکعب باشد. در این تحقیق فشار و دمای کاواک ثابت فرض شده است. سوختن در دمای ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی گراد اتفاق می افتد اما ممکن است به بیش از ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد هم برسد (Laciak et al., 2016). در این تحقیق دما مقدار ثابت ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد (۱۲۷۳ کلوین) فرض شده است.

### ۳-۴- مشخصات زغال سنگ

با توجه به حجم پهنه (که در بخش قبل مشخص شد) و اطلاعات اکتشافی لایه‌ی زغال سنگ می توان مقدار مواد موجود در کاواک را به طور جداگانه بررسی کرد. در حالت کلی فرض شده است که لایه‌ی زغال سنگ یکنواخت و بدون درزه و شکاف باشد. فرض کنید که مشخصات زغال سنگ به صورت جدول های ۱-۴ و ۲-۴ باشد.

جدول ۱-۴- مشخصات فرضی زغال سنگ

کربن ثابت (درصد وزنی)	رطوبت محتوی (درصد وزنی)	خاکستر (درصد وزنی)	مواد فرار (درصد وزنی)	چگالی (تن بر متر مکعب)
۳۸/۳	۷	۲۴/۳	۳۰/۴	۱/۴

جدول ۲-۴- مشخصات فرضی مواد فرار زغال سنگ

CH4 (درصد وزنی)	CO2 (درصد وزنی)	CO (درصد وزنی)	NH3, CL, N2O, SO2 and other (درصد وزنی)
۱۰	۸/۴	۷	۵

در ادامه با استفاده از وزن مولکولی هر یک از اجزای درون کاواک و به کارگیری روابط استوکیومتری، مقدار مول مواد موجود در کاواک به صورت جدول ۳-۴ به دست آمده است (محاسبات مشابه پیوست ۲).

جدول ۳-۴- مقدار مول مواد موجود در کاواک در این مثال

نام	نماد	مقدار (میلیون مول)
کربن	C	۳۵۴/۵۵۶
بخار آب	H <sub>2</sub> O	۴۳/۲۰۴
متان	CH <sub>4</sub>	۶۹/۳۰۷
کربن منو اکسید	CO	۲۷/۷۸۷
کربن دی اکسید	CO <sub>2</sub>	۲۱/۲۲۳

سایر اجزای مواد فرار به مقدار ناچیز وجود دارند و در ۹ واکنش اصلی که در کاواک اتفاق

می‌افتند تاثیری ندارند.

## ۴-۴- بررسی واکنش‌های شیمیایی

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد طبق گزارشات موجود واکنش‌های شیمیایی که در طول فرآیند گازی شدن اتفاق می‌افتند در دو فاز همگن و ناهمگن انجام می‌شود. در ادامه واکنش‌های انجام شده در هر یک از دو فاز به طور جداگانه بررسی شده است. واکنش‌هایی که در فاز همگن اتفاق می‌افتند به شرح جدول ۴-۴ هستند.

جدول ۴-۴- واکنش‌های فاز همگن در حالت کلی (Perkins and Sahajwalla, 2008)

شماره	واکنش
(۱)	$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$
(۲)	$CO + 1/2 O_2 \rightarrow CO_2$
(۳)	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$
(۴)	$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$
(۵)	$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3 H_2$

همان‌طور که مشاهده می‌شود واکنش‌های ۴ و ۵ دو طرفه هستند. در این تحقیق واکنش‌ها در فشار کم و دمای بالا فرض شده است. بنابراین با توجه به این فرض طبق تحقیق Wiatowski و همکاران (۲۰۱۶)، واکنش ۴ و ۵ در جهت رفت رخ می‌دهد (Wiatowski et al., 2016). بنابراین بازنویسی معادلات به صورت جدول ۴-۵ انجام شده است.

جدول ۴-۵- واکنش‌های فاز همگن در این تحقیق

شماره	واکنش
(۱)	$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$
(۲)	$CO + 1/2 O_2 \rightarrow CO_2$
(۳)	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$
(۴)	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$
(۵)	$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3 H_2$

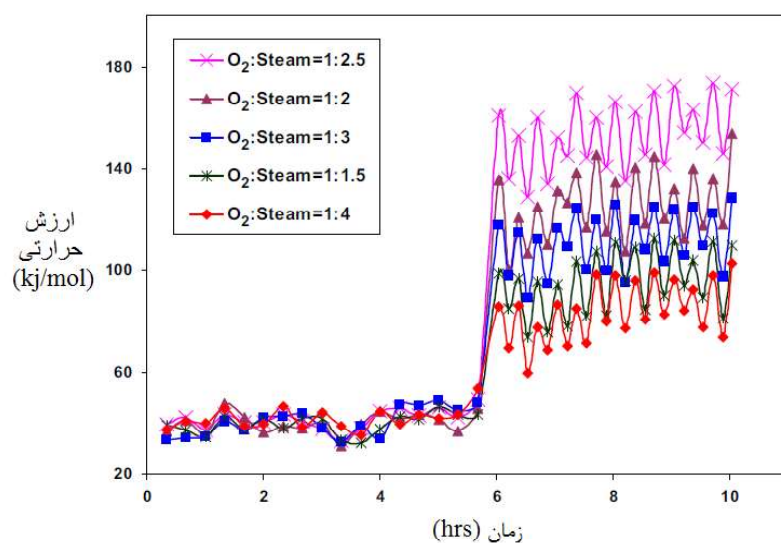
این گازها در فاز همگن درون کاواک مرتباً با یکدیگر برخورد می‌کنند و واکنش می‌دهند هر

یک از انواع گازها دائماً در حال تولید و مصرف هستند بنابراین به صورت تئوری نمی‌توان مقدار هر یک را در یک لحظه‌ی خاص بیان کرد. در ادامه این موضوع به کمک نرم‌افزار COMSOL تحقیق شده است. واکنش‌های ناهمگن که موجب رشد کاواک می‌شوند به شرح جدول ۴-۶ هستند.

جدول ۴-۶- واکنش‌های فاز ناهمگن در فرآیند UCG (Perkins and Sahajwalla, 2008)

شماره	واکنش
(۶)	$C+O_2 \rightarrow CO_2$
(۷)	$C+H_2O \rightarrow CO+H_2$
(۸)	$C+CO_2 \rightarrow 2CO$
(۹)	$C+2H_2 \rightarrow CH_4$

در فرآیند UCG با توجه به هدف مورد نظر، پارامترهای عملیاتی طراحی می‌شود. همانطور که قبلاً ذکر شد، هدف می‌تواند تولید گاز سنتزی، تولید هیدروژن، تولید متان و یا تولید سایر گازهای موجود در زغال سنگ باشد. در این بخش فرض شده است که هدف ما تولید گاز سنتزی با بیشترین ارزش حرارتی باشد. طبق منحنی صورتی رنگ در شکل ۴-۲ که بیشترین ارزش حرارتی را نشان می‌دهد، برای داشتن گاز سنتزی با بیشترین ارزش حرارتی، نسبت بخار آب ( $H_2O$ ) به اکسیژن ( $O_2$ ) باید ۲/۵ به ۱ باشد.



شکل ۴-۲- نمودار نسبت بهینه بخار آب به اکسیژن بر ارزش حرارتی گاز تولیدی (Daggupati et al., 2011, B)

بنابراین معادله‌ی ۷ در ۲/۵ ضرب شد تا این نسبت برقرار شود. بازنویسی معادلات رشد کاواک با توجه

به نسبت ذکر شده در جدول ۷-۴ آمده است.

جدول ۷-۴- بازنویسی واکنش‌های شیمیایی در فاز ناهمگن با اعمال ضرایب

شماره	واکنش	آنتالپی (Kj/mol)
۱	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$H = -393\Delta$
۲	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	$\Delta H = +172$
۳	$2.5C + 2.5H_2O \rightarrow 2.5CO + 2.5H_2$	$H = +131 \times 2.5\Delta$
۴	$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	$H = -75\Delta$

اکنون با استفاده از قانون هس در علم شیمیایی (Ball D. W., 2011)، ۴ واکنش موجود در جدول ۷-۴ با هم جمع شده که نهایتاً فرمول و آنتالپی مربوطه به صورت رابطه ۱-۴ به دست آمده است.



#### ۴-۵- محاسبه پارامترهای عملیاتی

با توجه به این که مقدار کل کربن (C) موجود در محفظه محاسبه شد و با توجه به رابطه‌ی به دست آمده (رابطه‌ی ۱-۴) با اعمال ضرایب استوکیومتری می‌توان مقدار مول مصرفی اکسیژن و بخار آب در فاز ناهمگن و همچنین کربن منواکسید، هیدروژن و متان تولیدی در این فاز را محاسبه کرد.

بنابراین مقدار مول  $H_2O$  و  $O_2$  محاسبه شده و نتیجه در جدول ۸-۴ به دست آمده است. ضمناً چون مقداری از  $H_2O$  تزریقی مورد نیاز در خود زغال سنگ با عنوان رطوبت محتوا وجود دارد پس این مقدار از مقدار مورد نیاز کم شده است.

جدول ۸-۴- مقدار  $H_2O$  و  $O_2$  لازم برای فاز ناهمگن

مقدار (میلیون مول)	اکسیدان
۶۴/۴۶۵	اکسیژن ( $O_2$ )
۱۱۷/۹۵۸	بخار آب ( $H_2O$ )

در این مدل برای انتخاب زمان کل عملیات و دبی تزریقی اختیار داریم، اما بهتر است ابتدا با توجه به قطر لوله و سرعت حرکت سیال در لوله، دبی تزریقی محاسبه شود سپس زمان کل عملیات

محاسبه شود. دبی تزریق و چگالی گاز طبق روابط ۲-۴ و ۳-۴ محاسبه می‌شود (Ball D. W., 2011).

$$Q = V \cdot A \quad (2-4)$$

در رابطه‌ی ۲-۴،  $Q$ ،  $V$  و  $A$  به ترتیب دبی تزریقی بر حسب متر مکعب بر ثانیه، سرعت حرکت سیال بر حسب متر بر ثانیه و مساحت دهانه‌ی لوله تزریق بر حسب متر مربع می‌باشد.

$$\rho_{in} = \frac{N \times P}{R \times T} \quad (3-4)$$

در رابطه‌ی ۳-۴،  $\rho_{in}$  چگالی گاز بر حسب مول بر متر مکعب و  $N$ ،  $P$ ،  $T$  و  $R$  به ترتیب تعداد مول گاز، فشار بر حسب پاسکال، دما بر حسب کلوین و ثابت گازها (۸/۳۱۴) هستند.

در این مثال فرض شد قطر لوله تزریق ۲۰ سانتی‌متر و سرعت حرکت سیال در لوله ۱/۳۴ متر بر ثانیه  $m/s$  باشد. در این صورت دبی تزریقی اکسیژن طبق رابطه‌ی ۲-۴،  $4/22 \times 10^{-2}$  متر مکعب بر ثانیه به دست آمده است. همچنین فرض شد که دما و فشار مخزن گاز ورودی به ترتیب ۵۰۰ کلوین و ۱ مگاپاسکال باشد. بنابراین چگالی گاز ورودی طبق رابطه‌ی ۳-۴،  $240/55$  مول بر متر مکعب به دست آمده است.

دبی مولی تزریق اکسیژن طبق رابطه‌ی ۴-۴،  $10/17$  مول بر ثانیه و زمان کل عملیات طبق رابطه‌ی ۵-۴،  $6/33 \times 10^6$  ثانیه به دست آمده است.

$$Q'_{O_2} = Q_{O_2} \times \rho \quad (4-4)$$

در این رابطه  $Q'_{O_2}$  دبی مولی تزریق اکسیژن بر حسب مول بر ثانیه است.

$$T_t = \frac{mol_{O_2}}{Q'_{O_2}} \quad (5-4)$$

در این رابطه  $mol_{O_2}$  مقدار مول اکسیژن که در جدول ۴-۸ به دست آمد و  $T_t$  زمان کل عملیات بر حسب ثانیه است.

برای محاسبه‌ی دبی تزریقی  $H_2O$ ، مقدار  $mol_{H_2O}$  (با توجه به جدول ۴-۸) و زمان کلی عملیات ( $T_t$  (طبق رابطه‌ی ۵-۴) به دست آمده است. بنابراین مطابق رابطه‌ی ۶-۴، دبی مولی تزریق بخار آب به راحتی محاسبه می‌شود.



$$Q'_{H_2O} = \frac{mol_{H_2O}}{T_t} \quad (6-4)$$

در این رابطه  $mol_{H_2O}$  مقدار مول بخار آب که در جدول (۴-۸) به دست آمد و  $Q'_{H_2O}$  دبی تزریق بخار آب بر حسب مول بر ثانیه است.

محاسبات مربوط به این بخش، محاسبات مورد نیاز و داده‌های اولیه مورد نیاز برای ساختن مدل هستند.

## ۴-۶- شبیه‌سازی در نرم افزار COMSOL

پارامترهای ورودی نرم افزار COMSOL با توجه به مراحل قبل و سایر فرضیات برای ساده سازی مسئله در جدول ۴-۹ آورده شده است.

جدول ۴-۹- پارامترهای ورودی نرم افزار

مقدار	پارامتر ورودی نرم افزار
۱۲۷۳	دما (k)
۱	فشار (Mpa)
۸/۳۱۴۴۱	ثابت گازها (J/mol.k)
۱۰/۱۷۵	نرخ تزریق اکسیژن (mol/s)
۱۸/۶۱۷	نرخ تزریق بخار آب (mol/s)
$۶/۳۳۶ \times ۱۰^۶$	زمان عملیات (s)

اکنون با توجه به ثابت بودن دما و فشار درون کاواک (به ترتیب ۱۲۷۳ کلوین و ۱ مگاپا سکا) چگالی گاز درون کاواک طبق رابطه ۴-۳،  $۹۴/۴۸$  مول بر متر مکعب به دست آمده است. طبق قانون گاز کامل در علم شیمی، در دما و فشار ثابت هر مول از گازهای مختلف حجم یکسانی دارند (روح‌الهی و همکاران، ۱۳۹۵)، بنابراین چگالی گاز درون کاواک همواره ثابت است. در ادامه ۹ واکنش اصلی که قبل تر ذکر شد، در ماژول شیمی نرم افزار وارد شد و سنتیک واکنش هم به صورت جدول‌های ۳-۱۷ و ۳-۱۸ وارد شدند. نوع راکتور Semibatch انتخاب شده و حجم اولیه یعنی حجم لینک اتصالی،  $۱۴/۱۴$  متر مکعب انتخاب شده است.

## ۴-۶-۱- نتایج اجرای مدل

همه‌ی اطلاعاتی که در مراحل قبل محاسبه شد به همراه ۹ واکنش اصلی، سنتیک واکنش و ویژگی‌های عناصر شرکت کننده در واکنش، در نرم‌افزار COMSOL وارد شدند (شکل‌های ۳-۴ و ۴-۴). پس از اجرای مدل در نرم‌افزار نتایج به صورت نمودار شکل ۴-۵ و جدول ۴-۱۰ به دست آمده است.

**Model Settings**

Equations

$$d(V_f \mathbf{c})/dt = v_f \mathbf{c}_f + V_f \mathbf{R}, \quad \mathbf{c} = \text{concentration vector}$$

$$dV_f/dt = v_p + \sum v_{f,i}$$

$v_f$  = volumetric feed rate,  $T_f$  = feed stream temperature

$$\mathbf{R} = \mathbf{S}^T \mathbf{r}, \quad \mathbf{S} = \text{stoichiometric matrix}$$

Reactor type: **Semibatch**

Reacting fluid: **Gas**

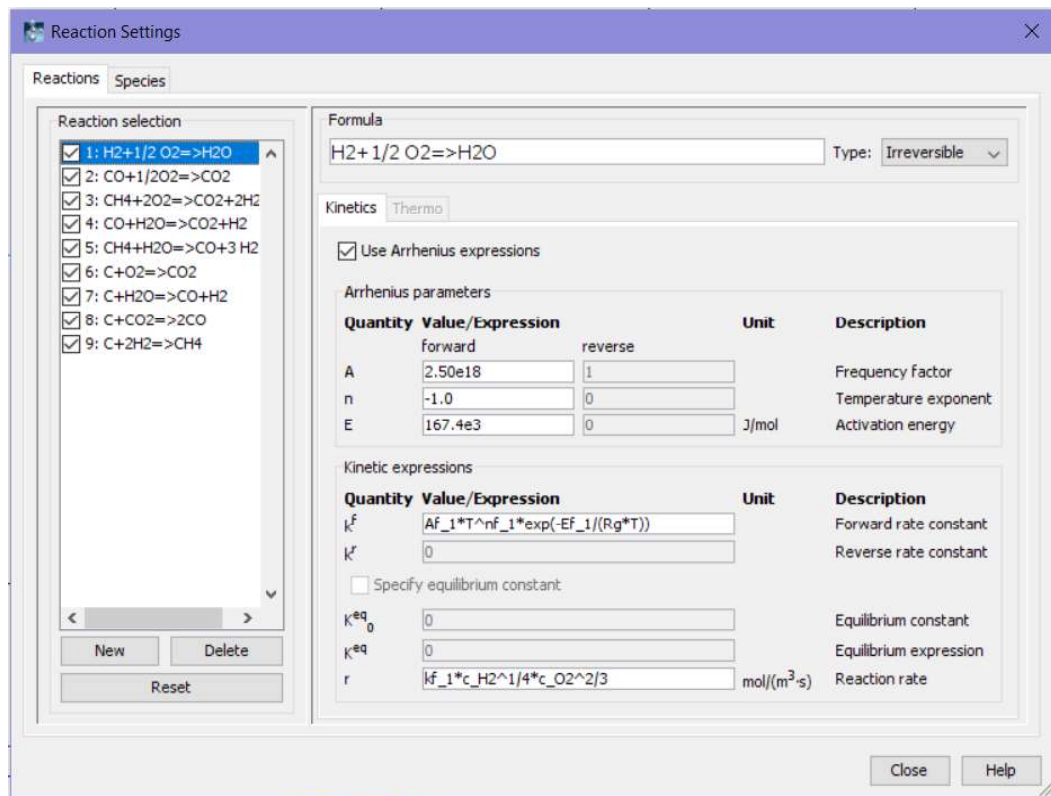
Calculate thermodynamic properties  
 Calculate species transport properties  
 Include energy balance

General properties

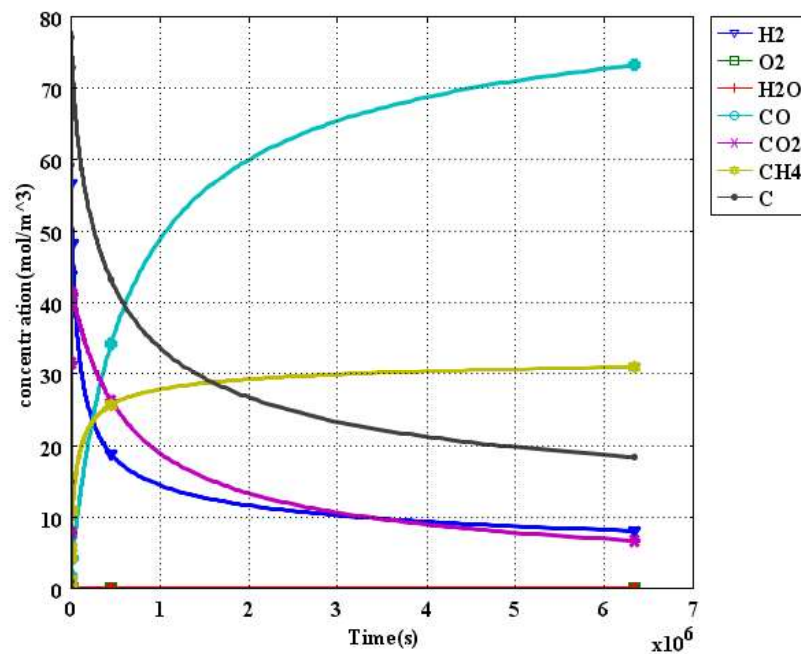
Quantity	Value/Expression	Unit	Description
T	1273	K	Temperature
p	1e6	Pa	Pressure
R <sub>g</sub>	8.31441	J/(mol·K)	Gas constant
k <sub>b</sub>	1.381e-23	J/K	Boltzmann's constant

Schematic diagram of a Semibatch reactor showing feed stream (v<sub>f</sub>, T<sub>f</sub>, c<sub>f,i</sub>), stirrer (W<sub>s</sub>), reactor volume (V<sub>r</sub>), and heat exchange (Q<sub>ext</sub>).

شکل ۴-۳- شکلی از فضای نرم‌افزار COMSOL و برخی از اطلاعات داده شده به نرم‌افزار



شکل ۴-۴- وارد کردن واکنش‌های شیمیایی و سنتتیک واکنش در نرم افزار COMSOL



شکل ۴-۵- نمودار غلظت و اجزاء گاز تولیدی (در دمای ۱۲۷۳ کلوین و فشار ۱ مگاپاسکال)

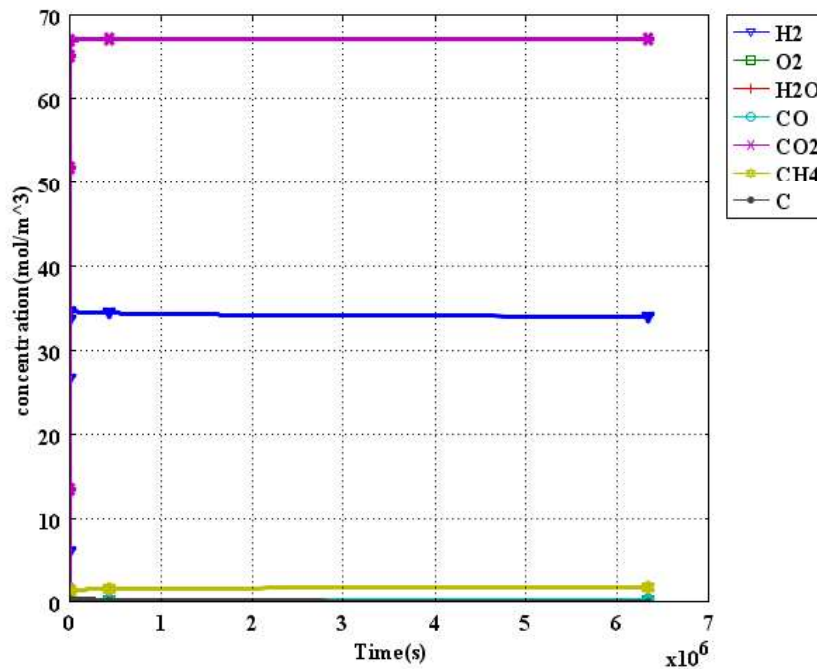
جدول ۴-۱۰- مقدار و اجزای گاز تولیدی پس از اجرای اولیه مدل (در دمای ۱۲۷۳ کلوین و فشار ۱ مگاپاسکال)

مقدار (میلیون متر مکعب)	گاز تولیدی
۰/۲۶۲۹	CO <sub>2</sub>
۰/۳۱۵۲	H <sub>2</sub>
۱/۲۰۰۲	CH <sub>4</sub>
۲/۸۳۰۴	CO
۴/۶۰۸۷	کل گاز تولیدی

همانطور که در نمودار شکل ۴-۶ مشاهده می‌شود همه‌ی کربن موجود در محفظه به گاز تبدیل نشده است و مقدار ۱۵۰۳/۶۶۰۵ متر مکعب زغال‌سنگ در محفظه مورد نظر باقی مانده است. علت این پدیده این است که همه‌ی اکسیدان ورودی در فاز ناهمگن (که موجب رشد کاواک می‌شود) شرکت نمی‌کند و مقداری از آن در فاز همگن مصرف می‌شود. برای تبدیل به گاز کردن مقدار زغال‌سنگ باقی‌مانده می‌توان نرخ تزریق اکسیدان را بیشتر در نظر گرفت (یعنی نرخ تزریق اکسیژن یا بخار آب و یا هر دو را زیاد کرد)، زمان عملیات را بیشتر کرد، فشار را بیشتر در نظر گرفت و یا ترکیبی از این چند حالت را انجام داد. در این تحقیق برای بررسی تاثیر سایر پارامترهای عملیاتی فرض شده است که فاصله‌ی چاه‌های تزریق و تولید ثابت باشد (حجم ثابت). در ادامه هر یک از این حالت‌ها به طور دقیق بررسی شده است.

