



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
*«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»*

---

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

***«ΥΠΟΓΕΙΑ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΛΙΓΝΙΤΙΚΩΝ  
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ»***

**Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή**

*Ρόζα Αγλαΐα*

**Επιβλέπων**

**Κακαράς Εμμανουήλ, Καθηγητής, Τομέας Θερμότητας**

---

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2018



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1° .....	11
1.1 Παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες .....	11
1.2 Η θέση του γαιάνθρακα στην παγκόσμια αγορά ενέργειας .....	12
1.3 Σχηματισμός των γαιανθράκων .....	14
1.4 Ενανθράκωση, Βιτουμενοποίηση και Κατάταξη γαιανθράκων .....	14
1.5 Εξόρυξη και παραγωγή γαιάνθρακα .....	19
1.5.1 Επιφανειακές μέθοδοι εξόρυξης και σχεδιασμός .....	19
1.5.1.1 Εξόρυξη με την μέθοδο των ορθών βαθμίδων .....	20
1.5.2 Υπόγειες μέθοδοι εξόρυξης.....	22
1.5.2.1 Μέθοδος θαλάμου και στύλου .....	22
1.5.2.2 Εξόρυξη Longwall .....	23
1.5.3 Μέθοδοι επί τόπου εξόρυξης – In Situ .....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2° .....	26
2.1 Εισαγωγή .....	26
2.2 Ιστορική αναδρομή UCG .....	26
2.3 Ανάλυση της μεθόδου UCG .....	28
2.3.1 Υπόγειες μέθοδοι αεριοποίησης γαιάνθρακα .....	31
2.3.2 Μέθοδος θαλάμου και ροής .....	31
2.3.4 Μέθοδος απότομης κλίνης.....	35
2.3.5 Μέθοδος ελεγχόμενης απομάκρυνσης του σημείου έγχυσης.....	35
2.3.6 Μέθοδος μεγάλης σήραγγας (Long tunnel method) .....	38
2.4. Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της διαδικασίας της αεριοποίησης.....	39
2.4.1 Επίδραση του οξειδωτικού.....	42
2.4.2 Επίδραση των ιδιοτήτων του βαθμού του γαιάνθρακα .....	44
2.4.3 Επίδραση του βάθους του κοιτάσματος γαιάνθρακα .....	47
2.4.4 Επίδραση του πάχους του κοιτάσματος του γαιάνθρακα.....	48
2.4.5 Επίδραση της κλίμακας του έργου της UCG.....	49
2.4.6 Επίδραση του σχεδιασμού του υπόγειου αεριοποιητή .....	51
2.4.7 Επίδραση των συνθηκών της γεωλογικής θέσης του έργου.....	55
2.5 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	57
2.5.1. Επιπτώσεις στο επιφανειακό περιβάλλον .....	57
2.5.2. Η ρύπανση των υπογείων υδάτων .....	58
2.5.2.1 Γεωλογική και υδρογεωλογική αξιολόγηση.....	63
2.5.3 Εκπομπές αερίων που αφορούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου.....	63