#### ۴-۶-۲- افزایش نرخ تزریق اکسیژن (سناریو ۱)

برای تبدیل به گاز کردن آن مقدار از زغال‌سنگ که درون کاواک باقی مانده است، فرض شده که همه‌ی پارامترهای عملیاتی که در مراحل قبل محاسبه شده است ثابت باشند فقط نرخ تزریق اکسیژن افزایش یابد. با سعی و خطا این مقدار تا جایی که همه‌ی زغال‌سنگ باقی‌مانده تبدیل به گاز شود افزایش داده شده است. در این حالت نرخ تزریق اکسیژن به ۵۷ مول بر ثانیه رسیده است. در این حالت نسبت تزریق بخار آب به اکسیژن ۰/۴۴۱۳ است. پس از اجرای مدل در نرم افزار، نتایج به صورت نمودار شکل ۴-۶ و جدول ۴-۱۱ به دست آمده است.



شکل ۴-۶- غلظت گازهای تولیدی با افزایش نرخ تزریق اکسیژن به ۵۷/۶ مول بر ثانیه (در دمای 1273 K و فشار 1MPa)

جدول ۴-۱۱- مقدار و اجزای گاز تولیدی در حالت ۱ (در دمای 1273 K و فشار 1MPa)

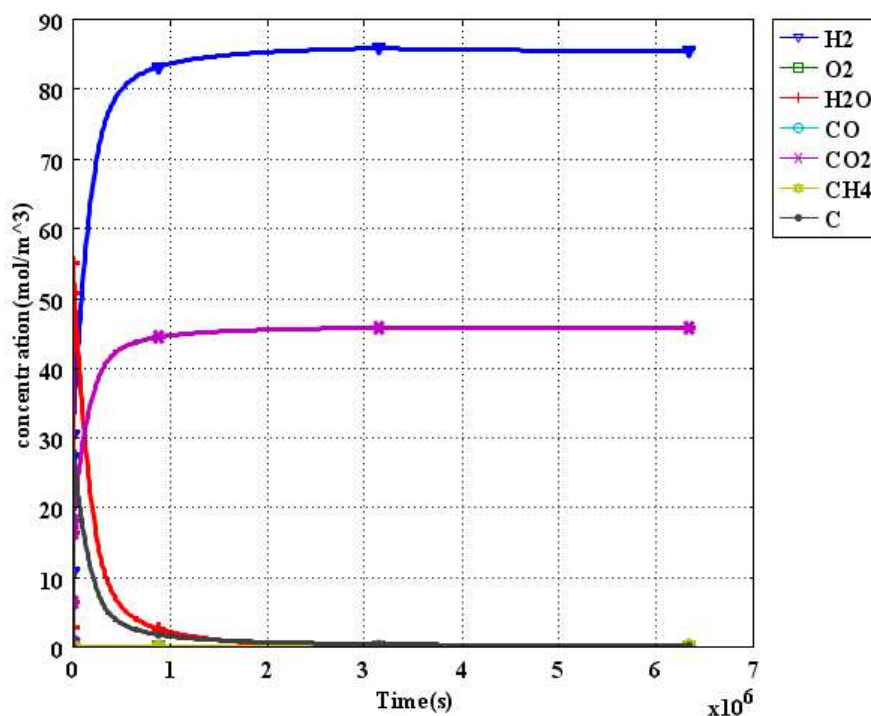
مقدار (میلیون متر مکعب)	گاز تولیدی
۴/۸۵۰۷	CO <sub>2</sub>
۲/۴۶۳۳	H <sub>2</sub>
۰/۱۲۶۱	CH <sub>4</sub>
۰/۰۲۰۲	CO
۷/۴۶۰۳	کل گاز تولیدی

همان طور که در نمودار شکل ۴-۶ مشاهده می شود با افزایش نرخ تزریق اکسیدان (در اینجا اکسیژن) مقدار CH<sub>4</sub> و CO کاهش می یابد. علت این امر، سوخته شدن بیش از حد گاز منو اکسید کربن و متان با وجود زیاد بودن اکسیدان (اکسیژن) در کاواک است.

#### ۴-۶-۳- افزایش نرخ تزریق بخار آب (سناریو ۲)

در این حالت فرض شده است که همه ی پارامترهای عملیاتی مرحله اولیه مدل سازی ثابت باشند و فقط نرخ تزریق بخار آب تا جایی که همه ی زغال سنگ موجود در محفظه به گاز تبدیل شود،

افزایش یابد. در نهایت نرخ تزریق بخار آب به  $123/0.3$  (mol/s) رسید. در این حالت نسبت تزریق بخار آب به اکسیژن ۱۲ است. در این صورت پس از اجرای مدل در نرم افزار نتایج به صورت نمودار شکل ۴-۷ و جدول ۴-۱۲ به دست آمده است.



شکل ۴-۷- غلظت گازهای تولیدی با افزایش نرخ تزریق بخار آب به  $116/2$  مول بر ثانیه (در دمای 1273 K و فشار (1MPa)

جدول ۴-۱۲- مقدار و اجزای گاز تولیدی در حالت ۲ (در دمای 1273 K و فشار 1MPa)

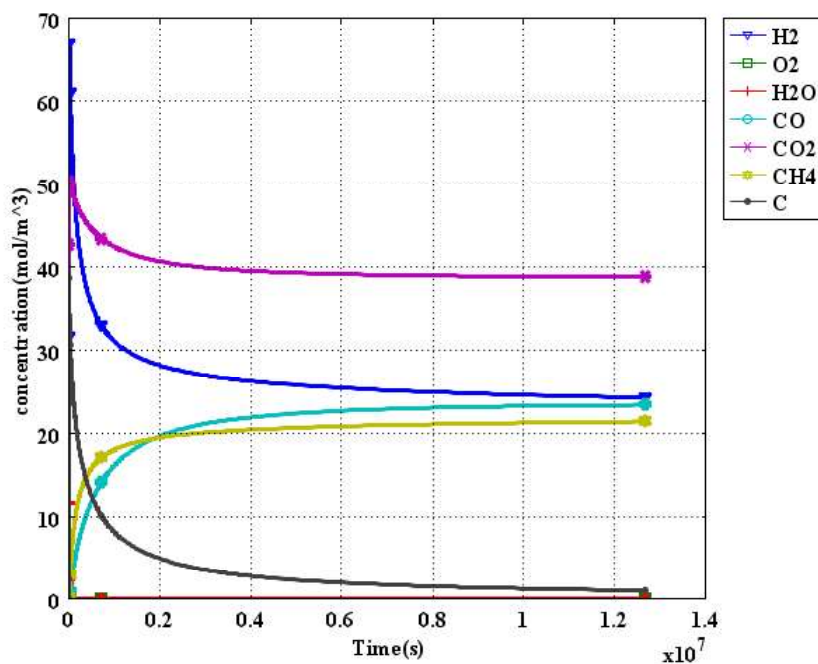
مقدار (میلیون متر مکعب)	گاز تولیدی
۴/۹۴۷۰	CO <sub>2</sub>
۹/۲۱۲۸	H <sub>2</sub>
۰/۰۲۳۸	CH <sub>4</sub>
۰/۰۰۷۲	CO
۱۴/۱۹۰۸	کل گاز تولیدی

همان طور که در نمودار شکل ۴-۷ مشاهده می شود در این حالت مقادیر گازهای متان و کربن مونو اکسید کاهش یافته و در عوض مقدار گاز هیدروژن به طور چشم گیری افزایش یافته است. علت این امر هم مانند حالت ۱، سوخته شدن بیش از حد گاز مونو اکسید کربن و متان با وجود زیاد بودن

اکسیدان (بخار آب) در کاواک می‌باشد. همچنین با توجه به این حالت به نظر می‌رسد در فرآیند UCG برای تولید گاز هیدروژن، اگر نرخ تزریق بخار آب افزایش یابد نتیجه مطلوب‌تری حاصل شود.

#### ۴-۶-۴- افزایش زمان عملیات (سناریو ۳)

در این حالت فرض شده است که تمامی پارامترهای عملیاتی مرحله اولیه مدل‌سازی ثابت باشند و فقط زمان عملیات افزایش یابد. افزایش زمان عملیات تا جایی که کل زغال‌سنگ موجود در کاواک به گاز تبدیل شود ادامه داده شده است. در نهایت زمان عملیات به ۱۴۷ روز رسید. نتایج در نمودار شکل ۴-۸ و جدول ۴-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۴-۸- غلظت گازهای تولیدی با افزایش زمان عملیات به  $10^6 \times 12/6720$  ثانیه (در دمای 1273 K و فشار 1MPa)

جدول ۴-۱۳- مقدار و اجزای گاز تولیدی در حالت ۳ (در دمای 1273 K و فشار 1MPa)

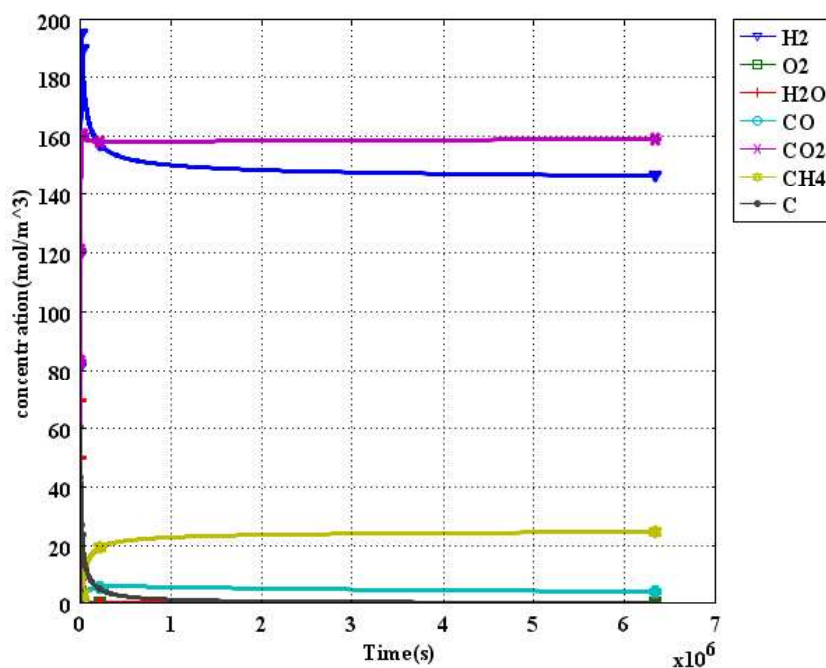
مقدار (میلیون متر مکعب)	گاز تولیدی
۲/۲۹۲۸	CO <sub>2</sub>
۱/۴۳۵۳	H <sub>2</sub>
۱/۲۶۴۵	CH <sub>4</sub>
۱/۳۸۲۹	CO
۶/۳۷۵۵	کل گاز تولیدی

در این حالت مقدار متان و هیدروژن موجود در گاز سنتزی بیشتر شده و به نظر می‌رسد که ارزش حرارتی گاز تولیدی افزایش یافته است. در ادامه این مطلب به طور دقیق‌تر بررسی شده است.

#### ۴-۶-۵- افزایش فشار (سناریو ۴)

به طور کلی افزایش فشار موجب افزایش رشد ابعاد کاواک می‌شود (Sarraf Shirazi, 2012). بنابراین اگر همه‌ی پارامترها در طراحی اولیه ثابت باشند و فقط فشار افزایش یابد، در این صورت در یک زمان ثابت، نرخ تبدیل به گاز شدن زغال سنگ افزایش می‌یابد. یعنی شدت انجام واکنش در فاز ناهمگن بیشتر می‌شود.

در این حالت فرض شده است که همه‌ی پارامترهای عملیاتی مرحله اولیه مدل‌سازی ثابت باشند و فقط فشار عملیات تا جایی که کل زغال سنگ موجود در کاواک تبدیل به گاز شود، افزایش یافته است. در نهایت فشار تا 3MPa افزایش یافته است. نتایج در شکل ۴-۹ و جدول ۴-۱۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که حجم گازها در این جدول با فشار ۳ مگاپاسکال و دمای ۱۲۷۳ کلوین محاسبه شده است.



شکل ۴-۹- غلظت گازهای تولیدی با افزایش فشار کاواک به 3Mpa (در دمای 1273K)



جدول ۴-۱۴- مقدار و اجزای گاز تولیدی در حالت ۴ (در فشار 3MPa و دمای 1273K)

مقدار (میلیون متر مکعب)	گاز تولیدی
۱/۴۱۲۴	CO <sub>2</sub>
۱/۳۰۲۴	H <sub>2</sub>
۰/۲۱۷۵	CH <sub>4</sub>
۰/۰۳۵۸	CO
۲/۹۶۸۱	کل گاز تولیدی

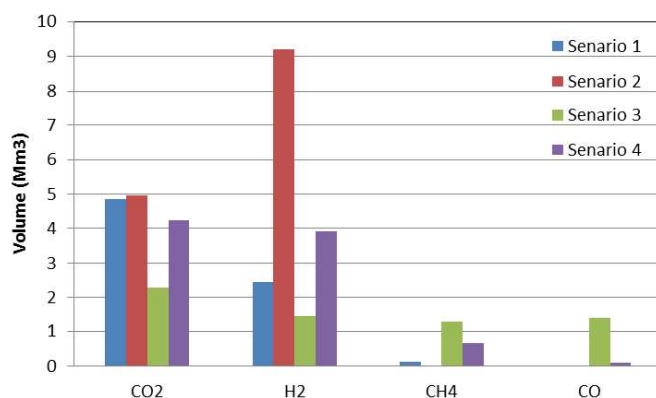
در شبیه‌سازی انجام شده با دانستن مقدار کل گاز تولیدی، می‌توان نرخ خروج (با تغییر در قطر چاه تولید) را به گونه‌ای طراحی کرد که فشار همواره در مقدار مورد نظر ثابت بماند. این فشار نباید بیشتر از فشار تزریق باشد زیرا اگر اینطور باشد مانع از ورود اکسیدان به داخل کاواک می‌شود. بنابراین در این حالت هزینه‌ها (به جز هزینه‌ی افزایش فشار تزریق) افزایش نمی‌یابد و به نظر می‌رسد از نظر اقتصادی به صرفه‌تر باشد. در این حالت مقدار هیدروژن بیشتر از متان و کربن منو اکسید تولید شده است.

#### ۴-۷- مقایسه‌ی ۴ سناریو

برای مقایسه هر یک از ۴ سناریو توسعه داده شده یعنی افزایش نرخ تزریق اکسیژن، افزایش نرخ تزریق بخار آب، افزایش زمان عملیات و افزایش فشار کاواک؛ ابتدا باید حجم و مقدار گاز تولیدی همه‌ی حالات در فشار و دمای یکسان بیان شود. در این قسمت برای مقایسه حجم گاز تولیدی در هر حالت، دما و فشار گاز تولیدی در هر حالت به ترتیب در ۱۲۷۳ کلوین و ۱ مگاپاسکال محاسبه شده است. در حالت ۴ (افزایش فشار) با استفاده از رابطه‌ی ۴-۳، حجم گاز تولیدی از فشار ۳ مگاپاسکال به فشار ۱ مگاپاسکال رسید. نتایج در جدول ۴-۱۵ و شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۵- مقایسه ترکیب و حجم گاز تولیدی در هر حالت (در دمای 1273 K و فشار 1MPa)

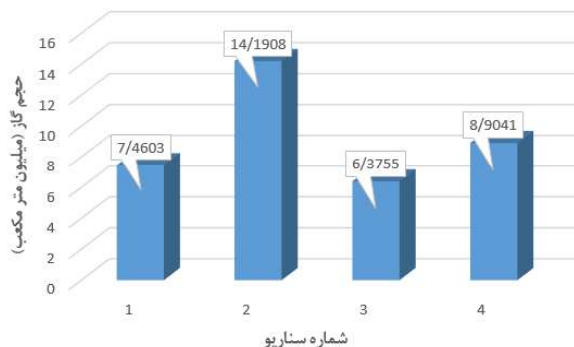
شماره سناریو				گاز تولیدی
۴	۳	۲	۱	
۴/۲۳۷۱	۲/۲۹۲۸	۴/۹۴۷	۴/۸۵۰۷	CO <sub>2</sub> (Mm <sup>3</sup> )
۳/۹۰۷۱	۱/۴۳۵۳	۹/۲۱۲۸	۲/۴۶۳۳	H <sub>2</sub> (Mm <sup>3</sup> )
۰/۶۵۲۵	۱/۲۶۴۵	۰/۰۲۳۸	۰/۱۲۶۱	CH <sub>4</sub> (Mm <sup>3</sup> )
۰/۱۰۷۴	۱/۳۸۲۹	۰/۰۰۷۲	۰/۰۲۰۲	CO (Mm <sup>3</sup> )
۸/۹۰۴۱	۶/۳۷۵۵	۱۴/۱۹۰۸	۷/۴۶۰۳	کل گاز تولیدی



شکل ۴-۱۰- مقایسه حجم هر گاز در هر کدام از سناریوها

در شکل ۴-۱۰ حجم گاز تولیدی در هر یک از سناریوها با هم مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار CH<sub>4</sub> و CO در سناریو ۳ و بیشترین مقدار H<sub>2</sub> و CO<sub>2</sub> در سناریو ۲ به دست آمده است.

در شکل ۴-۱۱ مقدار کل گاز تولیدی در هر سناریو با هم مقایسه شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود بیشترین مقدار گاز به ترتیب در سناریو ۲، ۴، ۱ و ۳ با مقادیر به ترتیب ۱۴/۱۹، ۸/۹۰، ۷/۴۶ و ۶/۳۷ میلیون متر مکعب تولید شده است.



شکل ۴-۱۱-مقایسه حجم گاز تولیدی در هر سناریو

در ادامه به منظور دستیابی به هدف اصلی تحقیق، ارزش حرارتی گاز تولیدی در هر سناریو با هم مقایسه شده است. در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و فشار ۱ اتم سفر، ارزش حرارتی هیدروژن ۲۸۵/۸ کیلوژول بر مول (kj/mol)، ارزش حرارتی منو اکسید کربن ۲۸۳/۰ کیلوژول بر مول، ارزش حرارتی متان ۸۹۰/۸ کیلوژول بر مول و گاز کربن دی اکسید فاقد ارزش حرارتی است ( Haynes, 2014). بنابراین ابتدا مقدار مول اجزای گاز تولیدی برای هر سناریو محاسبه می شود سپس این مقادیر در نسبت های ذکر شده برای هر نوع گاز، ضرب می شود. نتایج به صورت جداول ۴-۱۶ تا ۴-۱۹ برای هر سناریو به دست آمده است.

جدول ۴-۱۶- ارزش حرارتی گاز تولیدی در سناریو ۱

ارزش حرارتی (Kj/mol)	ارزش حرارتی (میلیون کیلوژول)	مقدار (میلیون مول)	گاز تولیدی
۰	۰	۴۵۸/۳۱۶۹	CO <sub>2</sub>
۲۸۵/۸	۶۶۵۱۸/۳۹۲۴	۲۳۲/۷۴۴۲	H <sub>2</sub>
۸۹۰/۸	۱۰۶۱۳/۴۳۶۶	۱۱/۹۱۴۵	CH <sub>4</sub>
۲۸۳	۵۴۰/۱۳۳۸	۱/۹۰۸۶	CO
۱۱۰/۱۹۰۹	۷۷۶۷۱/۸۶۲۸	۷۰۴/۸۸۴۲	کل گاز تولیدی

جدول ۴-۱۷- ارزش حرارتی گاز تولیدی در سناریو ۲

ارزش حرارتی (Kj/mol)	ارزش حرارتی (میلیون کیلوژول)	مقدار (میلیون مول)	گاز تولیدی
۰	۰	۴۶۷/۴۱۵۸	CO <sub>2</sub>
۲۸۵/۸	۲۴۸۷۷۹/۹۲۶	۸۷۰/۴۶۸۶	H <sub>2</sub>
۸۹۰/۸	۲۰۰۳/۱۴۱	۲/۲۴۸۷	CH <sub>4</sub>
۲۸۳	۱۹۲/۵۲۴۹	۰/۶۸۰۳	CO
۱۸۷/۱۸۱۶	۲۵۰۹۷۵/۵۹۲	۱۳۴۰/۸۱۳۴	کل گاز تولیدی

جدول ۴-۱۸- ارزش حرارتی گاز تولیدی در سناریو ۳

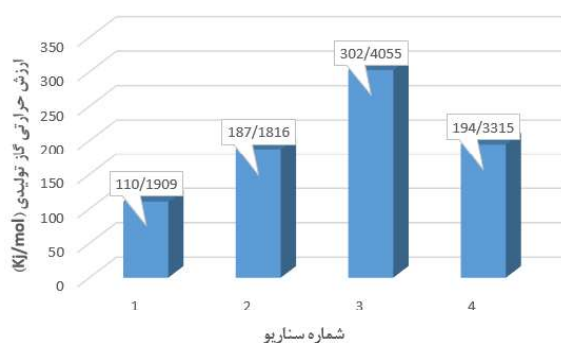
گاز تولیدی	مقدار ( میلیون مول)	ارزش حرارتی (میلیون کیلوژول)	
		ارزش حرارتی (Kj/mol)	ارزش حرارتی (کیلوژول)
CO <sub>2</sub>	۲۱۶/۶۳۴۵	۰	۰
H <sub>2</sub>	۱۳۵/۶۱۳۹	۲۸۵/۸	۳۸۷۵۸/۴۵۲۶
CH <sub>4</sub>	۱۱۹/۴۷۵۹	۸۹۰/۸	۱۰۶۴۲۹/۱۳۲
CO	۱۳۰/۶۶۲۹	۲۸۳	۳۶۹۷۷/۶۰۰۷
کل گاز تولیدی	۶۰۲/۳۸۷۲	۳۰۲/۴۰۵۵	۱۸۲۱۶۵/۱۸۵

جدول ۴-۱۹- ارزش حرارتی گاز تولیدی در سناریو ۴

گاز تولیدی	مقدار ( میلیون مول)	ارزش حرارتی (میلیون کیلوژول)	
		ارزش حرارتی (Kj/mol)	ارزش حرارتی (کیلوژول)
CO <sub>2</sub>	۴۰۰/۳۴۱۱	۰	۰
H <sub>2</sub>	۳۶۹/۱۶۱۲	۲۸۵/۸	۱۰۵۵۰۶/۲۷۱
CH <sub>4</sub>	۶۱/۶۵۱۳	۸۹۰/۸	۵۴۹۱۸/۹۷۸
CO	۱۰/۱۴۷۶	۲۸۳	۲۸۷۱/۷۷۰۸
کل گاز تولیدی	۸۴۰/۳۰۱۲	۱۹۴/۳۳۱۵	۱۶۳۲۹۷/۰۲

طبق نمودار شکل ۴-۱۲، بی‌شترین ارزش حرارتی گاز تولیدی به ترتیب در حالت ۳، ۴، ۲ و ۱

به ترتیب با مقادیر ۳۰۲/۴۰، ۱۹۴/۳۳، ۱۸۷/۱۸ و ۱۱۰/۱۹ کیلوژول بر مول مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۱۲- مقایسه ارزش حرارتی گاز تولیدی در هر سناریو

در سناریو ۳ با افزایش زمان عملیات، ارزش حرارتی گاز تولیدی بیشترین مقدار خود را دارد. در

سناریو ۴ که فشار کاواک افزایش یافت، احتمال برخورد گازهای H<sub>2</sub>O، O<sub>2</sub>، H<sub>2</sub> و CO<sub>2</sub> با دیواره‌های

کاواک افزایش یافته است، در نتیجه واکنش در فاز ناهمگن افزایش یافته و CO و CH<sub>4</sub> به مقدار

بیشتری (نسبت به سناریو ۱ و ۲) تولید شده است. در سناریو ۱ و ۲ که نرخ تزریق اکسیدان افزایش

یافته است، کمترین ارزش حرارتی برای گاز تولیدی مشاهده شد، همان طور که بیان شد علت این امر این است که بخش زیادی از  $CH_4$  و  $CO$  موجود با وجود اکسیدان زیاد، بیش از حد سوخته شده و در نتیجه ارزش حرارتی گاز سنتزی کاهش یافته است.

#### ۴-۸- بحث و بررسی

در هر یک از سناریوهای انجام شده در مراحل قبل، همه‌ی پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است تنها یک پارامتر تغییر کرده است. سناریو ۱ تا ۴ تحلیل حساسیت برای هر از پارامترهای عملیاتی را نشان می‌دهد. با توجه به این که امکان تغییر همزمان این پارامترها وجود دارد، سناریوهای ترکیبی زیادی را می‌توان در نظر گرفت. در ادامه برای مثال چند سناریو دیگر با تغییر همزمان این پارامترها بررسی شده است. در سناریو ۵ فشار کاواک و زمان عملیات به طور همزمان افزایش یافته است. در سناریو ۶ نرخ تزریق بخار آب و اکسیژن به گونه‌ای افزایش یافته است که نسبت ۲/۵ به ۱ حفظ شده باشد. در سناریو ۷ هر ۴ پارامتر به طور همزمان افزایش یافته است. در سناریو ۸ زمان و نرخ تزریق بخار آب افزایش یافته است. مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی برای هر سناریو در جدول ۴-۲۰ ذکر شده است.

جدول ۴-۲۰- مقدار ارزش حرارتی گاز تولیدی با تغییر همزمان پارامترهای عملیاتی

ارزش حرارتی گاز تولیدی (Kj/mol)	مقدار گاز تولیدی (میلیون مول)					ملاحظات	شماره سناریو
	total	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>		
۳۴۶/۹۴	۵۴۵/۱۴	۷۶/۸۶	۱۳۳/۲۷	۱۷۱/۱۹	۱۶۴/۸۲	افزایش زمان عملیات به ۱۲۷ روز افزایش فشار کواک به ۲ مگاپاسکال	۵
۲۶۴/۵۳	۶۹۹/۸۴	۲۳۴/۲۸	۱۱۰/۵۷	۶۹/۵۲	۲۸۵/۴۷	افزایش نرخ تزریق بخار آب به ۵۰ مول بر ثانیه افزایش نرخ تزریق اکسیژن به ۲۰ مول بر ثانیه (با حفظ نسبت ۲.۵ به ۱ (۵۰ به ۲۰))	۶
۲۸۸/۱۱	۶۴۷/۲۳	۱۷۷/۱۳	۱۳۰/۷۴	۶۸/۴۹	۲۷۰/۸۷	افزایش هر ۴ پارامتر به طور همزمان افزایش فشار کواک به ۱/۸ مگاپاسکال افزایش زمان عملیات به ۱۱۶ روز افزایش نرخ تزریق بخار آب به ۳۰ مول بر ثانیه افزایش نرخ تزریق اکسیژن به ۱۲ مول بر ثانیه	۷
۲۷۳/۳۴	۷۱۷/۰۷	۲۴۸/۸۸	۱۱۸/۴۸	۶۸/۳	۲۸۱/۴۱	افزایش زمان عملیات به ۱۲۲ روز افزایش نرخ تزریق بخار آب به ۳۳ مول بر ثانیه	۸

همانطور که در جدول ۴-۲۰ مشاهده می‌شود بیشترین ارزش حرارتی گاز تولیدی از بین ۸ سناریو موجود، مربوط به سناریو ۵ با مقدار ۳۴۶/۹۴ کیلوژول بر مول (3148.28 Kcal/Kg) است. از بین ۴ سناریو ترکیبی، بیشترین مقدار گاز تولیدی به ترتیب در سناریو ۸، ۶، ۷ و ۵ مشاهده می‌شود. اما بیشترین مقدار گاز تولیدی از بین ۸ سناریو موجود مربوط به سناریو ۲ با مقدار ۱۳۴۰ میلیون مول (22380.64 Mg) می‌باشد.

#### ۴-۹- اعتبار سنجی مدل ارائه شده در این تحقیق

برای اعتبارسنجی مدل ارائه شده در این تحقیق، به دلیل جامع بودن این مدل و حجم اطلاعات

زیادی که برای شبیه‌سازی دقیق فرآیند لازم است، متأسفانه اطلاعات مورد نیاز از یک مجموعه‌ی اجرا شده‌ی UCG در دسترس نبود. این اطلاعات تجاری یا در دسترس عموم نیستند و یا انحصاری برخی شرکت‌های اجرا کننده فرآیند UCG است.

اطلاعات مورد نیاز برای تست کامل مدل ارائه شده در این تحقیق برای یک پهنه‌ی استخراجی شامل؛ تناژ زغالی که تبدیل به گاز شده، زمان کل عملیات، نرخ تزریق اکسیژن و بخار آب (مجموعه‌هایی که از هوا به عنوان اکسیدان استفاده شده است به دلیل تاثیر گاز نیتروژن بر فرآیند، در این مدل جواب نمی‌دهد)، فشار و دمای کاواک، مشخصات زغال سنگ (شامل چگالی، خاکستر، مواد فرار، رطوبت، کربن ثابت)، مشخصات مواد فرار (شامل کربن منو اکسید، کربن دی اکسید، متان، سایر)، اجزا و مقدار گاز تولیدی، ارزش حرارتی گاز تولیدی، قطر چاه‌های تولید و تزریق و لینک اتصالی و ابعاد پهنه و میزان نشت گاز از کاواک در طول زمان عملیات می‌باشد. اگر این اطلاعات برای یک مجموعه‌ی واقعی UCG در دسترس باشد می‌توان کارایی مدل ارائه شده در این تحقیق را به طور کامل تست کرد (با واقعیت مقایسه شود).

اگرچه در دسترس نبودن اطلاعات مورد نیاز باعث می‌شود که امکان تست کامل این مدل میسر نباشد اما یکسان بودن نتایج به دست آمده از مدل ارائه شده در این تحقیق، با نتایج تحقیقات دیگران می‌تواند تایید کند که این مدل به واقعیت نزدیک است. مقایسه‌ی مهمترین نتایج به دست آمده از این مدل با تحقیقات دیگران در جدول ۴-۲۱ گردآوری شده است.

جدول ۴-۲۱- مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از مدل ارائه شده در این تحقیق با تحقیقات سایر محققان

ردیف	نتیجه در این تحقیق	ارجاع به سایر تحقیقات
۱	با افزایش زمان عملیات، ارزش حرارتی گاز تولیدی افزایش می‌یابد.	Daggupati et al., 2011, A
۲	با افزایش نرخ تزریق بخار آب، نرخ تولید هیدروژن افزایش می‌یابد.	Żogała & Janoszek, 2015
۳	با افزایش نرخ تزریق اکسیدان مقدار زغال تبدیل به گاز شده و در نتیجه حجم کاواک افزایش می‌یابد.	sarrafi shirazi, 2012
۴	افزایش فشار گاز درون کاواک موجب افزایش میزان گسترش فضای استخراجی (حجم کاواک) می‌شود.	Perkins, 2005
۵	با افزایش مواد فرار موجود در زغال سنگ، نرخ رشد فضای استخراجی افزایش می‌یابد.	Perkins and sahajawalla, 2009
۶	با افزایش خاکستر زغال سنگ، نرخ رشد فضای استخراجی افزایش می‌یابد.	Perkins, 2005; prabu and jayanti, 2011
۷	با افزایش نرخ تزریق اکسیدان، ارزش حرارتی گاز تولیدی کاهش می‌یابد.	sarrafi shirazi, 2012
۸	ارزش حرارتی به دست آمده در این مدل برای مقیاس تجاری ۵۹۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم به دست آمد. در میداین واقعی UCG هم ارزش حرارتی در همین حدود می‌باشد (حدود ۴۰۰۰ تا ۶۰۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم).	Perkins, 2005; Couch, 2009
۹	با افزایش زمان عملیات، حجم کاواک افزایش می‌یابد.	Daggupati et al., 2010, B
۱۰	با افزایش دما، تولید گاز CH <sub>4</sub> کم می‌شود.	Wiatowski et al., 2016

#### ۴-۱۰- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل با شبیه‌سازی فرآیند UCG توسط نرم‌افزار COMSOL، تاثیر ۴ پارامتر عملیاتی (نرخ تزریق اکسیژن، نرخ تزریق بخار آب، زمان عملیات و فشار کاواک) بر ارزش حرارتی گاز تولیدی بررسی شد. پس از انجام طراحی اولیه برای سوختن زغال سنگ در فاز ناهمگن، به دلیل مصرف شدن بخشی از اکسیدان در فاز همگن، با فرض ثابت بودن سایر پارامترها، ۴ سناریو برای تبدیل به گاز کردن مقدار زغال سنگ باقی‌مانده توسعه داده شد. سناریوهای ۱ تا ۴ عبارت بودند از: افزایش نرخ



تزریق اکسیژن، افزایش نرخ تزریق بخار آب، افزایش زمان عملیات و افزایش فشار کاواک. نتیجه‌ی شبیه‌سازی نشان می‌دهد که برای تولید گاز سنتزی با ارزش حرارتی بیشتر، به ترتیب؛ زمان عملیات، فشار کاواک، نرخ تزریق بخار آب و نرخ تزریق اکسیژن؛ بیشترین تاثیر مثبت را دارند. در ادامه با توجه به این که امکان تغییر همزمان پارامترهای عملیاتی وجود دارد، چند سناریو ترکیبی دیگر با تغییر همزمان چند پارامتر توسعه داده شد. در نهایت نتایج حاصل از این سناریوها نشان می‌دهد که بیشترین ارزش حرارتی گاز تولیدی در سناریو ۵ با مقدار  $3148/28$  کیلوکالری بر کیلوگرم و بیشترین مقدار گاز تولیدی در سناریو ۲ با مقدار  $22380/64$  میلیون گرم به دست آمده است.

در شبیه‌سازی انجام شده مقدار و اجزای گاز تولیدی پیش از اجرای عملیات UCG در میدان تجاری قابل پیش‌بینی می‌باشد بنابراین علاوه بر امکان بررسی‌های فنی، امکان تحلیل‌های اقتصادی نیز وجود دارد. همچنین همه‌ی پارامترهای عملیاتی در این شبیه‌سازی به صورت مستقیم یا غیر مستقیم دخیل هستند که می‌توان برای هر یک از آن‌ها تحلیل حساسیت (برای یافتن مقدار بهینه‌ی آن‌ها با توجه به شرایط منطقه مورد نظر) انجام داد. بنابراین این مدل قابلیت پیش‌بینی تاثیر پارامترهای فنی و انجام تحلیل‌های اقتصادی پیش از عملیات UCG را دارد.

در پایان برای اعتبار سنجی مدل ارائه شده در این تحقیق، اگرچه در دسترس نبودن اطلاعات مورد نیاز باعث شد که امکان تست کامل این مدل میسر نباشد اما یکسان بودن نتایج به دست آمده از این مدل، با نتایج تحقیقات دیگران نشان می‌دهد که این مدل به واقعیت نزدیک است.

فصل پنجم: مطالعه‌ی موردی؛ ایران، لایه‌ی K10 منطقه زغالی تخت

## ۵-۱- مقدمه

روش تبدیل به گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ در حال حاضر در بسیاری از کشورهای دنیا در حال توسعه و پیشرفت است. برای این که صنعت معدن کاری کشور از قافله ی معدن کاری در سطح جهان عقب نماند بررسی این روش برای ذخایر معدنی کشور ضروری به نظر می رسد. طبق گزارشات منتشر شده در سراسر دنیا برای تجاری سازی این روش به دلیل پیچیدگی های آن، هنوز خلاهای علمی بسیاری وجود دارد و یا بخش هایی از اطلاعات موجود برای اجرای موفق این روش، انحصاری و مخصوص برخی شرکت های خاص است و در اختیار عموم قرار نگرفته است. بنابراین لازم است که شرایط اجرای این روش در کشور به طور دقیق تری بررسی شود، تا در صورت مناسب بودن این روش برای ذخایر زغالی کشور، در مورد عملی کردن و پیاده سازی این روش در کشور تصمیمات لازم توسط مسئولین ذیربط گرفته شود. در ادامه از جمله مهمترین کارهایی که محققان ایرانی در کشور برای شفاف سازی این روش انجام داده اند به طور مختصر معرفی شده است.

اجرای فرآیند UCG در ایران شرایط خاصی دارد، از جمله مهمترین آن ها می توان به حوادث معادن زغال سنگ اشاره کرد. معادن زغال سنگ یکی از خطرناک ترین معادن دنیا است که هر ساله قربانیان زیادی را به خود می گیرد. در این معادن به دلیل گاز خیزی بالا، احتمال خفگی و انفجار زیاد است. در کشور ما با وجود حوادث زیادی که اتفاق افتاده و جان بسیاری از معدنچیان را گرفته است باز هم به دلایلی از جمله ضعف مدیریتی و نادیده گرفتن مسائل ایمنی، شاهد چنین حوادث ناگواری بوده ایم. با اجرای روش UCG، نیازی به فرستادن نفرات و تجهیزات به اعماق زمین نیست و فرآیند بر روی سطح زمین کنترل می شود بنابراین هیچ گونه خطر و حادثه ای جان پرسنل را تهدید نمی کند و از این لحاظ ایمن است.

همچنین یکی دیگر از مشکلات اجتماعی و اقتصادی در کشور ما، کمبود کار برای جوانان تحصیل کرده است که لطمه های جدی ای را برای جامعه ی ما به بار آورده است. با اجرای روش UCG

در کشور علاوه بر تامین بخشی از انرژی صنایع مختلف و حتی صادر کردن آن به سایر کشورها، با به کار گیری پرسنل مورد نیاز با تخصص‌ها و رشته‌های مختلف برای کنترل و اجرای موفق این فرآیند، بخشی از مشکلات مربوط به کمبود شغل و اشتغال‌زایی در کشور، حل می‌شود.

## ۵-۲- تاریخچه تحقیقات UCG در ایران

اطلاعات موجود در بسیاری از متون و نشریات ارائه شده در سراسر جهان برای تبدیل به گاز کردن زیرزمینی زغال‌سنگ، محدود و یا انحصاری است. بنابراین برای اجرای موفق این روش در ایران نیاز به شفاف‌سازی این اطلاعات و انجام تحقیقات و آزمایشات جدید می‌باشد. خوشبختانه در ایران هم مانند سایر کشورهای ذکر شده، علاقه‌مندی به روش UCG در سالیان اخیر چشمگیر بوده است. از جمله مهمترین کارهایی که در این زمینه در ایران، توسط محققین داخل کشور انجام شده است به طور خلاصه در جدول ۵-۱ ذکر شده است.

جدول ۵-۱- تاریخچه UCG در ایران

محقق	موضوع	محل تحقیق	سال	منبع
موسوی	تحلیل پایداری فضاهای استخراجی به روش UCG	دانشگاه یزد	۱۳۹۰	موسوی، ۱۳۹۰
لطفی آزاد	مدل‌سازی و تحلیل نشت گاز از کارگاه استخراج UCG	دانشگاه صنعتی شاهرود	۱۳۹۱	لطفی آزاد، ۱۳۹۱
جلالی	پیش‌امکان‌سنجی و طراحی پیلوت UCG در ایران	دانشگاه صنعتی شاهرود	۱۳۹۲	جلالی و همکاران، ۱۳۹۲
نجفی	مدل‌سازی ترمومکانیکی برای تعیین ابعاد پهنه‌های استخراجی در روش UCG	دانشگاه صنعتی شاهرود	۱۳۹۳	نجفی، ۱۳۹۳
شهبازی	تحلیل ترمومکانیکی پایداری چاه‌های تزریق و تولید در روش تبدیل به گاز کردن زغال‌سنگ در زیر زمین	دانشگاه یزد	۱۳۹۵	شهبازی، ۱۳۹۵
جوکار	بررسی میزان گسترش فضای استخراجی، مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی در فرآیند UCG	دانشگاه صنعتی شاهرود	۱۳۹۶	تحقیق حاضر

طبق جدول ۵-۱ مهمترین مباحث برای اجرای موفق UCG در مقیاس تجاری توسط این محققین بررسی شده است. بنابراین به نظر می‌رسد با در نظر گرفتن این تحقیقات به طور همزمان و با تشکیل یک تیم متخصص برای جلب حمایت دولت، سرمایه‌گذاری و برنامه‌ریزی دقیق، بتوان اجرای این فرآیند را در مقیاس تجاری در کشور ممکن کرد. در ادامه مطالعه‌ی موردی این تحقیق برای لایه‌ی K10 منطقه زغالی تخت انجام شده است.

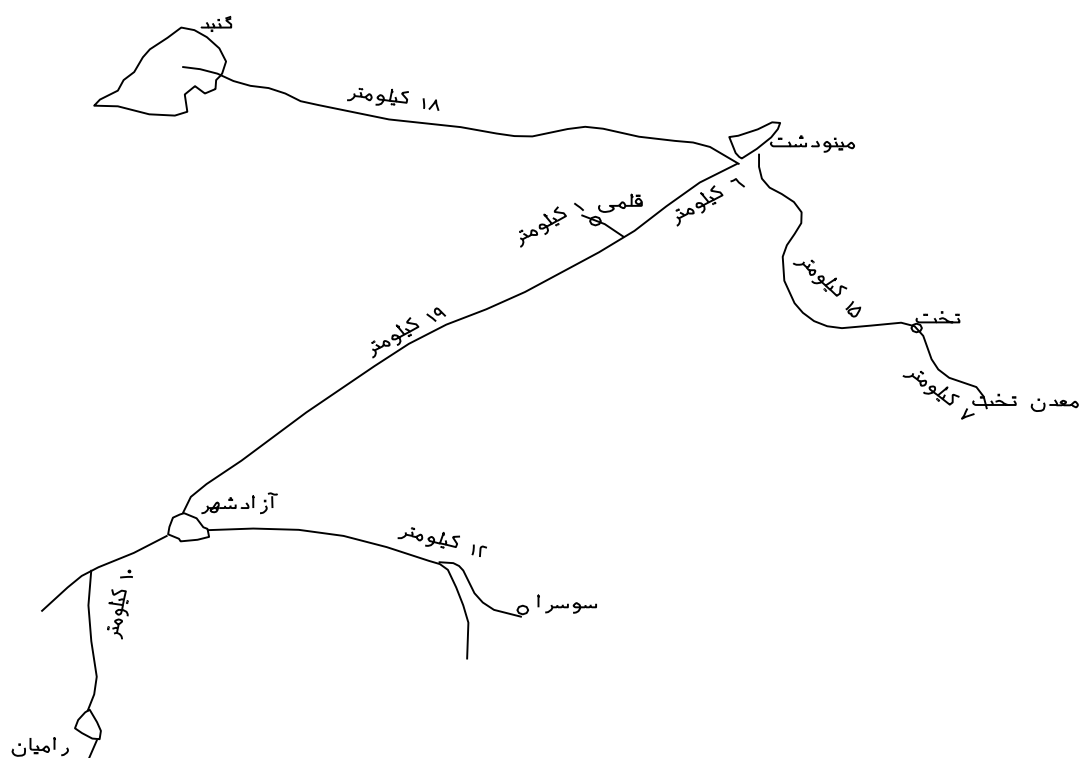
### ۵-۳- معرفی منطقه زغالی تخت

منطقه تخت از نظر جغرافیایی در جنوب شرقی شهرستان مینودشت و به فاصله ۱۲ کیلومتری آن واقع شده است. وجه تسمیه این نام از روستای همجوار آن به نام تخت گرفته شده است که در شمال شرقی این منطقه قرار گرفته است. منطقه از نظر تقسیمات کشوری تابع استان گلستان و شهرستان آزادشهر و مینودشت می‌باشد. فاصله این منطقه تا مینودشت ۱۲ کیلومتر بوده که از طریق دو جاده چهل‌چای و جنگلده ارتباط دارد. راه دیگر رسیدن به زغال‌های این منطقه از طریق روستای سوسرا بوده که در جنوب غربی آن واقع شده است. شکل‌های ۵-۱ و ۵-۲ وضعیت ارتباطی و توپوگرافی این منطقه را به خوبی نشان می‌دهند.

منطقه تخت از شمال به دره چهل‌چای، از جنوب به دره سوسرا، از شرق با ارتفاعات حاجی لر و از غرب به روستاهای لیسه، محمد زمان خان، امام عبدالله، لولم، سراپو و ازداران محدود می‌گردد. طول جغرافیائی منطقه بین ۵۵/۲۲ تا ۵۵/۲۸ شرقی و عرض جغرافیائی آن بین ۳۷/۰۲ تا ۳۷/۱۲ شمالی است. میانگین ارتفاع منطقه از سطح دریا ۸۷۰ متر بوده و بالاترین نقطه ارتفاعی مربوط به بلندی‌های کوه لرگاه ۱۵۸۹ متر و پست‌ترین نقطه مربوط به مینودشت به میزان ۱۵۰ متر است.

این منطقه از نظر جغرافیائی طبیعی قسمتی از سلسله جبال البرز شرقی بوده که از شمال شرقی به جنوب غربی شامل: مناطق تخت، حیدر کلا، صندوق سنگ، ساسنگ، مازو تخته و سوسرا است. منطقه دارای تابستان‌های گرم و مرطوب و زمستان‌های پر بارش که اکثراً نزولات به صورت برف در

ارتفاعات تظاهر می‌نماید، است. حداقل درجه برودت در فصل زمستان ۱۰- درجه سانتی‌گراد و حداکثر گرمای آن در تابستان حدود ۳۵ درجه سانتی‌گراد است. در فصل بهار گاهی بارندگی بقدری شدید بوده که در تردد روزانه ایجاد اشکال می‌نماید. وجود اینگونه بارندگی‌های شدید باعث ایجاد رودخانه‌های پر آبی چون رودخانه گرگان رود شده است که از ارتفاعات سرچشمه گرفته و از دره چهل‌چای گذشته و بعد از سیراب نمودن زمین‌های اطراف خود به دریای خزر سرازیر می‌گردد. بر اساس آمار موجود مقدار متوسط بارندگی در منطقه حدود ۴۵۰-۵۰۰ میلی‌متر در سال اندازه‌گیری شده است. این مقدار بارندگی سبب شده که کشاورزی رونق بالایی داشته باشد و گیاهان مختلفی در منطقه رشد نمایند، به طوری که پوشش گیاهی کلیه قسمت‌های منطقه را در بر گرفته و قشر ضخیمی از آبرفت (ALLOVIUM) که بین ۰/۵ تا حدود ۱۰۰ متر ضخامت دارد سطح زمین را می‌پوشاند (گزارش اکتشافی شرکت البرز شرقی، ۱۳۸۸).



شکل ۵-۱- کروکی راه‌های ارتباطی منطقه اکتشافی تخت (گزارش اکتشافی شرکت البرز شرقی، ۱۳۸۸)



شکل ۵-۲- تصویر ماهواره ای منطقه اکتشافی تخت (گزارش اکتشافی شرکت البرز شرقی، ۱۳۸۸)

### ۵-۳-۱- زغال خیزی منطقه تخت

با مطالعه و بررسی عملیات اکتشافی در منطقه تخت نتیجه گرفته می‌شود که اکثر زغال‌های منطقه تخت مربوط به تریاس فوقانی تا ژوراسیک پایین (کلاریز) هستند. ضخامت زون زغال‌دار منطقه حدود ۶۰۰ متر و تعداد کل لایه‌های زغالی در آن حدود ۲۶ لایه است. مجموع کل ضخامت لایه‌های زغالی این منطقه بطور متوسط ۱۲/۷۷ متر و ضریب زغال‌خیزی آن ۲/۲ درصد است. تعداد

لایه‌های زغالی قابل کار در منطقه ۶ لایه زغالی است که عملیات زمین‌شناسی بر روی این لایه‌ها انجام گرفته است. یکی از فاکتورهای بسیار خوب این منطقه نزدیک بودن لایه‌های قابل کار به یکدیگر است. ضخامت زون زغالی قابل کار حدود ۱۵۰ متر است و کلیه لایه‌های قابل کار در این بخش قرار گرفته است. مجموع ضخامت لایه‌های زغالی در این بخش ۱۰/۸۷ متر و ضریب زغال‌خیزی آن ۷/۲۵ درصد است. لایه‌های اقتصادی به ترتیب سنی از قدیم به جدید عبارتند از: K20 – K19 – K17 – K11 – K10 – K8 که متوسط ضخامت قابل کار هر لایه و فاصله آن‌ها از لایه زیرین در ادامه در جدول (۵-۳) آورده شده است (گزارش اکتشافی شرکت البرز شرقی، ۱۳۸۸).

### ۵-۳-۲- کیفیت زغال‌های منطقه تخت

برای بررسی کیفیت زغال‌های منطقه تخت تعداد ۶۳۱ نمونه توسط گروه پی‌جویی شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی برداشت و به آزمایشگاه مرکزی زغال‌سنگ ارسال گردیده‌است. نتایج این آزمایشات به طور خلاصه در ادامه آمده است.

کلیه نمونه‌ها از لحاظ رطوبت، خاکستر، مواد فرار، لایه پلاستیکی، ضریب انقباض حجمی، گوگرد و ارزش حرارتی مورد آزمایش قرار گرفته است. صرف نظر از نمونه‌های اکسیده، رطوبت لایه‌ها بین ۱/۸ – ۱/۲ درصد و خاکستر بین ۴۴/۷ – ۱۱/۲ درصد و مواد فرار بین ۳۷/۵ – ۳۴/۲ درصد در نوسان است. برای مشخص نمودن ارزش حرارتی زغال‌های فوق تعداد ۵ نمونه از لایه‌های مختلف انتخاب و مورد آزمایش قرار گرفته است. این آزمایشات نشان می‌دهد که ارزش حرارتی لایه‌ها بین ۸۱۳۲ – ۷۹۸۵ کیلوکالری بر کیلوگرم متغیر است (گزارش اکتشافی شرکت البرز شرقی، ۱۳۸۸).

### ۵-۳-۳- مشخصات اکتشافی لایه‌ی زغالی K10

لایه زغالی K10 به طور متوسط ۱۵ متر بالای لایه K8 و ۲۲ متر زیر لایه K11 قرار گرفته است. گسترش طولی کار شده روی این لایه ۱۳/۳ کیلومتر می‌باشد که توسط ۱۴۲ گمانه، ۵ تونل و ۵ اکلون



مورد ارزیابی قرار گرفته است و دارای ضخامت زمین شناسی بین ۰/۹۰ متر تا ۲/۳۸ متر است. ضخامت متوسط قابل کار این لایه ۱/۱۸ متر و شیب لایه ۳۰ درجه است. این لایه از چند شعبه زغالی تشکیل شده که از ۱ تا ۵ متغیر است. شعبه‌ی زغالی غالب شعبه‌ی ۱ است و جنس شعبات غیر زغالی آن آرژیلیت است. این لایه از لحاظ یکنواختی، یک لایه‌ی یکنواخت با تغییرات کم است. میزان ذخیره این لایه، ۸۴۶۲۹۲۰/۴۶ تن تخمین زده شده است (گزارش اکتشافی شرکت البرز شرقی، ۱۳۸۸). جنس کمر بالا و کمر پایین این لایه، رس سنگ می‌باشد (حسینی، ۱۳۸۶). آنالیز فنی مواد موجود در زغال سنگ به صورت جدول ۵-۲ است.

جدول ۵-۲- آنالیز فنی زغال سنگ لایه‌ی K10 منطقه تخت (گزارش اکتشافی شرکت البرز شرقی، ۱۳۸۸)

درصد (%)	۱-آنالیز فنی
۷/۵	رطوبت کل
۱/۹۱	رطوبت متن (ad)
۱۲/۴۵	خاکستر (ad)
۳۰/۹۳	مواد فرار (ad)
۵۴/۷۱	کربن ثابت (ad)
۰/۵۹	گوگرد (ad)

یکی دیگر از اطلاعات زمین شناسی مورد نیاز برای مدل‌سازی فرآیند UCG در این تحقیق، مقدار دقیق مواد فرار موجود در زغال سنگ است. مواد فرار زغال سنگ شامل یک سری گازهای محبوس در زغال سنگ است که وقتی دمای زغال سنگ به ۷۵۰ تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد برسد، همه‌ی آن‌ها به صورت گاز یا بخار از زغال سنگ خارج می‌شوند. مواد فرار شامل ترکیبات گازی از قبیل  $CO$ ،  $CO_2$ ،  $CH_4$ ،  $SO_2$ ،  $NH_3$ ،  $Cl$  و  $N_2O$  و بخار آب هستند (یزدی، ۱۳۸۸). به دلیل در دسترس نبودن مقدار اجزای مواد فرار در گزارشات اکتشافی مربوط به لایه‌ی K10، با توجه به جدول ۵-۳ و اطلاعات عمومی در مورد مارک زغالی گ ژ-۱۰ این مقادیر با اطلاعات موجود به صورت تقریبی در نظر گرفته شده است (جدول ۵-۵).

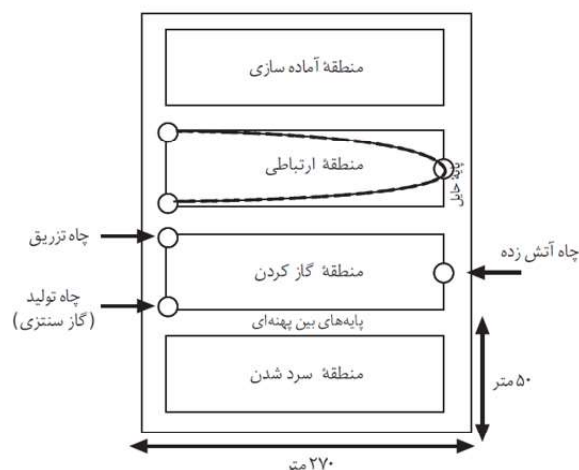
جدول ۵-۳- خصوصیات کیفی لایه‌های زغال در منطقه زغال‌دار تخت (گزارش اکتشافی شرکت البرز شرقی، ۱۳۸۸)

نام لایه	Y (mm)	IR	V (%)	A (%)	مارک تکنولوژیک
K8	۸-۱۲	۸۷-۸۹	۳۳-۳۷	۲۵	گ ژ-۱۰
K10	۸-۱۲	۸۷-۸۹	۳۳-۳۷	۱۷	گ ژ-۱۰
K11	۸-۱۲	۸۷-۸۹	۳۳-۳۷	۱۲	گ ژ-۱۰
K17	۸-۱۲	۸۷-۸۹	۳۳-۳۷	۲۰	گ ژ-۱۰
K19	۸-۱۲	۸۷-۸۹	۳۳-۳۷	۲۵	گ ژ-۱۰
K20	۸-۱۲	۸۷-۸۹	۳۳-۳۷	۱۷	گ ژ-۱۰

زغال‌سنگ مارک گازی چرب (گ ژ) در البرز شرقی و بسیاری از نواحی زغالی ایران به مقدار زیادی یافت می‌شود. این نوع زغال دارای جلای شیشه‌ای و رنگ پودر قهوه‌ای تیره است. مقدار مواد فرار آن ۳۱ تا ۳۷ درصد، مقدار کربن ۸۳ تا ۸۴ درصد، مقدار هیدروژن ۵/۵ تا ۹/۴ درصد و مقدار (O+N) معادل ۷/۷ تا ۹/۹ درصد متغیر است. چهار گروه تکنولوژیک این نوع زغال‌سنگ عبارت‌اند از گ ژ ۶، گ ژ ۱۰، گ ژ ۱۴ و گ ژ ۱۹ ([www.bitumen.loxblog.com/post/191](http://www.bitumen.loxblog.com/post/191)).

#### ۵-۴- توسعه‌ی الگوی گازی کردن لایه‌ی K10

یک تحقیق گسترده برای تبدیل به گاز کردن لایه‌ی زغالی K10 توسط جلالی و همکاران (۱۳۹۲) انجام شده است. هدف این پروژه تامین گاز سنتزی مورد نیاز برای یک نیروگاه برق ۲۷ مگاواتی بوده است. در این تحقیق، روش CRIP دو کاناله برای طراحی الگوی تبدیل به گاز کردن انتخاب شده است. ابعاد پهنه‌های گازی شدن به صورت شکل ۵-۳، ۳۰ متر در ۲۶۰ متر، ضخامت لایه ۲/۲ متر و چگالی زغال‌سنگ ۱/۵۵ تن بر متر مکعب، در نظر گرفته شده است. در این تحقیق فرض شده است که در هر ساعت ۴۳۰۰۰ مترمکعب گاز سنتزی با ارزش حرارتی ۵۰۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم تولید می‌شود. ابعاد هر پهنه در این تحقیق ۱۷۱۶۰ متر مکعب (۲/۲×۳۰×۲۶۰) و میزان زغال موجود در هر پهنه ۲۶۵۹۸ تن (۱/۵۵×۲/۲×۳۰×۲۶۰) در نظر گرفته شده است (جلالی و همکاران، ۱۳۹۲).



شکل ۵-۳- ابعاد پهنه‌ها و محل چاه‌ها برای تبدیل به گاز کردن لایه‌ی K10 منطقه تخت (جلالی و همکاران، ۱۳۹۲)

در تحقیق حاضر طراحی انجام شده توسط جلالی و همکاران (۱۳۹۲)، پذیرفته شده و کار ایشان توسعه داده شده است. بدین صورت که با شبیه‌سازی فرآیند تبدیل به گاز شدن برای لایه‌ی K10، فرض تولید هر ساعت ۴۳۰۰۰ متر مکعب گاز سنتزی با ارزش حرارتی ۵۰۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم، توسعه داده شده و به واقعیت تبدیل شده است.

## ۵-۵- شبیه‌سازی فرآیند UCG برای لایه‌ی K10 منطقه تخت

### ۵-۵-۱- مشخصات زغال سنگ

خلاصه مشخصات زغال سنگ در جدول‌های ۵-۴ و ۵-۵ آورده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به در دسترس نبودن میزان دقیق اجزای مواد فرار، این مقادیر با توجه به مارک زغالی گ ژ ۱۰ و توضیحات ارائه شده در بخش (۵-۳-۳) به طور تقریبی تخمین زده شده است.

جدول ۵-۴- مشخصات زغال سنگ

کربن ثابت (درصد وزنی)	رطوبت محتوی (درصد وزنی)	خاکستر (درصد وزنی)	مواد فرار (درصد وزنی)	چگالی (تن بر متر مکعب)
۵۴/۷۱	۷/۵	۲۴/۳	۳۰/۹۳	۱/۵۵

جدول ۵-۵- مشخصات مواد فرار

CH4 (درصد وزنی)	CO2 (درصد وزنی)	CO (درصد وزنی)	NH3, CL, N2O, SO2 and othe (درصد وزنی)
۷/۲۸۹	۱۰/۷۵	۱۰/۷۵	۲/۱۴

اکنون با توجه به این که حجم کل زغال سنگ موجود در محفظه در بخش قبل محاسبه شده است (۱۷۱۶۰ متر مکعب)، می توان اجزای موجود در محفظه را به طور جداگانه محاسبه کرد. در ادامه این کار در جدول ۵-۶ همانند جدول ۳-۱۶ و محاسبات مربوط به آن در پیوست ۲ انجام شده است.

جدول ۵-۶- مقدار عناصر موجود در یک پهنه‌ی لایه‌ی K10

مقدار (میلیون مول)	نماد	نام
۱۲۱۱/۵۳۶۶	C	کربن
۱۱۰/۷۳۲۷	H <sub>2</sub> O	بخار آب
۱۲۰/۸۶۲۳	CH <sub>4</sub>	متان
۶۴/۹۷۰۵	CO <sub>2</sub>	دی اکسید کربن
۱۰۲/۰۸۰۹	CO	منو اکسید کربن

### ۵-۵-۲- بررسی پارامترهای عملیاتی

همان طور که گفته شد، در فرآیند UCG هدف می تواند تولید گاز سنتزی، تولید هیدروژن، تولید متان و یا تولید سایر گازهای موجود در زغال سنگ باشد. در این بخش برای لایه‌ی زغالی K10 فرض شده است که هدف تولید گاز سنتزی با بیشترین ارزش حرارتی باشد. اکنون با استفاده از واکنش شیمیایی به دست آمده از فصل قبل (رابطه‌ی ۴-۱)، برای فاز ناهمگن؛ مقدار مول O<sub>2</sub>، H<sub>2</sub>O که وارد واکنش در فاز ناهمگن در هر کارگاه در منطقه‌ی مورد نظر می شوند طبق روابط استوکیومتری به صورت جدول ۵-۷ به دست آمده است. چون مقداری از H<sub>2</sub>O تزریقی مورد نیاز در خود زغال سنگ با عنوان رطوبت محتوا، وجود دارد پس این مقدار، از مقدار مورد نیاز کم شده است.

جدول ۵-۷- مقدار H<sub>2</sub>O و O<sub>2</sub> لازم برای فاز ناهمگن در هر کارگاه در لایه‌ی K10

مقدار (میلیون مول)	اکسیدان
۲۲۰/۲۷۹۴	اکسیژن (O <sub>2</sub> )
۴۳۹/۹۶۵۷	بخار آب (H <sub>2</sub> O)

همان طور که قبلا هم گفته شد در انتخاب زمان کل عملیات و دبی تزریقی ابتدا یکی انتخاب می شود (با توجه به شرایط طراحی ابتدا مقدار یکی از این دو پارامتر تعیین می شود سپس با استفاده از روابط، دیگری به دست می آید)، اما بهتر است ابتدا با توجه به قطر لوله و سرعت حرکت سیال در لوله، دبی تزریقی محاسبه شود سپس زمان کل عملیات محاسبه شود. فرض شد که در این تحقیق قطر لوله تزریق 20 cm و سرعت حرکت سیال در لوله 1.34 m/s باشد در این صورت پارامترهای ورودی نرم افزار با توجه به مراحل قبل و روابط ۲-۴ تا ۶-۴ محاسبه شده است و به همراه سایر فرضیات برای ساده سازی مسئله در جدول ۵-۸ آورده شده است. در این مدل برای به دست آوردن کل حجم گاز تولیدی، فرض شد که دما و فشار راکتور ثابت باشد.

جدول ۵-۸- پارامترهای ورودی نرم افزار برای یک کارگاه UCG در لایه ی K10

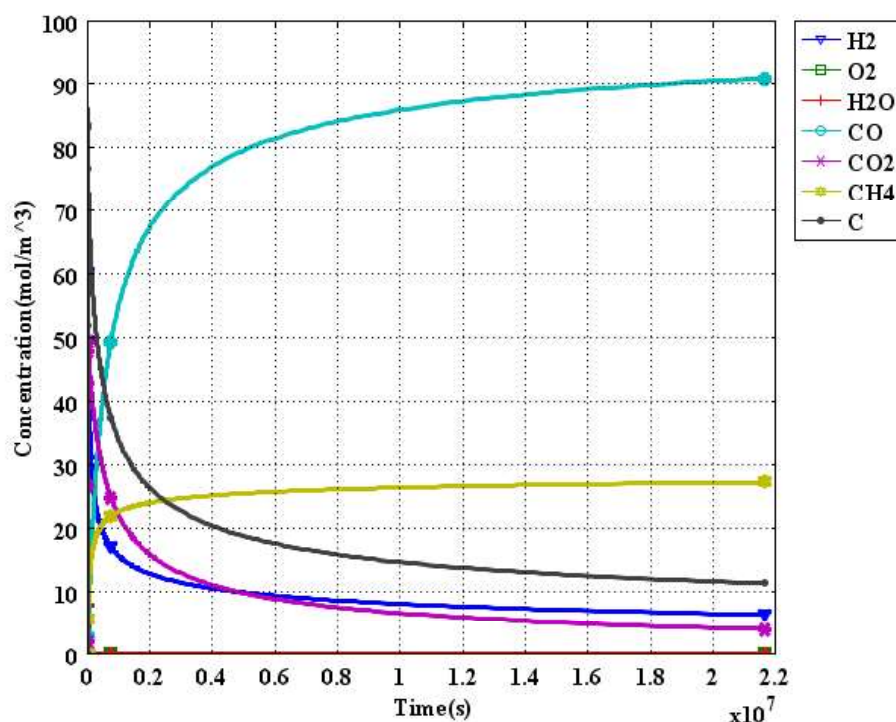
پارامتر ورودی	مقدار
دما (k)	۱۲۷۳
فشار (Mpa)	۱
ثابت گازها (J/mol.k)	۸/۳۱۴۴
نرخ تزریق اکسیژن (mol/s)	۱۰/۱۷۴۰
نرخ تزریق بخار آب (mol/s)	۲۰/۳۲۰۶
زمان عملیات (s)	$۲۱/۶۵۱۲ \times ۱۰^۶$

با توجه به ثابت بودن دما و فشار درون کاواک (به ترتیب ۱۲۷۳ کلوین و ۱ مگاپاسکال) چگالی گاز درون کاواک طبق رابطه ی ۳-۴، ۹۴/۴۸ مول بر متر مکعب به دست آمده است. در ادامه ۹ واکنش اصلی که قبل تر ذکر شد، در ماژول شیمی نرم افزار وارد شده و سنتیک واکنش هم مطابق جدول های ۳-۱۷ و ۳-۱۸ وارد شده است. نوع راکتور Semibatch انتخاب شد و حجم اولیه یعنی حجم لینک اتصالی، ۱۶/۳۳ متر مکعب ( $۵۲۰ \times ۳/۱۴ \times ۰/۱^۲$ ) انتخاب شده است.

### ۵-۳- نتایج شبیه سازی

همه ی اطلاعاتی که در مرحله ی قبل محاسبه شد به همراه ۹ واکنش اصلی، سنتیک واکنش و ویژگی های عناصر شرکت کننده در واکنش، در ماژول شیمی نرم افزار COMSOL وارد شده است. پس

از اجرای مدل در نرم افزار نتیجه به صورت نمودار شکل ۴-۵ و جدول ۹-۵ حاصل شده است.



شکل ۴-۵- نمودار غلظت گازهای تولیدی پس از اجرای اولیه مدل (در دمای 1273K و فشار 1MPa)

جدول ۹-۵- مقدار و اجزای گاز تولیدی پس از اجرای اولیه مدل (در دمای 1273K و فشار 1MPa)

مقدار (میلیون متر مکعب)	گاز تولیدی
۰/۴۷۹	CO <sub>2</sub>
۰/۷۴۴	H <sub>2</sub>
۳/۲۳۵	CH <sub>4</sub>
۱۰/۸۱۵	CO
۱۵/۲۷۳	کل گاز تولیدی

همان طور که در فصل قبل ذکر شد، برای گازی کردن مقدار زغال سنگ باقی مانده (با توجه به

شکل ۴-۵، ۱۷۹۱ متر مکعب زغال سنگ باقی مانده است) می توان زمان عملیات، فشار، نرخ تزریق بخار

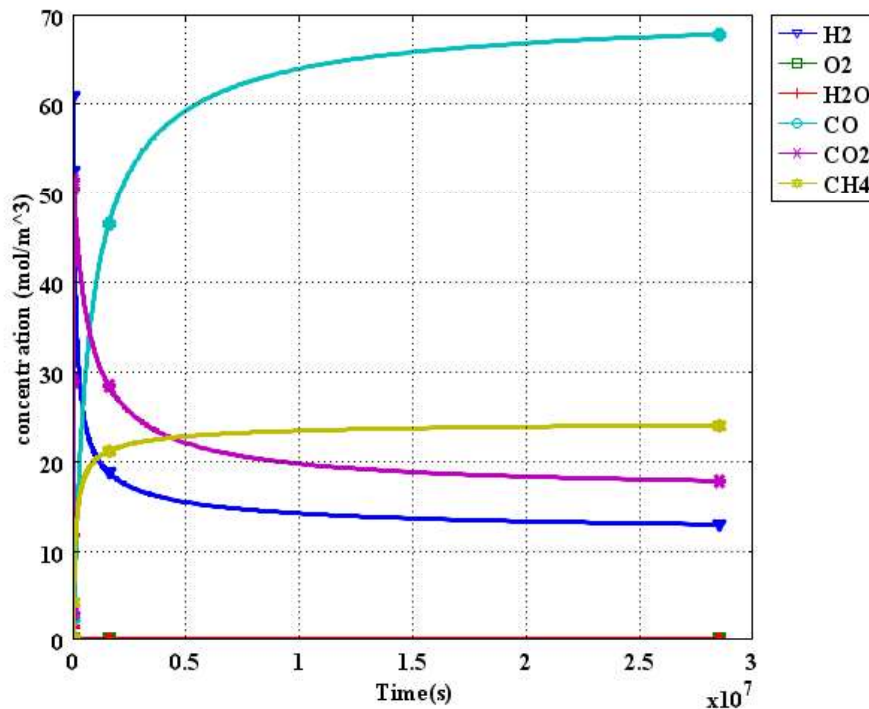
آب، نرخ تزریق اکسیژن را زیاد کرد و یا ترکیبی از این حالات را انجام داد. اگر قرار باشد فقط یکی از

این پارامترها افزایش داده شود، طبق نتایج حاصل از فصل ۴ با افزایش زمان عملیات ارزش حرارتی گاز

تولیدی بیشتر می شود. بنابراین در این مورد برای گازی کردن مقدار زغال سنگ باقی مانده؛ افزایش زمان

عملیات، از بین چند گزینه‌ی موجود انتخاب شده است. زمان عملیات تا جایی که همه‌ی زغال سنگ

موجود در محفظه مورد نظر به گاز تبدیل شود افزایش داده شده است. در نهایت زمان گازی کردن هر پهنه به ۱۱ ماه افزایش داده شده است. نتایج به صورت شکل ۵-۵ و جدول ۵-۱۰ حاصل شد.



شکل ۵-۵- نمودار غلظت گازهای تولیدی حاصل از یک کارگاه UCG در لایه‌ی K10 (در دمای 1273K و فشار 1MPa)

جدول ۵-۱۰- مقدار و اجزای گاز تولیدی حاصل از یک کارگاه UCG در لایه‌ی K10 (در دمای 1273K و فشار 1MPa)

مقدار (میلیون متر مکعب)	گاز تولیدی
۲/۵۳۷	CO2
۱/۸۴۸	H2
۳/۴۲۰	CH4
۹/۶۴۸	CO
۱۷/۴۵۳	کل گاز تولیدی

## ۵-۶- بحث و بررسی

در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و فشار ۱ اتمسفر، ارزش حرارتی هیدروژن ۲۸۵/۸ کیلوژول بر مول (kJ/mol)، ارزش حرارتی منو اکسید کربن ۲۸۳/۰ کیلوژول بر مول و ارزش حرارتی متان ۸۹۰/۸ کیلوژول بر مول می‌باشد (Haynes, 2014). بنابراین برای محاسبه‌ی ارزش حرارتی گاز تولیدی حاصل از هر کارگاه استخراج UCG برای لایه‌ی K10 منطقه تخت، ابتدا مقدار مول اجزای گاز تولیدی در

جدول ۵-۱۱ محاسبه شده سپس محاسبات مربوطه برای به دست آوردن ارزش حرارتی گاز تولیدی به صورت جدول ۵-۱۲ به دست آمده است. نحوه‌ی محاسبات مربوط به این قسمت در پیوست ۳ آورده شده است.

جدول ۵-۱۱- مقدار مول گاز تولیدی از یک کارگاه UCG در لایه‌ی K10 منطقه تخت

مقدار (میلیون مول)	گاز تولیدی
۲۳۹/۷۰۸	CO <sub>2</sub>
۱۷۴/۶۰۸	H <sub>2</sub>
۳۲۳/۱۳۸	CH <sub>4</sub>
۹۱۱/۵۸۸	CO
۱۶۴۹/۰۴۲	کل گاز تولیدی

جدول ۵-۱۲- ارزش حرارتی هر یک از گازهای تولیدی از یک کارگاه UCG در لایه‌ی K10 منطقه تخت

پارامتر	مقدار (میلیون)
ارزش حرارتی گاز هیدروژن (KJ)	۴۹۹۰۲/۹۶۶
ارزش حرارتی گاز متانو اکسید کربن (KJ)	۲۵۷۹۷۹/۴۰۴
ارزش حرارتی گاز متان (KJ)	۲۸۷۸۵/۳۳۰
ارزش حرارتی گاز کربن دی اکسید (KJ)	۰
ارزش حرارتی کل گاز تولیدی (KJ)	۵۹۵۷۳۳/۷۰۰

طبق تحقیق جلالی و همکاران (۱۳۹۲) در هر ساعت ۴۳۰۰۰ متر مکعب گاز لازم است. متر مکعب گاز تولیدی از هر پهنه، در دما ۲۵ درجه سانتی گراد و فشار ۱ اتمسفر، تعداد کل پهنه مورد نیاز برای تامین این حجم از گاز سنتزی، ارزش حرارتی گاز تولیدی و سایر نتایج مورد نظر از این شبیه سازی به صورت جدول ۵-۱۳ به دست آمده است. نحوه‌ی محاسبات مربوط به این قسمت در پیوست ۳ ارائه شده است.



جدول ۵-۱۳- نتایج اجرای مدل برای یک کارگاه UCG در لایه‌ی K10 منطقه تخت

پارامتر	مقدار
مقدار کل گاز تولیدی (Kg)	$4990/29 \times 10^7$
ارزش حرارتی گاز سنتزی (Kcal/ Kg)	5964/1576
حجم گاز تولیدی ( $m^3$ ) (در دمای $25^\circ C$ و فشار 1atm)	$4/0452 \times 10^7$
نرخ گاز تولیدی ( $m^3/h$ ) (در دمای $25^\circ C$ و فشار 1atm)	5109/68
زمان کل عملیات (month)	11
تعداد کارگاه فعال به طور هم‌زمان	9

بنابراین برای تامین این حجم از گاز، باید هم‌زمان در یک دوره ۱۱ ماهه، ۹ کارگاه استخراج فعال باشد (زمان پایان عملیات در هر کارگاه ۱۱ ماه می‌باشد). طبق الگوی طراحی شده، از هر کارگاه ۵۱۰۹ متر مکعب بر ساعت و از مجموع ۹ کارگاه ۴۵۹۸۷ متر مکعب بر ساعت گاز سنتزی با ارزش حرارتی ۵۹۶۴ کیلوکالری بر کیلوگرم تولید می‌شود (پس از پایان ۱۱ ماه ۳۶۴۲۱۸۶۱۷ متر مکعب گاز سنتزی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱ اتم سفر تولید می‌شود). همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی کمی بیشتر از مقدار مورد نیاز برآورد شده است، با توجه به این که در این تحقیق نشت گاز و سایر تلفات در نظر گرفته نشده است، این مقادیر اضافه می‌تواند به عنوان جبرانی برای این تلفات تلقی شود.

با توجه به میزان کل ذخیره زغال‌سنگ در هر پهنه که ۳۸۱۹۲ تن برآورد شده است (جلالی و همکاران، ۱۳۹۲)، میزان کل ذخیره لایه K10 که ۸۴۶۲۹۲۰ تن تخمین زده شده است (گزارش اکتشافی شرکت البرز شرقی، ۱۳۸۸) و محاسبات انجام شده در این قسمت، لایه K10 می‌تواند خوراک یک نیروگاه برق ۲۷ مگاواتی سیکل ترکیبی گازی (IGCC) را به مدت ۲۲ سال تامین کند.

## ۵-۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

جلالی و همکاران (۱۳۹۲) یک الگوی گسترده برای گازی کردن زیرزمینی زغال‌سنگ لایه‌ی K10 منطقه زغالی تخت ارائه نموده‌اند. در تحقیق حاضر طراحی‌های انجام شده توسط جلالی و همکاران

توسعه داده شد. در کار ایشان فرض شده که در هر ساعت ۴۳۰۰۰ متر مکعب گاز سنتزی با ارزش حرارتی ۵۰۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم تولید شود. در تحقیق حاضر این دو فرض توسعه داده شد و پارامترهای عملیاتی برای واقعیت بخشیدن به این فرضیات به دست آمد.

نتیجه این شد که برای تامین این حجم از گاز، در یک دوره ۱۱ ماهه باید ۹ کارگاه همزمان با هم فعال باشند (برای گازی کردن زغال سنگ‌های موجود در هر کارگاه ۱۱ ماه زمان لازم است). در این مدت از هر کارگاه ۵۱۰۹ متر مکعب بر ساعت و از مجموع ۹ کارگاه ۴۵۹۸۷ متر مکعب بر ساعت گاز سنتزی با ارزش حرارتی ۵۹۶۴ کیلوکالری بر کیلوگرم تولید می‌شود. مقدار گاز مورد نیاز برای جبران نشت گاز و سایر تلفات کمی بیشتر در نظر گرفته شد.

با توجه به محاسبات انجام شده در این تحقیق، نتیجه این شد که لایه‌ی K10 می‌تواند خوراک

یک نیروگاه برق ۲۷ مگاواتی سیکل ترکیبی گازی (IGCC) را به مدت ۲۲ سال تامین کند.



## فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

## ۶-۱- نتیجه گیری

برای اجرای موفق فرآیند UCG در مقیاس تجاری به دلیل عدم دسترسی مستقیم به زیر زمین به اطلاعات دقیقی نیاز است. در این تحقیق بسیاری از اطلاعات مورد نیاز، از پژوهش‌ها و آزمایشات سایر محققان گرفته شد و به بررسی شکل و حجم کاواک پرداخته شد. پیش‌بینی دقیق شکل کاواک برای کنترل بهینه‌ی فرآیند گازی کردن، طراحی ابعاد و لنگه‌های برجای مانده در کارگاه‌های مجاور (جلوگیری از نشت گاز به کارگاه مجاور)، پیش‌بینی تعداد کارگاه مورد نیاز برای گازی کردن حداکثر زغال سنگ موجود در منطقه، مکان دقیق هر یک از چاه‌های تولید و تزریق، میزان نشت زمین و ... ضروری به نظر می‌رسد. شکل کاواک به پارامترهای زیادی وابسته است که از جمله مهمترین آن‌ها روش تبدیل به گاز کردن، سرعت تزریق اکسیدان و نوع زغال سنگ است. با توجه به اطلاعات موجود در آزمایشات دیگران، یک سری رابطه برای پیش‌بینی رشد ابعاد کاواک در روش‌های تک کاناله UCG (از جمله روش CRIP تک کاناله) معرفی شد که البته این روابط جامع نیستند زیرا مختص یک سری شرایط خاص است. در ادامه فرآیند UCG در نرم افزار COMSOL شبیه سازی شد و مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی مورد ارزیابی قرار گرفت. مهمترین نتایج و دستاوردهای حاصل از این تحقیق را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد.

- طبق مراحل این تحقیق برای تعیین نرخ رشد ابعاد کاواک و حجم کاواک در هر منطقه باید ابتدا نمونه زغال سنگ در آزمایشگاه تبدیل به گاز شود. سپس با اطلاعات به دست آمده یک مطالعه‌ی آماری برای تعیین نرخ رشد ابعاد کاواک و حجم کاواک انجام شود. در نهایت با شبیه‌سازی فرآیند توسط نرم افزار COMSOL، مقدار اکسیدان مورد نیاز در مقیاس تجاری محاسبه می‌شود.

- برای تولید گاز سنتزی با ارزش حرارتی بیشتر، به ترتیب؛ زمان عملیات، فشار کاواک، نرخ تزریق بخار آب و نرخ تزریق اکسیژن؛ بیشترین تاثیر را دارند.

- با افزایش نرخ تزریق بخار آب ( در سناریو ۲ ) اگرچه ارزش حرارتی گاز تولیدی نسبت به حالت‌های دیگر کم‌تر است اما مقدار هیدروژن موجود در گاز تولیدی به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. بنابراین برای تولید هیدروژن از فرآیند UCG باید نرخ تزریق بخار آب را افزایش داد. به طور مثال در سناریو ۲ در این تحقیق نسبت تزریق بخار آب به اکسیژن حدود ۱۲ برابر شده است. و در نهایت ۹/۲ میلیون متر مکعب گاز هیدروژن در دمای ۱۲۷۳ کلوین و فشار ۱ مگاپاسکال تولید شده است.

- در شبیه‌سازی انجام شده مقدار و اجزای گاز تولیدی پیش از اجرای عملیات UCG در مقیاس تجاری قابل پیش‌بینی است. بنابراین علاوه بر امکان بررسی‌های فنی، امکان تحلیل‌های اقتصادی وجود دارد.

- در مدل ارائه شده در این تحقیق، امکان تحلیل حساسیت برای هر یک از پارامترهای عملیاتی در مقیاس تجاری وجود دارد. بنابراین برای اجرای فرآیند UCG در هر منطقه با توجه به مشخصات زمین شناسی زغال‌سنگ در آن منطقه، می‌توان پارامترهای عملیاتی بهینه را با این مدل پیدا کرد.

- برای مطالعه‌ی موردی انجام شده (لایه‌ی K10 منطقه تخت)، نتیجه این شد که برای تامین خوراک یک نیروگاه برق ۲۷ مگاواتی، باید ۹ کارگاه همزمان با هم فعال باشند و برای گازی کردن زغال‌سنگ‌های موجود در هر کارگاه ۱۱ ماه زمان لازم است. در این مدت از هر کارگاه ۵۱۰۹ متر مکعب بر ساعت و از مجموع ۹ کارگاه ۴۵۹۸۷ متر مکعب بر ساعت گاز سنتزی با ارزش حرارتی ۵۹۶۴ کیلوکالری بر کیلوگرم تولید می‌شود. مقدار کل گاز سنتزی مورد نیاز و همچنین ارزش حرارتی آن، کمی بیشتر از مقدار مورد نیاز برآورد شد، این کار برای جبران نشت گاز از کارگاه‌ها و سایر تلفات تلقی شد. در ادامه با توجه به محاسبات انجام شده، نتیجه این شد که لایه‌ی K10 می‌تواند خوراک یک نیروگاه برق ۲۷ مگاواتی سیکل ترکیبی گازی (IGCC) را به مدت ۲۲ سال تامین کند.

## ۶-۲- پیشنهادات

- اگرچه برای این تحقیق یک اعتبارسنجی مقدماتی انجام شد ولی برای اطمینان کامل از مدل ارائه شده، پیشنهاد می شود همه‌ی اطلاعات لازم به شرح قسمت ۴-۹ این متن، برای یک مجموعه‌ی واقعی UCG جمع‌آوری شود و پس از انجام شبیه‌سازی، نتایج با واقعیت مقایسه شود.

- مدل ارائه شده در این تحقیق فقط با وجود تزریق اکسیژن و بخار آب جواب می‌دهد. با تزریق هوا، به دلیل تاثیر گاز نیتروژن، واکنش‌های شیمیایی تحت تاثیر قرار گرفته و با آنچه در این تحقیق بیان شده متفاوت خواهد بود. پیشنهاد می‌شود بر روی تاثیر گاز نیتروژن (با تزریق هوا به عنوان اکسیدان) بر فرآیند UCG تحقیق شود.

- در این تحقیق مقدار و ارزش حرارتی گاز تولیدی با تحلیل حساسیت برای ۴ مورد از پارامترهای عملیاتی بررسی شد. بدین صورت که با فرض ثابت بودن همه‌ی پارامترها و تغییر تنها یکی از ۴ پارامتر مذکور ارزش حرارتی گاز تولیدی در ۴ سناریو مختلف با هم مقایسه شد. با توجه به این که امکان تغییر همزمان این پارامترها وجود دارد به عنوان نمونه چند سناریو ترکیبی هم بررسی شد. اما با توجه به این که بیشمار حالت ترکیبی دیگر هم می‌توان در نظر گرفت، پیشنهاد می‌شود با تغییر همه‌ی پارامترهای عملیاتی به طور همزمان بر روی تولید گاز سنتزی با بیشترین ارزش حرارتی تحقیق شود تا نهایتاً یک نسبت بهینه بین پارامترهای عملیاتی برای تولید گاز سنتزی با بیشترین ارزش حرارتی به دست آید.

- اطلاعات زمین شناسی مربوط به لایه‌ی زغالی K10 منطقه تخت محدود است. پیشنهاد می‌شود برای اجرای عملیات UCG در این منطقه ابتدا این اطلاعات کامل شود. یکی از مهمترین آن‌ها مقدار و اجزای مواد فرار موجود در این لایه‌ی زغالی می‌باشد.

- وضعیت آب‌های زیرزمینی و رطوبت لایه‌ی زغال به شدت بر روی واکنش‌های شیمیایی درون کاواک و در نتیجه ارزش حرارتی گاز تولیدی تاثیر می‌گذارد. پیشنهاد می‌شود وضعیت آب‌شناسی

منطقه‌ی تخت (لایه‌ی K10) در فصول مختلف بررسی شود و اطلاعات آن به طور دقیق جمع‌آوری شود. نهایتاً اگر این اطلاعات به طور دقیق در دسترس باشد در هنگام اجرای فرآیند UCG در این منطقه، می‌توان در زمان‌هایی که رطوبت لایه زیاد است نرخ تزریق بخار آب را کاهش داد و در زمان‌هایی که مقدار آن کمتر از حد مورد نیاز است، نرخ تزریق بخار آب را افزایش داد تا نتیجه‌ی مطلوب حاصل شود.



# منابع و مآخذ

## منابع به ترتیب حروف الفبای فارسی و انگلیسی:

جلالی، سید محمد اسماعیل، نجفی، مهدی و کاکایی، رضا، ۱۳۹۲. «پیش امکان سنجی کاربرد روش گاز کردن زیرزمینی زغالسنگ (UCG) برای تولید برق؛ مطالعه‌ی موردی، منطقه‌ی زغالی تخت». مجله‌ی نظام مهندسی معدن، شماره ۱۹.

جوکار، امین، ۱۳۹۵. «امکان‌سنجی مقدماتی به کارگیری روش استخراج هیدرولیکی برای حوضه‌های زغالی ایران؛ مطالعه‌ی موردی: منطقه زغالی مزینو طبس». سومین کنگره ملی زغال‌سنگ، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

حسینی، مهدی، ۱۳۸۶. «تعیین میزان قابلیت مکانیزاسیون لایه‌های زغال‌سنگ با استفاده از منطق فازی، مطالعه‌ی موردی: معدن زغال‌سنگ تخت». پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

روح‌الهی، احمد، جلیلی، سیف‌الله، سمیعی، دوست‌محمد و ارشدی، نعمت‌الله، ۱۳۹۵. «شیمی ۳ و آزمایشگاه». شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ایران، چاپ چهاردهم.

شایان‌مهر، محسن، قائمی، احد و نظری، مهدی، ۱۳۹۳. «مهندسی واکنش‌های شیمیایی با استفاده از نرم‌افزار Comsol Multiphysics». انتشارات اندیشه‌سرا، تهران، ایران.

شهبازی، محمد رضا، ۱۳۹۵. «تحلیل ترمومکانیکی پایداری چاه‌های تزریق و تولید در روش تبدیل به گاز کردن زغال‌سنگ در زیر زمین»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

گزارش اکتشافی شرکت البرز شرقی، ۱۳۸۸. «گزارش پایان اکتشاف منطقه زغالدار تخت»، شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی، شاهرود، ایران.

لطفی‌آزاد، علی‌اصغر، ۱۳۹۱. «مدل‌سازی و تحلیل نشت گاز از کارگاه استخراج زیرزمینی تبدیل زغال‌سنگ به گاز (UCG)، مطالعه‌ی موردی: معادن زغال‌سنگ طبس»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

لطفی‌آزاد، علی‌اصغر، جلالی، سید محمد اسماعیل و رمضان زاده، احمد، ۱۳۹۱. «تدوین پارامترهای طراحی فرآیند گاز کردن زیرزمینی زغالسنگ (UCG)»، اولین کنگره ملی زغال‌سنگ ایران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

موسوی، محمد، ۱۳۹۰. «تحلیل پایداری کارگاه‌های استخراج UCG، مطالعه‌ی موردی معدن زغال سنگ تخت»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

نجفی، مهدی، ۱۳۹۳. «مدل‌سازی ترمودینامیکی برای تعیین ابعاد پهنه‌های استخراجی در روش گازکردن زیرزمینی زغالسنگ»، رساله‌ی دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

یزدی، محمد، ۱۳۸۸. «زغال سنگ (از منشاء تا اثرات زیست محیطی)»، جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، چاپ دوم.

Andrianopoulos, E., Korre, A., & Durucan, S. (2015). Chemical process modelling of underground coal gasification and evaluation of produced gas quality for end use. *Energy Procedia*, 76, 444-453.

Ball, D. W. (2011). *Beginning chemistry*.  
<https://2012books.lardbucket.org/books/beginning-chemistry/>. Page 382: 389 and 316.

Beath, A., & Mallet, C. (2006). *UCG modeling*. CSIRO Exploration & Mining, and Carbon Energy Pvt.

Biezen, E. (1996). *Modeling underground coal gasification*. Delft University of Technology.

Biezen, E. N. J., Bruining, J., & Molenaar, J. (1995, January). An integrated 3D model for underground coal gasification. In *SPE annual technical conference and exhibition*. Society of Petroleum Engineers.

Blinderman, M. S., & Klimenko, A. Y. (2007). Theory of reverse combustion linking. *Combustion and Flame*, 150(3), 232-245.

Blinderman, M. S., Saulov, D. N., & Klimenko, A. Y. (2008). Forward and reverse combustion linking in underground coal gasification. *Energy*, 33(3), 446-454.

Britten, J. A., & Thorsness, C. B. (1989). *CAVSIM. Underground Coal Gasification Program (No. ESTSC--000773IBMPC00; NESC--9515)*. Lawrence Livermore National Lab., CA (United States).

Burton, E., Friedmann, J., & Upadhye, R. (2006). *Best practices in underground coal gasification*, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA.

Chang, H. L., Edgar, T. F., & Himmelblau, D. M. (1985). A sweep efficiency model for underground coal gasification. In *Situ*; (United States), 9(2).

Couch, G. R. (2009). *Underground Coal Gasification*. IEA Clean Coal Centre, <http://www.iea-coal.org.uk>.

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.

Daggupati, S., Mandapati, R. N., Mahajani, S. M., Ganesh, A., Pal, A. K., Sharma, R. K., & Aghalayam, P. (2011, A). Compartment modeling for flow characterization of underground coal gasification cavity. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(1), 277-290.

Daggupati, S., Mandapati, R. N., Mahajani, S. M., Ganesh, A., Sapru, R. K., Sharma, R. K., & Aghalayam, P. (2011, B). Laboratory studies on cavity growth and product gas composition in the context of underground coal gasification. *Energy*, 36(3), 1776-1784.

Dinsmoor, B., Galland, J. M., & Edgar, T. F. (1978). The modeling of cavity formation during underground coal gasification. *Journal of Petroleum Technology*, 30(05), 695-704.

Glaser, R. R., & Johnson Jr, L. A. (1985). THREE-DIMENSIONAL LABORATORY SIMULATION OF THE PRESSURE DEPENDENCY OF UCG. DOE, Morgantown Energy Technology center. USA. (P. 3).

Harloff, G. J. (1983). Underground coal gasification cavity growth model. *Journal of Energy*, 7(5), 410-415.

Haynes, W. M. (Ed.). (2014). *CRC handbook of chemistry and physics*. CRC press.

Laciak, M., Kostúr, K., Durdán, M., Kačur, J., & Flegner, P. (2016). The analysis of the underground coal gasification in experimental equipment. *Energy*, 114, 332-343.

Luo, J. A., Wang, L., Tang, F., He, Y., & Zheng, L. (2011). Variation in the temperature field of rocks overlying a high-temperature cavity during underground coal gasification. *Mining Science and Technology (China)*, 21(5), 709-713.

Luo, Y., Coertzen, M., & Dumble, S. (2009, December). Comparison of UCG cavity growth with CFD model predictions. In *Proceedings of the 7th International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia* (pp. 9-11).

Najafi, M., Jalali, S. M. E., KhaloKakaie, R., & Forouhandeh, F. (2015). Prediction of cavity growth rate during underground coal gasification using multiple regression analysis. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2(4), 318-324.

Nitao, J., Buscheck, T., Ezzedine, S., Friedman, S., & Camp, D. (2010). An integrated 3-D UCG model for prediction cavity growth, Production Gas, and Interaction with the Host Environment. *27th Annual Int. pittsburgh Coal Conference, Istanbul, Turkey*.

Nitao, J. J., Camp, D. W., Buscheck, T. A., White, J. A., Burton, G. C., Wagoner, J. L., & Chen, M. (2011). Progress on a new integrated 3-D UCG simulator and its initial application (No. LLNL-CONF-500551). Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, CA.

- Nourozieh, H., Kariznovi, M., Chen, Z., & Abedi, J. (2010). Simulation study of underground coal gasification in Alberta reservoirs: geological structure and process modeling. *Energy & Fuels*, 24(6), 3540-3550.
- Perkins, G. M. P. (2005). *Mathematical modelling of underground coal gasification* (p. 257). University of New South Wales.
- Perkins, G., Saghafi, A., & Sahajwalla, V. (2003). Numerical modeling of underground coal gasification and its application to Australian coal seam conditions. School of Material Science and Engineering, University of New South Wales, Sydney, Australia.
- Perkins, G., & Sahajwalla, V. (2006). A numerical study of the effects of operating conditions and coal properties on cavity growth in underground coal gasification. *Energy & Fuels*, 20(2), 596-608.
- Perkins, G., & Sahajwalla, V. (2008). Steady-state model for estimating gas production from underground coal gasification. *Energy & Fuels*, 22(6), 3902-3914.
- Prabu, V., & Jayanti, S. (2011). Simulation of cavity formation in underground coal gasification using bore hole combustion experiments. *Energy*, 36(10), 5854-5864.
- Robert, F., & Joseph, W. (1996). *In situ gasification and combustion of coal*. H.Hartman, SME Handbook. Inc. Littleton Colorado. Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
- Samdani, G., Aghalayam, P., Ganesh, A., Sapru, R. K., Lohar, B. L., & Mahajani, S. (2016). A process model for underground coal gasification–Part-I: Cavity growth. *Fuel*, 181, 690-703.
- Sarraf Shirazi, A. (2012). CFD Simulation of underground coal gasification. In *Masters Abstracts International* (Vol. 51, No. 03).
- Smit, H., Werner, G.J. (1976), “Coal Conversion Technology”, London. Noyes Data Corporation.
- Su, F., Nakanowataru, T., Itakura, K. I., Ohga, K., & Deguchi, G. (2013). Evaluation of structural changes in the coal specimen heating process and UCG model experiments for developing efficient UCG systems. *Energies*, 6(5), 2386-2406.
- Thompson, T. W., Menezes, J. J., & Gray, K. E. (1977, January). Roof Stability and Subsidence in In Situ Gasification of Coal. In *The 18th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association.
- Wiatowski, M., Kapusta, K., Ludwik-Pardała, M., & Stańczyk, K. (2016). Ex-situ experimental simulation of hard coal underground gasification at elevated pressure. *Fuel*, 184, 401-408.
- Wilks, I. H. C. (1983). The cavity produced by gasifying thin deep seams. In *Annual underground coal gasification symposium*. 9 (pp. 314-322).

[www.bitumen.loxblog.com/post/191](http://www.bitumen.loxblog.com/post/191)

[www.lincenergy.com](http://www.lincenergy.com)

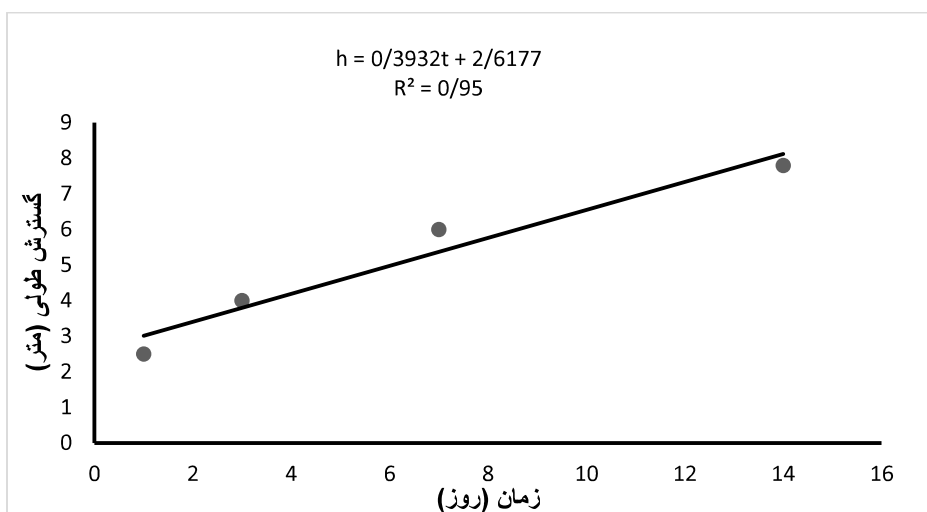
Yang, L. (2004). Study on the model experiment and numerical simulation for underground coal gasification. *Fuel*, 83(4), 573-584.

Żogała, A., & Janoszek, T. (2015). CFD simulations of influence of steam in gasification agent on parameters of UCG process. *Journal of Sustainable Mining*, 14(1), 2-11.

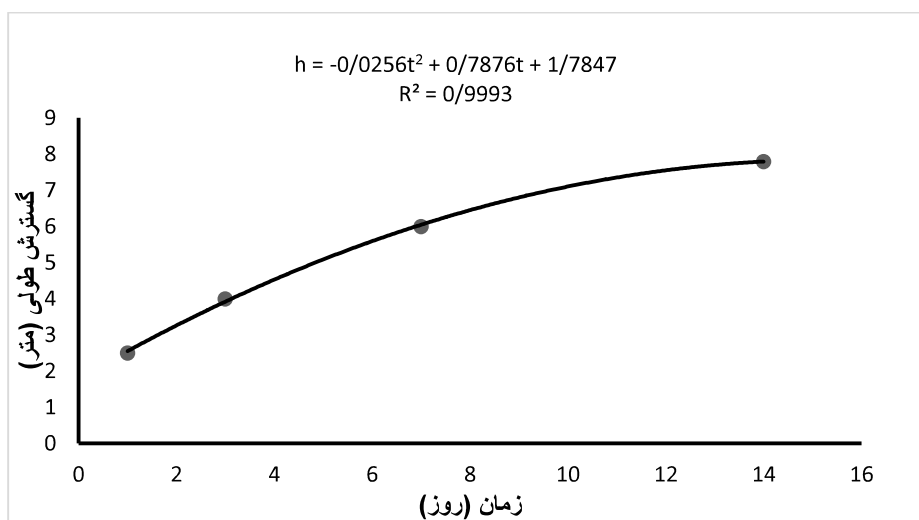
# پیوست‌ها

پیوست شماره ۱- نمودارها و معادلات مربوط به مطالعه‌ی آماری

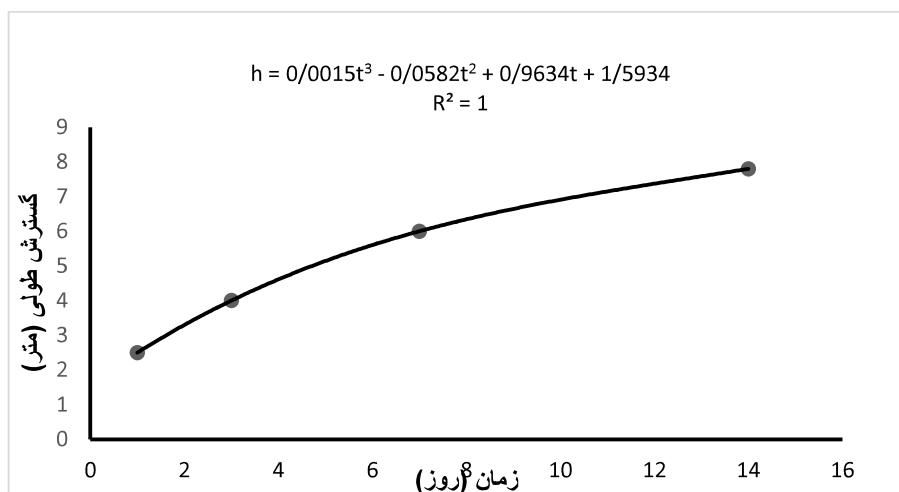
۱-۱- نمودارها و معادلات مربوط به نرخ گسترش طولی (h) نسبت به زمان



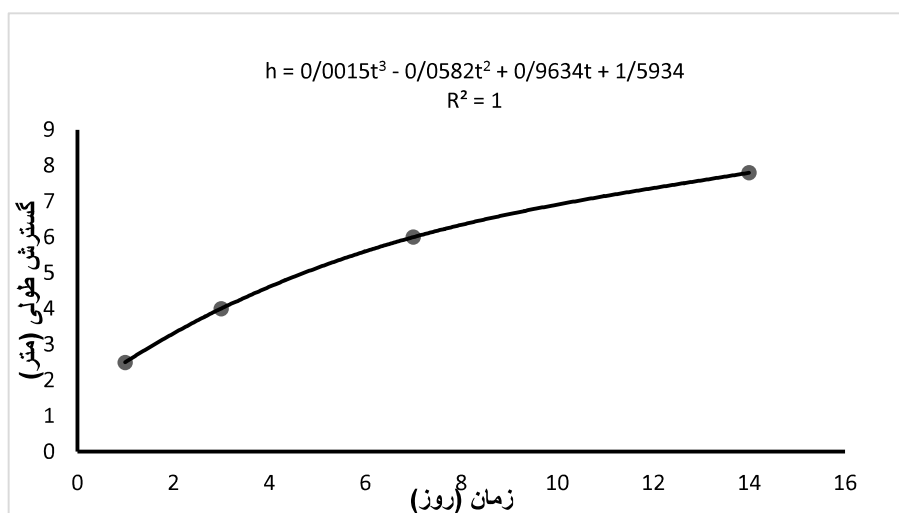
نمودار تابع خطی و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش طولی (h)



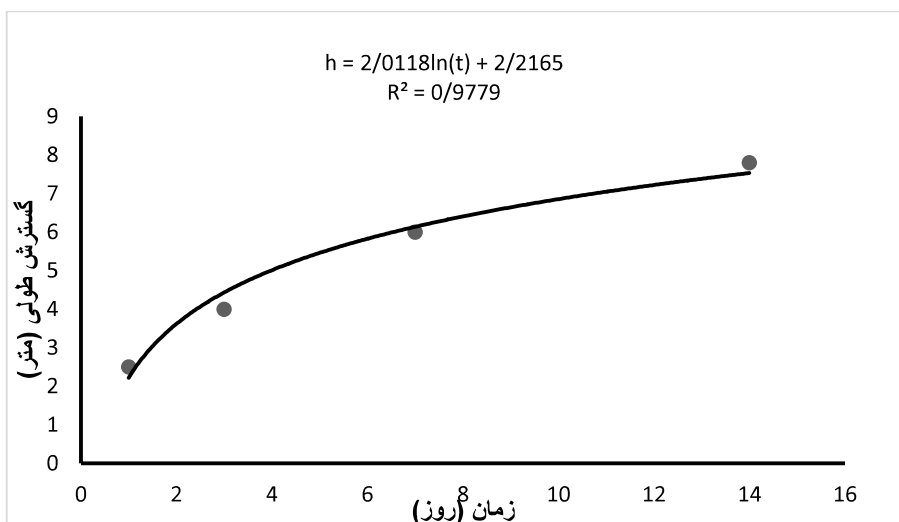
نمودار تابع چند جمله‌ای درجه ۲ و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش طولی (h)



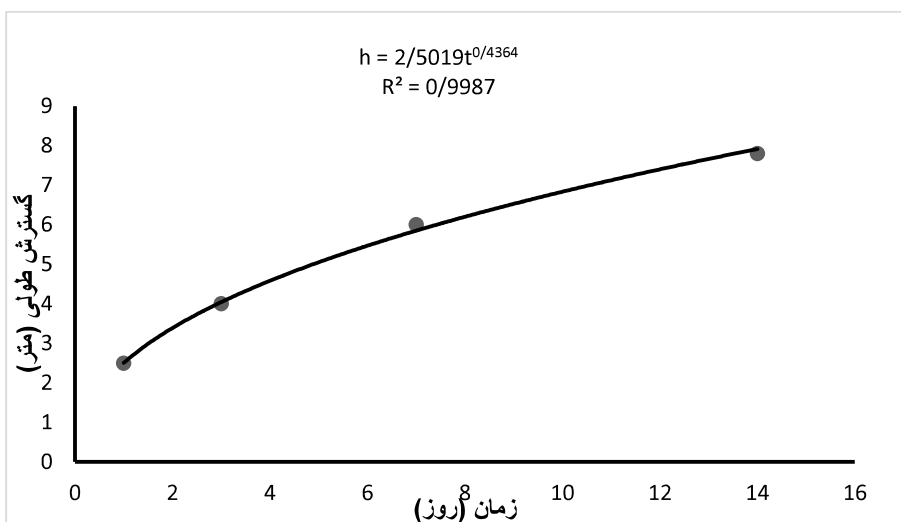
(h) نمودار تابع چند جمله‌ای درجه ۳ و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش طولی



(h) نمودار تابع چند جمله‌ای درجه ۴ و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش طولی

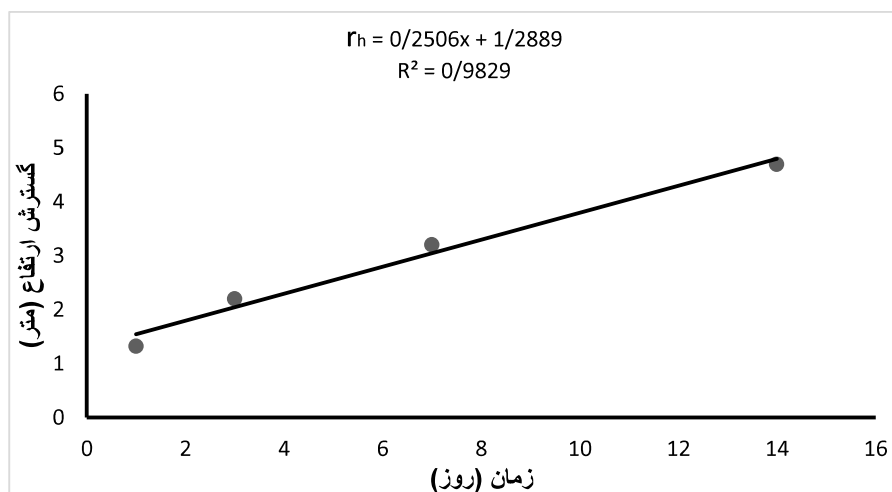


(h) نمودار تابع لگاریتمیک و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش طولی

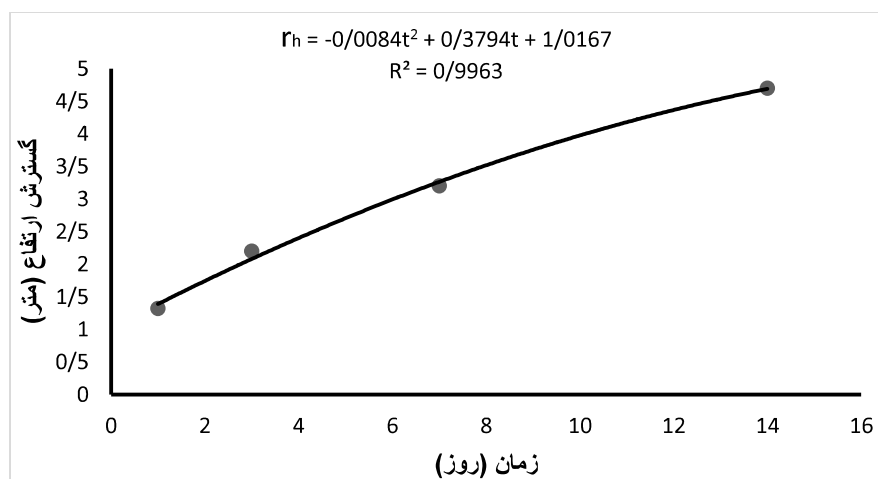


نمودار تابع نیرو و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش طولی (h)

## ۲-۱- نمودارها و معادلات مربوط به نرخ گسترش ارتفاع (r<sub>h</sub>) نسبت به زمان

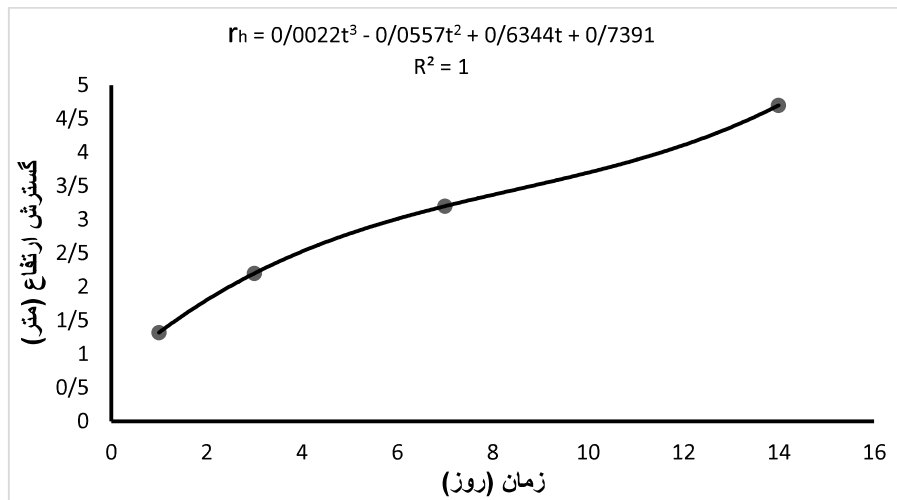


نمودار تابع خطی و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش ارتفاع (r<sub>h</sub>)

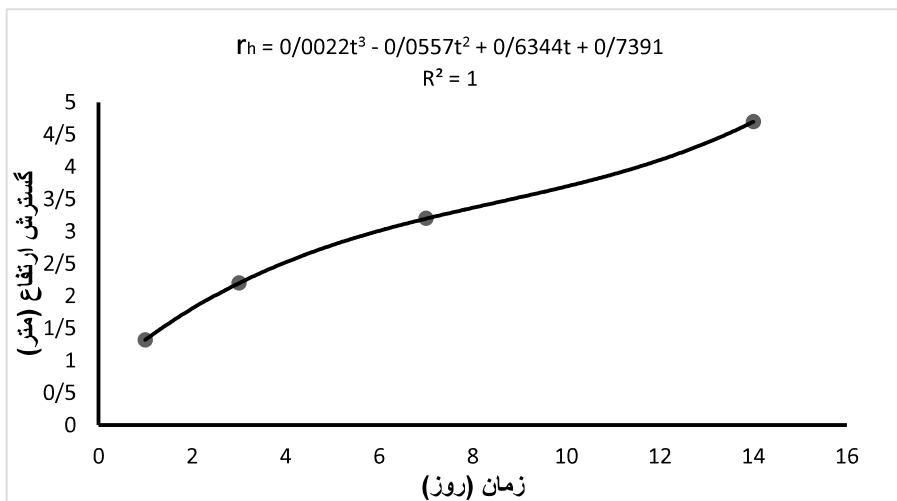


نمودار تابع چند جمله‌ای درجه ۲ و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش ارتفاع (r<sub>h</sub>)

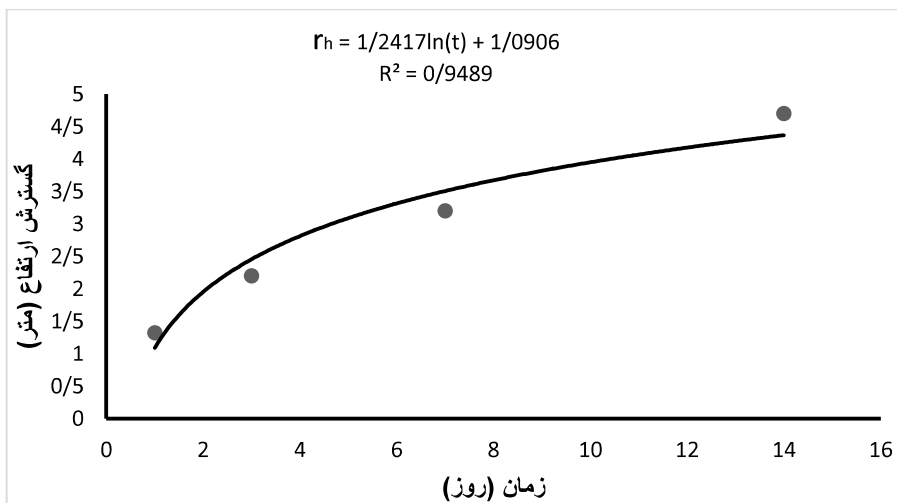




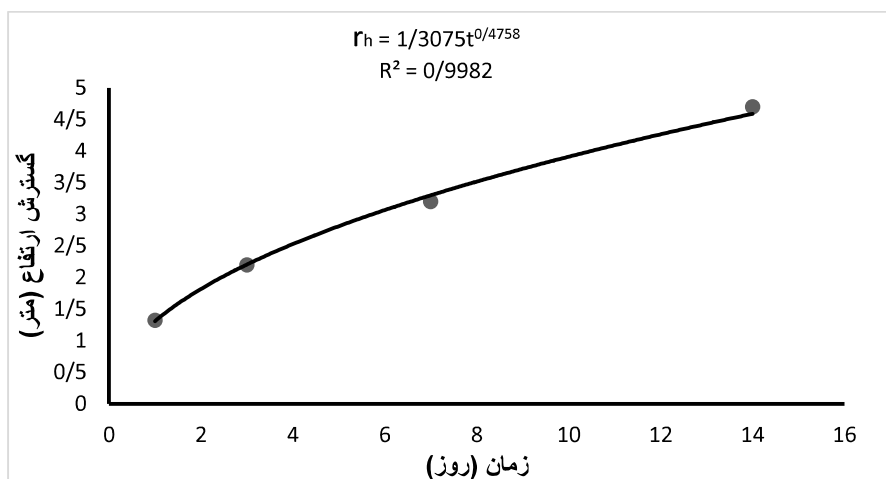
نمودار تابع چند جمله‌ای درجه ۳ و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش ارتفاع ( $r_h$ )



نمودار تابع چند جمله‌ای درجه ۴ و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش ارتفاع ( $r_h$ )

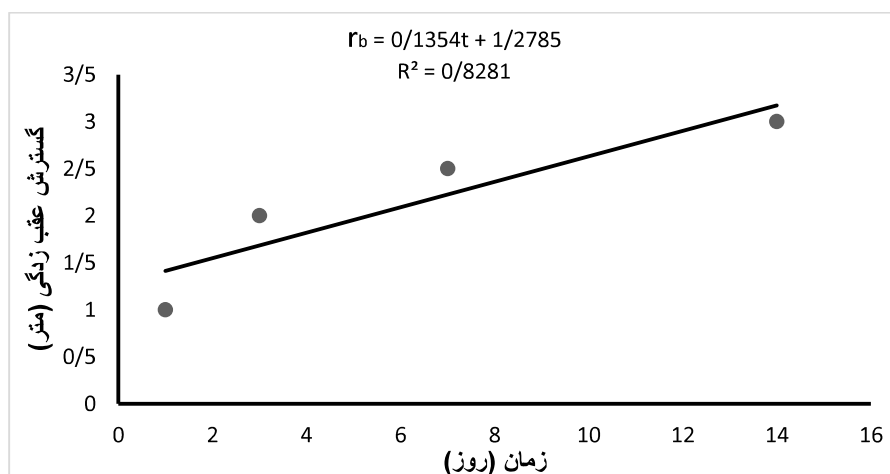


نمودار تابع لگاریتمیک و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش ارتفاع ( $r_h$ )

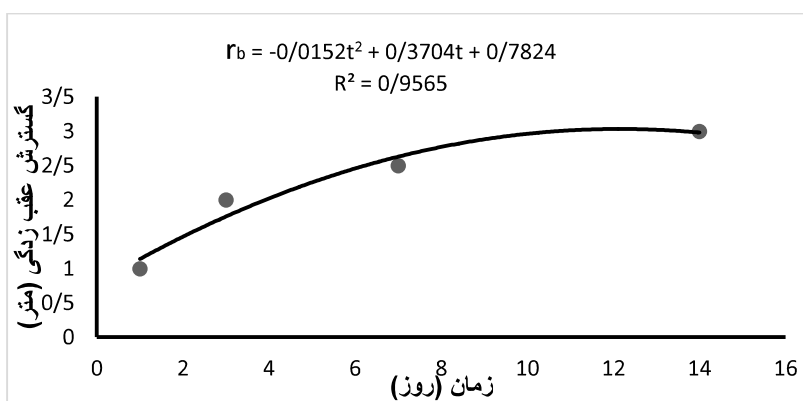


نمودار تابع نیرو و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش ارتفاع ( $r_h$ )

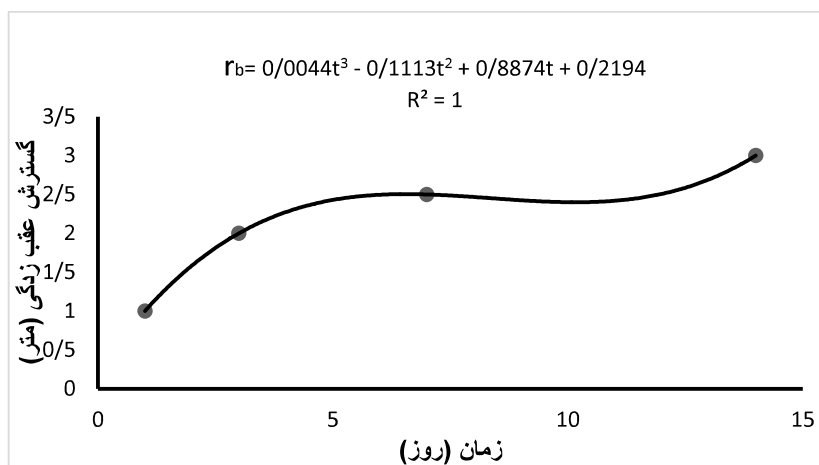
### ۱-۳- نمودارها و معادلات مربوط به نرخ گسترش عقب‌زدگی ( $r_b$ ) نسبت به زمان



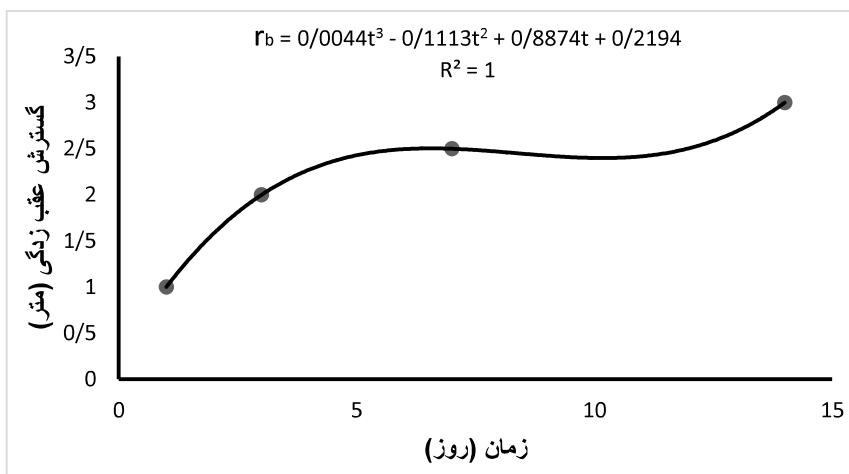
نمودار تابع خطی و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عقب‌زدگی ( $r_b$ )



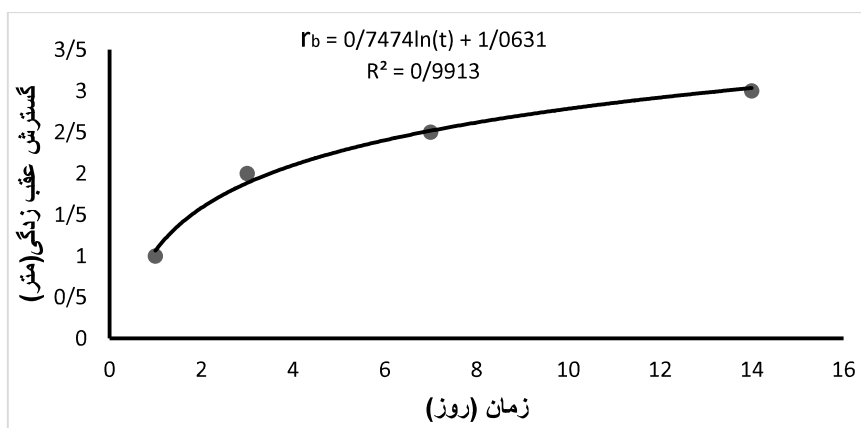
نمودار تابع چند جمله‌ای درجه ۲ و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عقب‌زدگی ( $r_b$ )



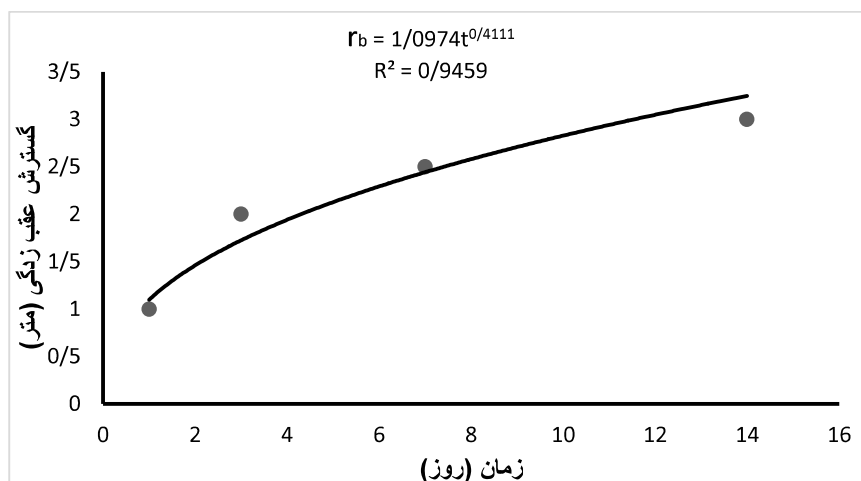
نمودار تابع چند جمله‌ای درجه ۳ و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عقب‌زدگی ( $r_b$ )



نمودار تابع چند جمله‌ای درجه ۴ و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عقب‌زدگی ( $r_b$ )

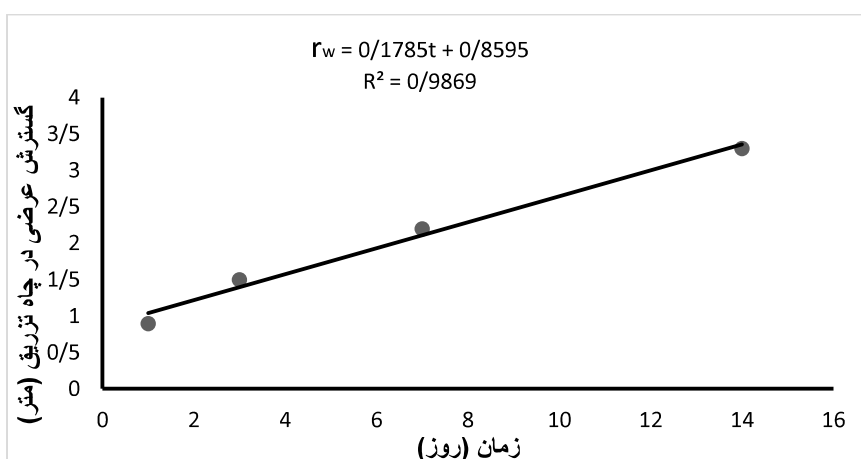


نمودار تابع لگاریتمیک و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عقب‌زدگی ( $r_b$ )

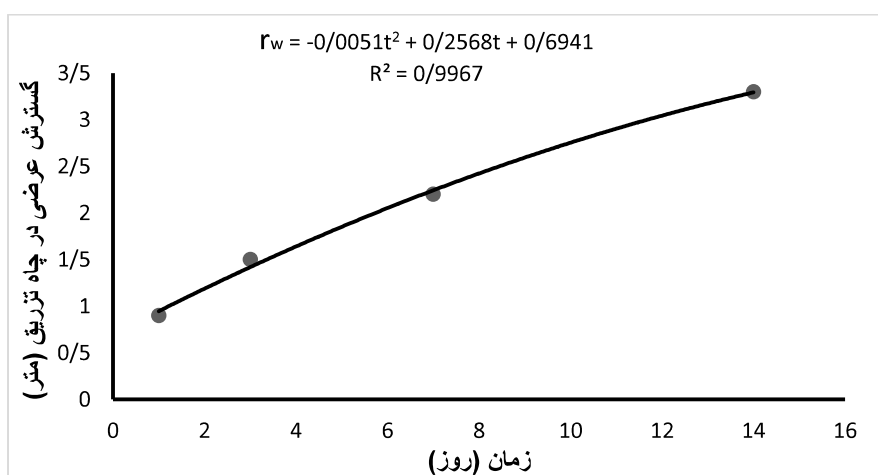


نمودار تابع نیرو و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عقب‌زدگی ( $r_b$ )

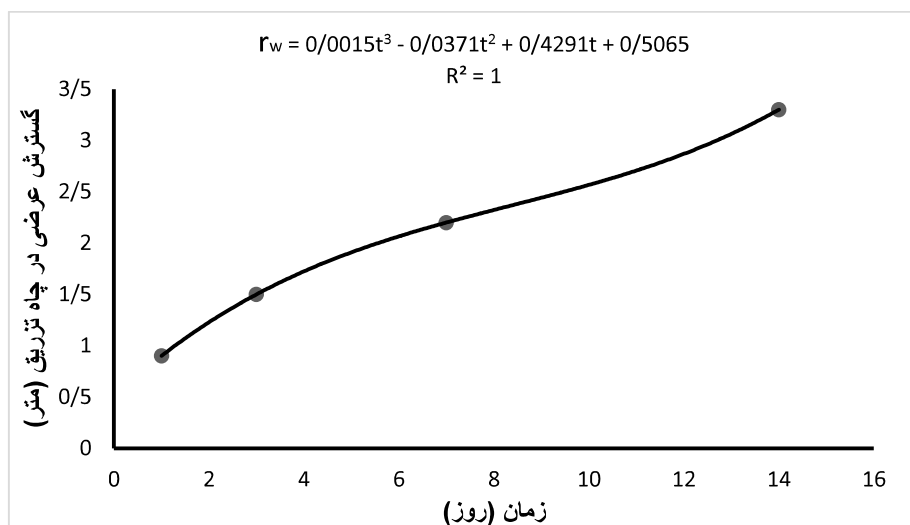
#### ۱-۴- نمودارها و معادلات مربوط به نرخ گسترش عرضی در چاه تزریق ( $r_w$ ) نسبت به زمان



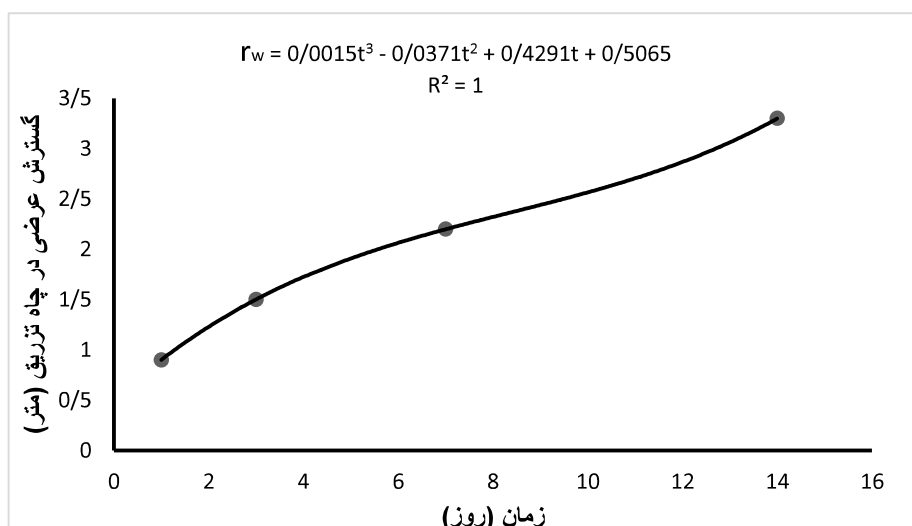
نمودار تابع خطی و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عرضی در چاه تزریق ( $r_w$ )



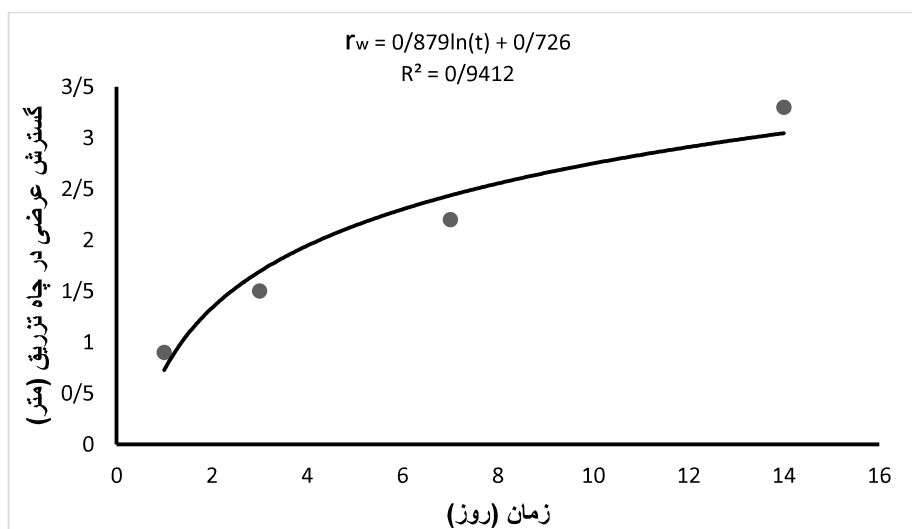
نمودار تابع چند جمله‌ای درجه ۲ و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عرضی در چاه تزریق ( $r_w$ )



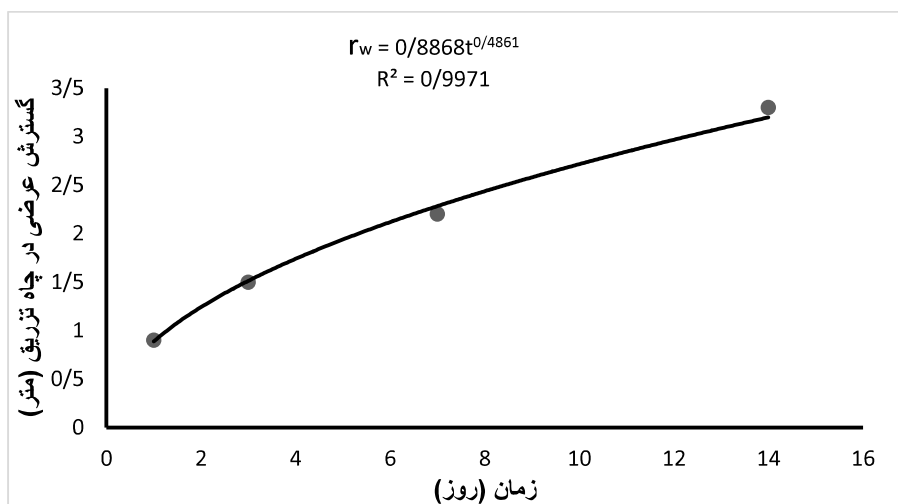
نمودار تابع چند جمله‌ای درجه ۳ و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عرضی در چاه تزریق ( $r_w$ )



نمودار تابع چند جمله‌ای درجه ۴ و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عرضی در چاه تزریق ( $r_w$ )

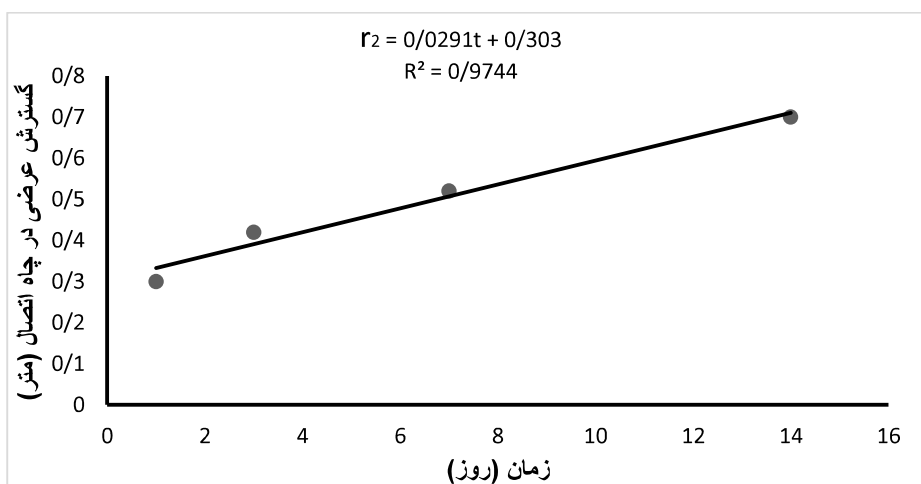


نمودار تابع لگاریتمیک و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عرضی در چاه تزریق ( $r_w$ )

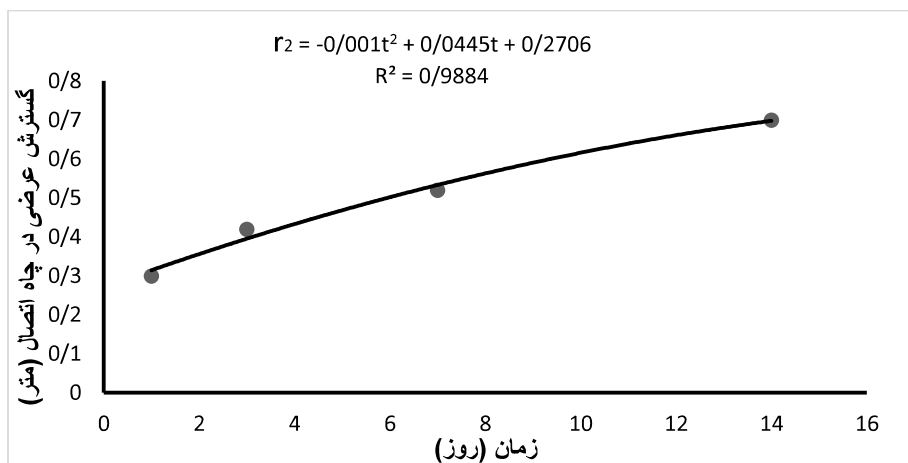


نمودار تابع نیرو و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عرضی در چاه تزریق ( $r_w$ )

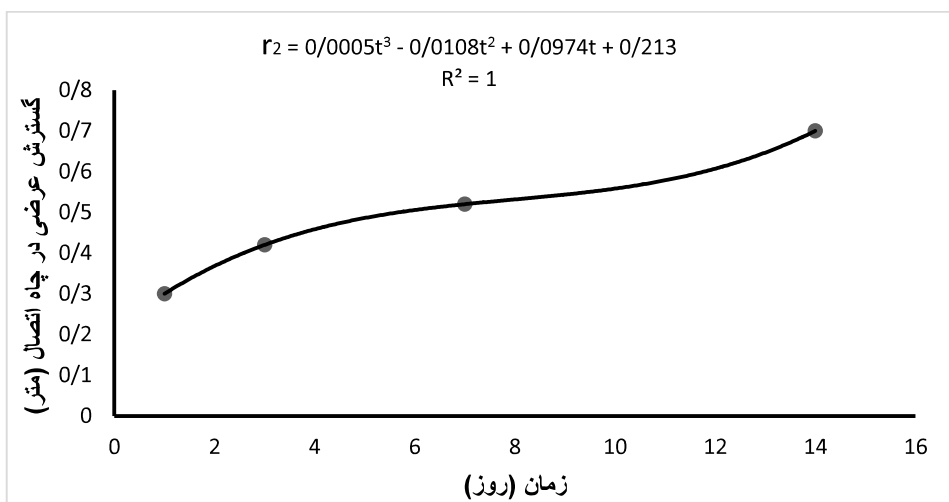
### ۱-۵- نمودارها و معادلات مربوط به نرخ گسترش عرضی در چاه اتصال ( $r_2$ ) نسبت به زمان



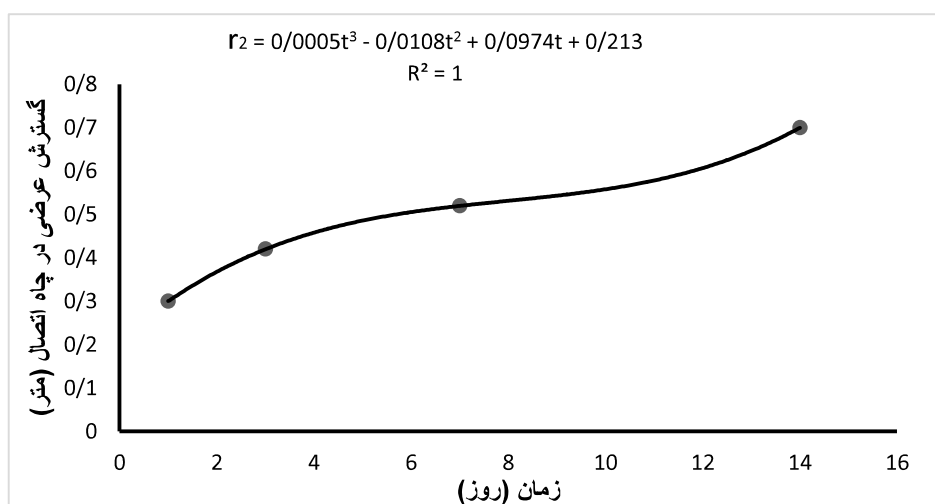
نمودار تابع خطی و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عرضی در چاه اتصال ( $r_2$ )



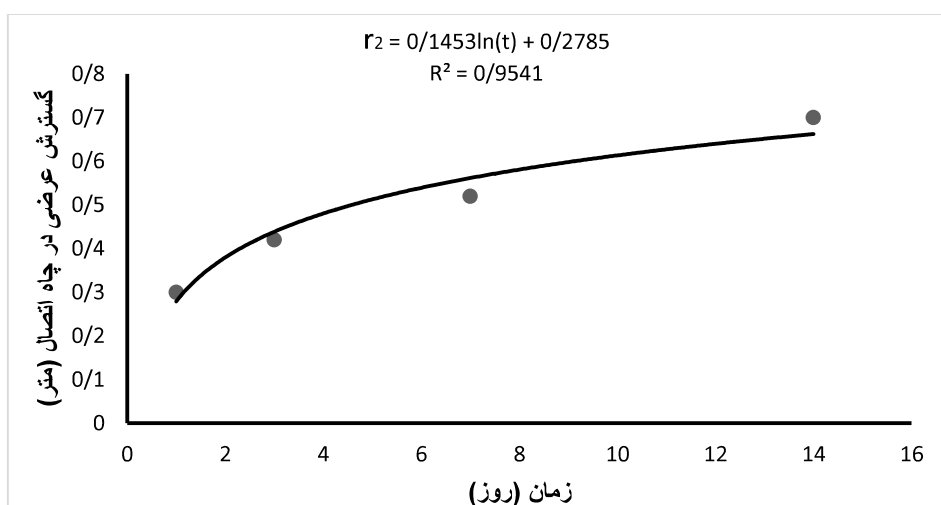
نمودار تابع چند جمله‌ای درجه ۲ و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عرضی در چاه اتصال ( $r_2$ )



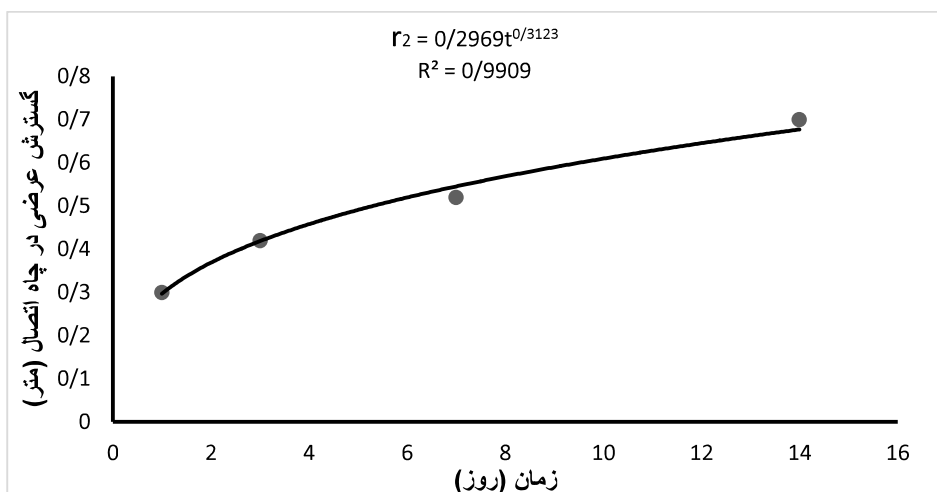
نمودار تابع چند جمله‌ای درجه ۳ و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عرضی در چاه اتصال ( $r_2$ )



نمودار تابع چند جمله‌ای درجه ۴ و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عرضی در چاه اتصال ( $r_2$ )

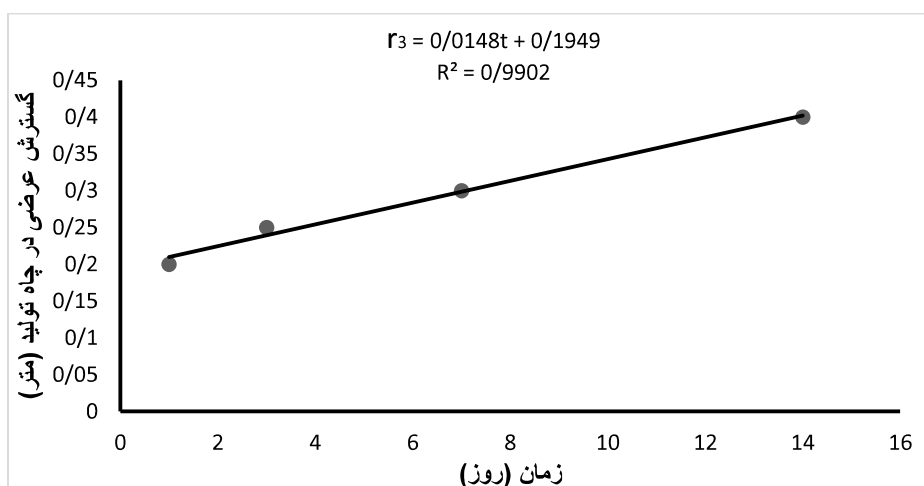


نمودار تابع لگاریتمیک و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عرضی در چاه اتصال ( $r_2$ )

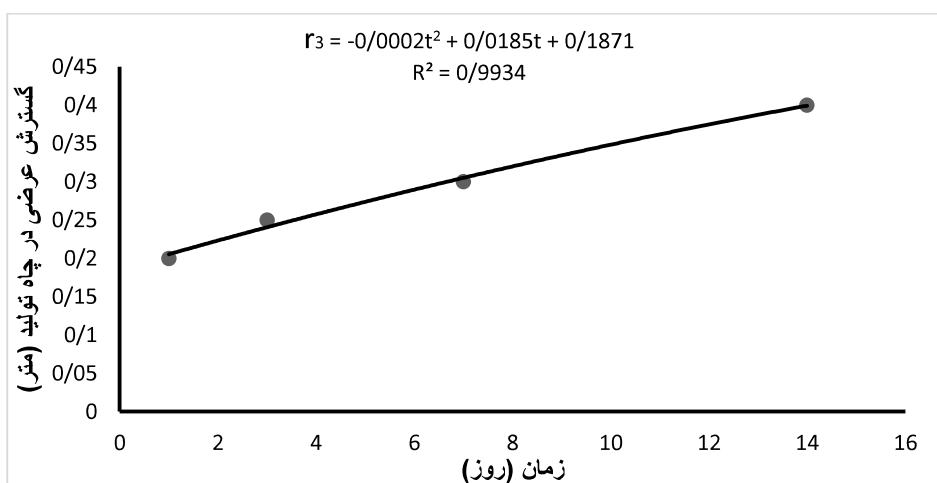


نمودار تابع نیرو و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عرضی در چاه اتصال (r<sub>2</sub>)

### ۶-۱- نمودارها و معادلات مربوط به نرخ گسترش عرضی در چاه تولید (r<sub>3</sub>) نسبت به زمان

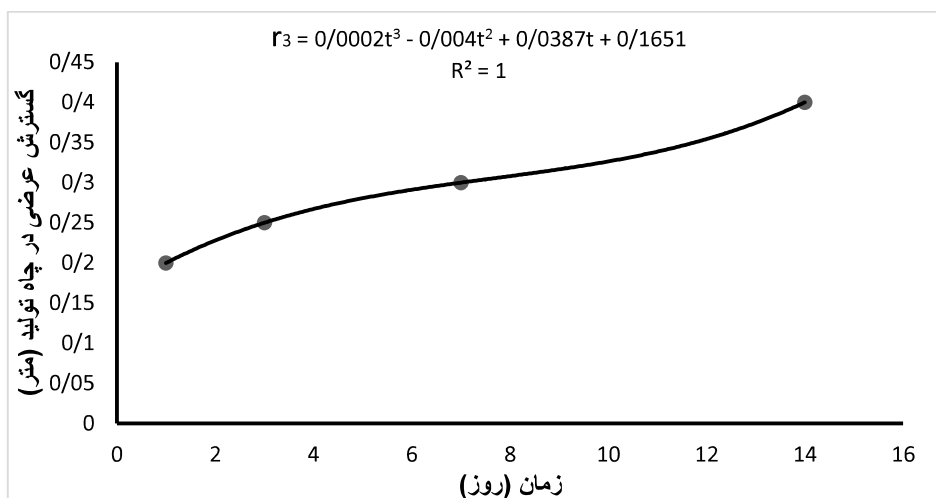


نمودار تابع خطی و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عرضی در چاه تولید (r<sub>3</sub>)

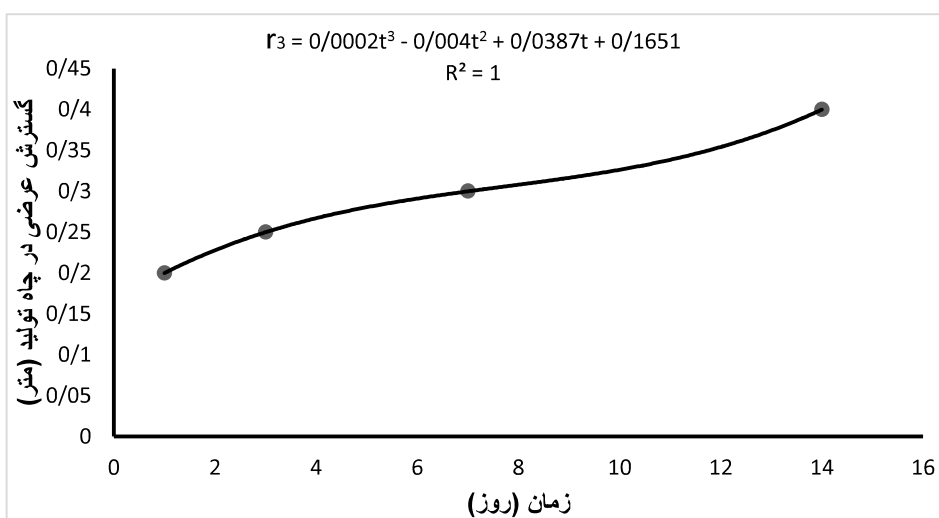


نمودار تابع چند جمله‌ای درجه ۲ و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عرضی در چاه تولید (r<sub>3</sub>)

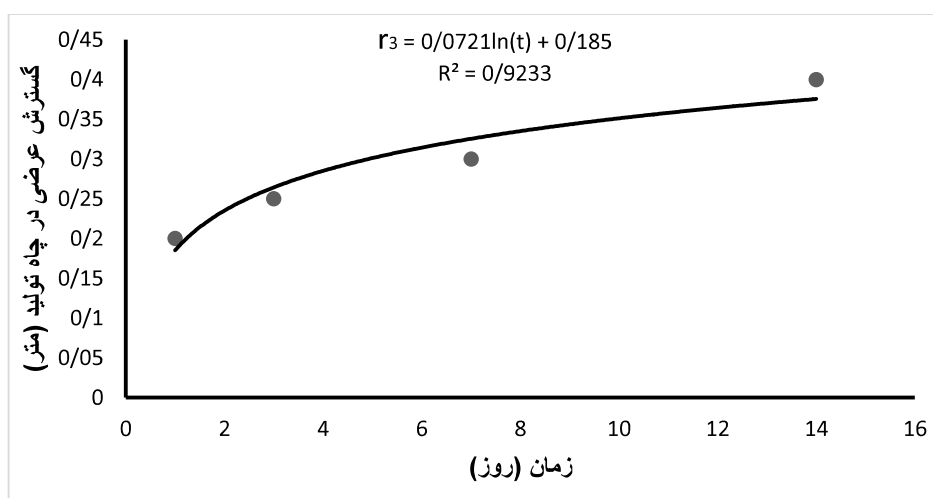




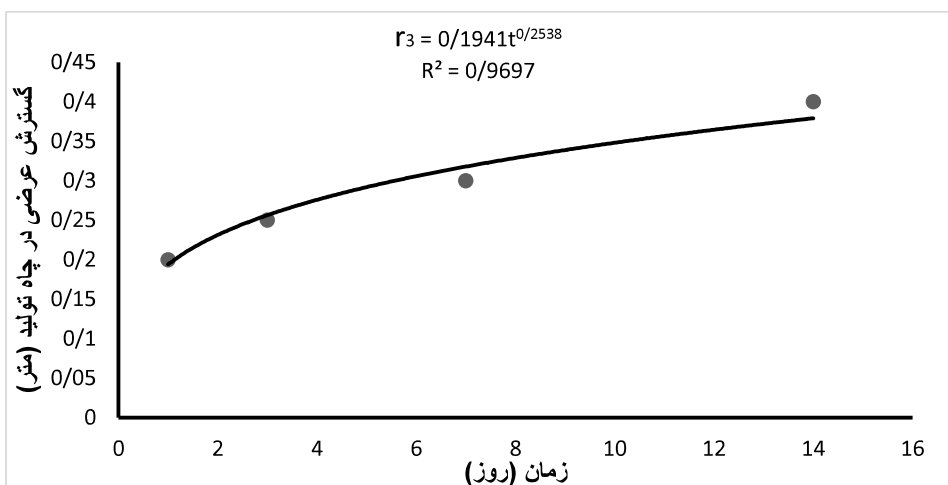
نمودار تابع چند جمله‌ای درجه ۳ و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عرضی در چاه تولید ( $r_3$ )



نمودار تابع چند جمله‌ای درجه ۴ و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عرضی در چاه تولید ( $r_3$ )

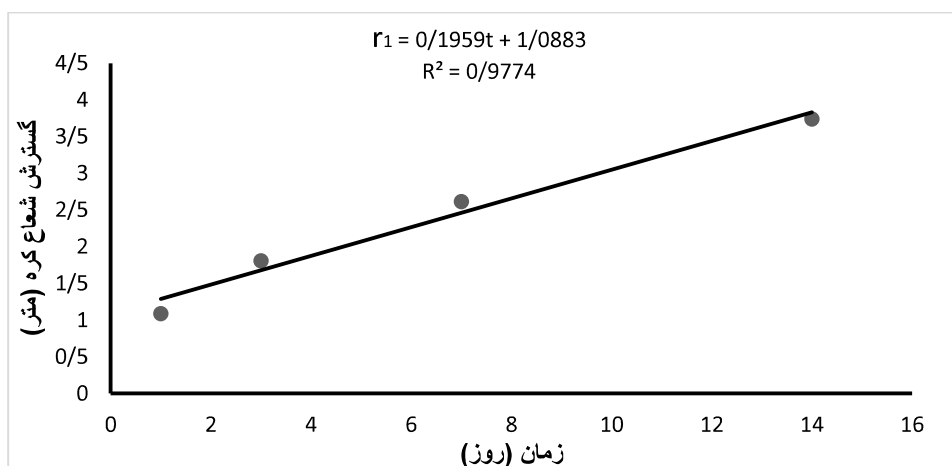


نمودار تابع لگاریتمیک و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عرضی در چاه تولید ( $r_3$ )

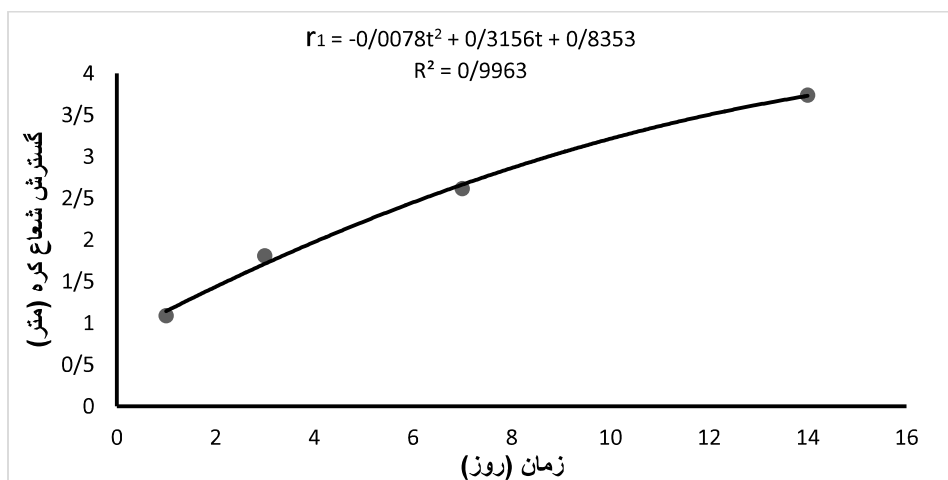


نمودار تابع نیرو و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش عرضی در چاه تولید ( $r_3$ )

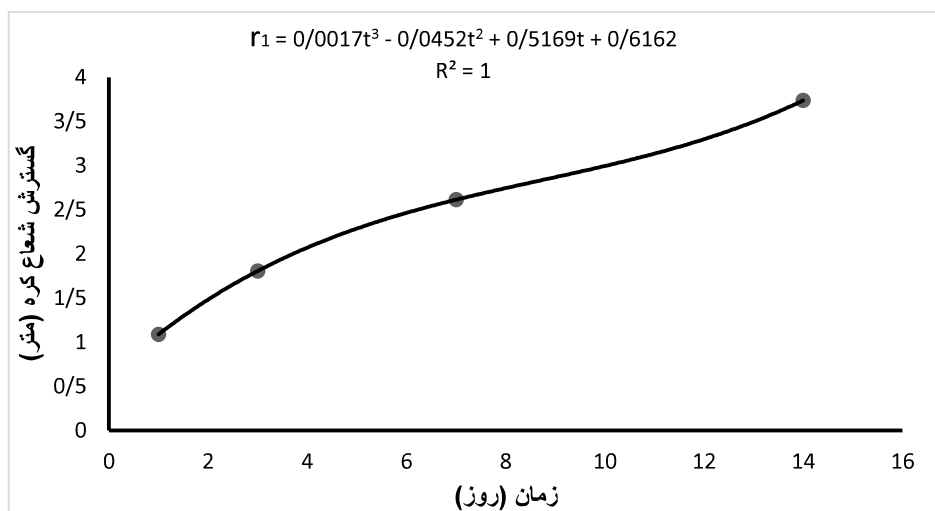
### ۷-۱- نمودارها و معادلات مربوط به نرخ رشد شعاع کره مفروض ( $r_1$ ) نسبت به زمان



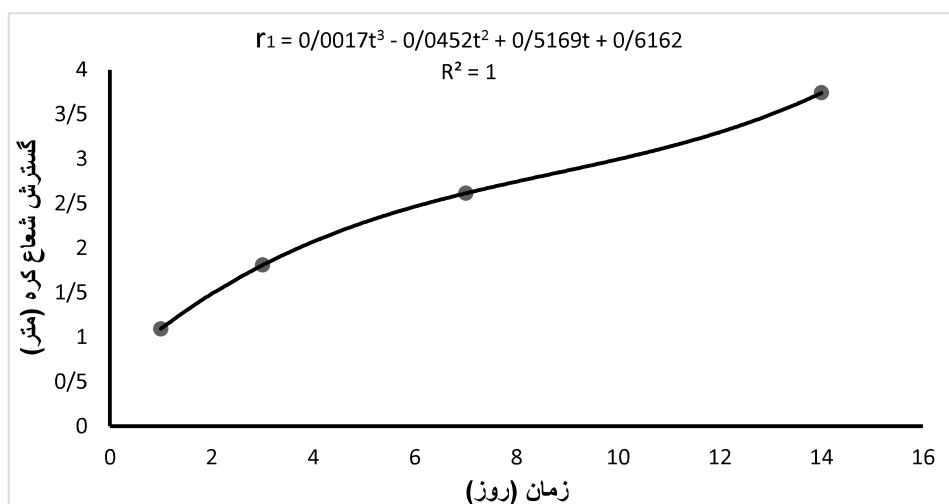
نمودار تابع خطی و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش شعاع کره مفروض ( $r_1$ )



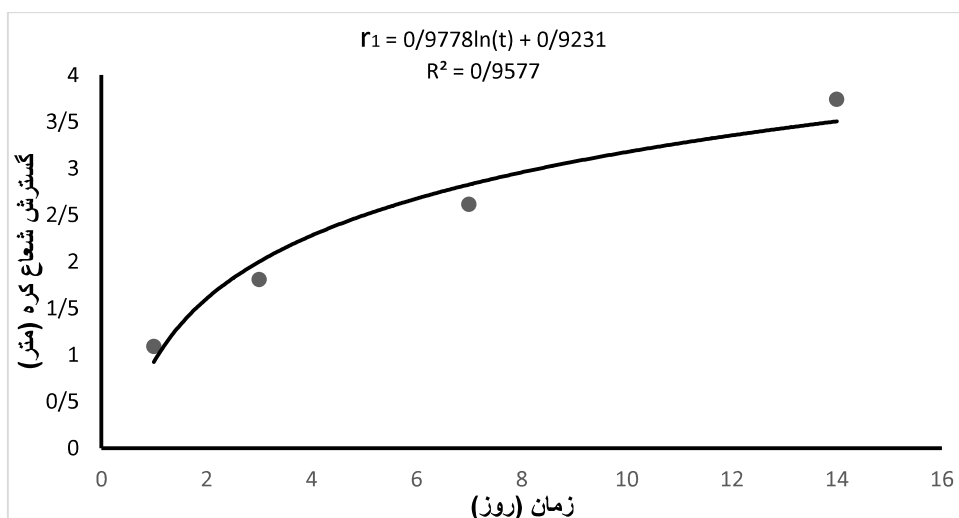
نمودار تابع چند جمله‌ای درجه ۲ و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش شعاع کره مفروض ( $r_1$ )



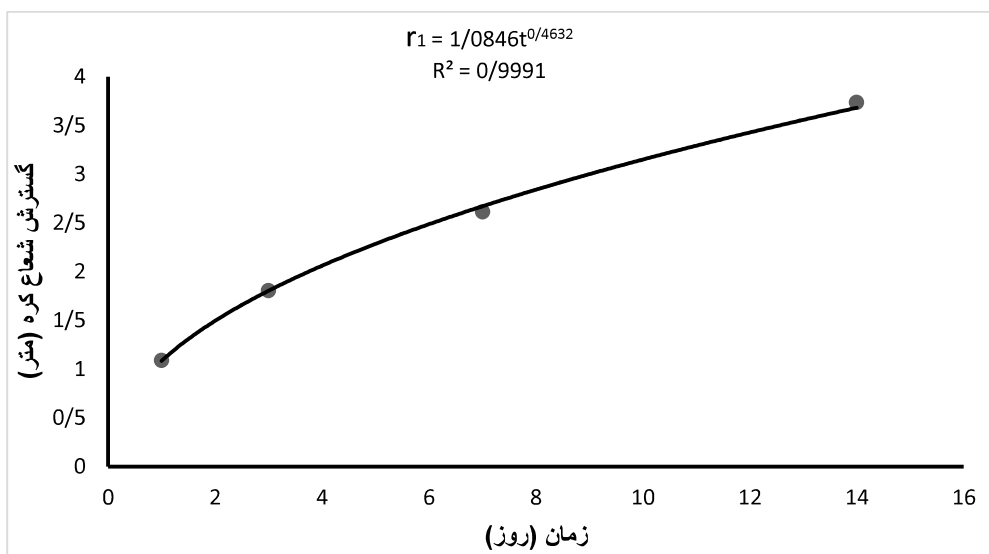
نمودار تابع چند جمله‌ای درجه ۳ و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش شعاع کره مفروض (f1)



نمودار تابع چند جمله‌ای درجه ۴ و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش شعاع کره مفروض (f1)



نمودار تابع لگاریتمیک و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش شعاع کره مفروض (f1)



نمودار تابع نیرو و معادله‌ی آن برای پیش‌بینی نرخ گسترش شعاع کره مفروض (I<sub>1</sub>)

پیوست شماره ۲- محاسبات مربوط به عناصر موجود در کاواک

$$\rho=m/v \rightarrow m=\rho v=1.4 \times 12335.4890=17269.4846 \text{ ton}_{\text{coal}}$$

$$C_{\text{fix}}=17269.4846 \times 0.383=6614.2892 \text{ ton}_c$$

$$\text{mol}_C = 6614.2892 \text{ ton}_c \times 10^6 \text{ gc}/1 \text{ ton}_c \times 1 \text{ mol}_c/12.011 \text{ gc} = 550.6860 \times 10^6 \text{ mol}_c$$

$$\text{H}_2\text{O}_{\text{fix}}=17269.4846 \text{ ton}_{\text{coal}} \times 0.07=1208.8639 \text{ ton}_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$\text{mol}_{\text{H}_2\text{O}}=1208.8639 \text{ ton}_{\text{H}_2\text{O}} \times 10^6 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/1 \text{ ton}_{\text{H}_2\text{O}} \times 1 \text{ mol}_{\text{H}_2\text{O}}/18.015 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}} = 67.103 \times 10^6 \text{ mol}_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$\text{mol}_{\text{CH}_4}=17269.4846 \text{ ton}_{\text{coal}} \times 0.10 \times 10^6 \text{ g}_{\text{CH}_4}/1 \text{ ton}_{\text{CH}_4} \times 1 \text{ mol}_{\text{CH}_4}/16.043 \text{ g}_{\text{CH}_4} = 107.6450 \times 10^6 \text{ mol}_{\text{CH}_4}$$

$$\text{mol}_{\text{CO}_2}=17269.4846 \text{ ton}_{\text{coal}} \times 0.084 \times 10^6 \text{ g}_{\text{CO}_2}/1 \text{ ton}_{\text{CO}_2} \times 1 \text{ mol}_{\text{CO}_2}/44.009 \text{ g}_{\text{CO}_2} = 32.9623 \times 10^6 \text{ mol}_{\text{CO}_2}$$

$$\text{mol}_{\text{CO}}=17269.4846 \text{ ton}_{\text{coal}} \times 0.07 \times 10^6 \text{ g}_{\text{CO}}/1 \text{ ton}_{\text{CO}} \times 1 \text{ mol}_{\text{CO}}/28.010 \text{ g}_{\text{CO}} = 43.1583 \times 10^6 \text{ mol}_{\text{CO}}$$

پیوست شماره ۳- نحوه‌ی محاسبات برای به دست آوردن ارزش حرارتی گاز سنتزی از هر کارگاه در لایه‌ی K10 منطقه تخت

$$\text{Heating value of H}_2 = 285.8 \text{ Kj/mol} \times 17.46 \times 10^7 \text{ mol} = 4990.29 \times 10^7 \text{ KJ}$$

$$\text{Heating value of CO} = 283.0 \text{ Kj/mol} \times 91.15 \times 10^7 = 25797.94 \times 10^7 \text{ KJ}$$

$$\text{Heating value of CH}_4 = 890.8 \text{ kj/mol} \times 32.31 \times 10^7 = 28785.13 \times 10^7 \text{ KJ}$$

$$\text{Heating value of CO}_2 = 0$$

$$\text{Total heating value} = 59573.37 \times 10^7 \text{ KJ}$$

$$\begin{aligned} \text{Total amount of produced gas (Kg)} &= 23.97 \times 10^7 \text{ mol CO}_2 \times 44.01 \times 10^{-3} \text{ kg/mol} + \\ &17.46 \times 10^7 \text{ mol H}_2 \times 2.01 \times 10^{-3} \text{ kg/mol} + 91.15 \times 10^7 \text{ mol CO} \times 28.01 \times 10^{-3} \text{ kg/mol} + \\ &32.31 \times 10^7 \text{ mol CH}_4 \times 16.04 \times 10^{-3} \text{ kg/mol} = 1054.94 \times 10^4 + 35.19 \times 10^4 + 2553.36 \times 10^4 + \\ &518.39 \times 10^4 = 4161.90 \times 10^4 \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$\text{Heating value of syngas} = 14.31 \times 10^3 \text{ kj/kg} \times 1 \text{ kcal/} 2.4 \text{ kj} = 5964.15 \text{ kcal/ kg}$$

$$\rho = \frac{N \times P}{R \times T} = \frac{1 \times 101000 \text{ Pa}}{8.314 \times 298 \text{ K}} = 40.76 \text{ mol/m}^3$$

$$\text{Amount of produced gas} = 164.90 \times 10^7 \text{ mol} \times 1 \text{ m}^3 / 40.76 \text{ mol} = 4.04 \times 10^7 \text{ m}^3$$

$$\text{Rate of produced gas} = \frac{4.04 \times 10^7 \text{ m}^3}{2.85 \times 10^7 \text{ s}} = 1.42 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 5109.68 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\text{Total Time of operations} = 10.99 \text{ month} = 11 \text{ mah}$$

$$\text{Number of need panel} = \frac{43000}{5109.69} = 8.41 = 9$$

## Abstract

In recent decades, science has been developing rapidly and mining is no exception too. Nowadays, new methods are introduced and designed for mining that are not part of the traditional surface and underground methods. One of these is the underground coal gasification (UCG) method. Coal due to its special chemical composition, can be change to oil or gas, and it is one of the most important sources of energy in the world. To start operations in each project, it requires to have a series of previous design and planning to take control of the operation. In the UCG method because of the lack of direct personnel access to the underground, this matter is more important. Also, due to the influence of various parameters on the successful implementation of this process and its complexity, the scientific gaps in this method is not completely solved as yet, and there is no complete information available for carrying out this operation on a commercial scale. One of the most important scientific gaps in this method is the lack of knowledge necessary to predict the shape and volume of the created cavity in underground and the amount and heating value of produced gas on a commercial scale. In this research, these two important issues have been discussed separately. At the first section, given the assumptive shape of the cavity in the single channel methods and the existing information in other's experiments, a series of equations have been introduced to predict the growth of cavity dimensions over time. Then a numerical modeling is developed by the COMSOL software to predict the volume of cavity. This model shows that volume of cavity is precisely predictable before start of UCG process. In the next section, by simulating the chemical reactions using the COMSOL software, it is possible to predict the amount and heating value of produced gas on commercial scale. Result of this model show that for producing syngas with more heating value; operating time, cavity pressure, steam injection rate and oxygen injection rate have the most positive effect, respectively. Finally, a case study was conducted for the K10 coal seam of takht area (in Iran). The Results show that to supply feed a power plant with power of 27 megawatt, for 22 years, 9 stopes must be active simultaneously. During of this period, amount of produced syngas from each stope is  $5109 \text{ m}^3/\text{s}$  and from 9 stopes is  $45987 \text{ m}^3/\text{s}$ , and heating value of syngas is  $5964.1575 \text{ kcal/kg}$ .

**Keywords:** Underground Coal Gasification (UCG); Numerical simulation; Cavity growth rate; Amount of produced gas; Heating value of syngas; K10 coal seam of takht a



Faculty of mining Eng., petroleum and geophysics

Msc Thesis in mine exploitation

Numerical simulation of cavity growth rate during underground coal gasification (UCG) in Controlled Retraction Injection Point (CRIP) method on a commercial scale

By: Amin Jowkar

Supervisors:

Dr Farhang Sereshki

Dr Mehdi Najafi

September 2017