2.5.4 Δέσμευση και Αποθήκευση Άνθρακα (Carbon Capture Storage - CCS).....	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> .....	66
3.1. Εισαγωγή.....	66
3.2. Πηγές διοξειδίου του άνθρακα για μελλοντική δέσμευση του.....	66
3.3. Διαδικασίες δέσμευσης CO <sub>2</sub> .....	68
3.3.1 Διαχωρισμός καυσαερίων – Δέσμευση μετά την καύση.....	68
3.3.2 Καύση με χρήση oxy-fuel .....	69
3.3.3 Δέσμευση Προ-Καύσης .....	70
3.4. Αποθήκευση CO <sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς.....	70
3.4.1. Εξαντλημένα κοιτάσματα πετρελαίου και αερίου .....	71
3.4.2 Ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου .....	71
3.4.3 Μη εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα γαιανθράκων.....	72
3.4.4 Αλατούχοι σχηματισμοί σε μεγάλα βάθη.....	72
3.5 Αποθήκευση CO <sub>2</sub> σε κοιλάτη της μεθόδου UCG.....	72
3.5.1 Μοντελοποίηση της ανάπτυξης κοιλοτήτων .....	72
3.5.2 Σκοπιμότητα γεωμηχανικής και περιβαλλοντικής μοντελοποίησης.....	76
3.6 UCG και CCS.....	78
3.6.1 Υδρογεωλογικό μοντέλο - Επιλογή των γεωλογικών θέσεων με αξιοποίηση των υδρογεωλογικών πληροφοριών .....	78
3.6.2 Εκτίμηση της δυνατότητας να εφαρμοστεί η UCG σε συνδυασμό με την αποθήκευση CO <sub>2</sub> .....	79
3.6.3 Μηχανικές διεργασίες UCG και αποθήκευσης CO <sub>2</sub> .....	82
3.6.3.1 Τεχνικά θέματα των γεωτρήσεων για UCG και αποθήκευση CO <sub>2</sub> .....	82
3.6.3.2 Σχεδιασμός γεωτρήσεων για UCG και η προσαρμογή για έγχυση και αποθήκευση CO <sub>2</sub> .....	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> .....	87
4.1 Προσδιορισμός των νομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών απαιτήσεων που συνδέονται με τις αρχές για τη βιώσιμη ανάπτυξη .....	87
4.2 SWOT Ανάλυση - Ελπίδες και δυνητικοί κίνδυνοι για την απόληψη του καυσίμου από την υπόγεια αεριοποίηση του γαιάνθρακα.....	88
4.4 Μειονεκτήματα της τεχνολογίας UCG σε σύγκριση με την παραδοσιακή εξόρυξη γαιάνθρακα.....	91
4.5 Δυνατότητες της τεχνολογίας UCG σε σύγκριση με την παραδοσιακή εξόρυξη γαιάνθρακα .....	92
4.6 Κίνδυνοι της τεχνολογίας UCG σε σύγκριση με την παραδοσιακή εξόρυξη γαιάνθρακα .....	92
4.7 Αποτελέσματα ανάλυσης SWOT.....	93
4.7.1 Σχέσεις μεταξύ των πλεονεκτημάτων και των δυνατοτήτων.....	93
4.7.2 Σχέσεις μεταξύ των πλεονεκτημάτων και των κινδύνων .....	93
4.7.3 Σχέσεις μεταξύ των μειονεκτημάτων και των ευκαιριών .....	93
4.7.4 Σχέσεις μεταξύ των αδυναμιών και των κινδύνων .....	93
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> .....	95

5.1 Λιγνιτικά αποθέματα στην Ελλάδα .....	95
5.2 Προοπτικές για την εφαρμογή των μεθόδων UCG και CCS στα λιγνιτικά κοιτάσματα της Ελλάδας.....	97
5.3 Νόμοι και κανονισμοί σχετικά με την εξόρυξη γαιάνθρακα στην Ελλάδα γενικά .....	99
5.4 Συμπεράσματα.....	101
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>102</b>



**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:****«ΥΠΟΓΕΙΑ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΛΙΓΝΙΤΙΚΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ»****ΦΟΙΤΗΤΗΣ:****Ρόζα Αγλαΐα****ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:****Κακαράς Εμμανουήλ, Καθηγητής, Τομέας Θερμότητας****ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:****2018-19****Σύνοψη**

Τα τελευταία εκατό χρόνια η βιομηχανία της εξόρυξης γαιάνθρακα έχει δώσει μια μεγάλη ώθηση σε πολλούς τομείς τις καθημερινής ζωής μας. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι μετακινήσεις, και η βιομηχανία μετάλλου είναι μερικές μόνο από τις χρήσεις του γαιάνθρακα ακόμα και σήμερα. Η συνεχιζόμενη βελτίωση των συνθηκών ζωής παράλληλα με την ραγδαία αύξηση του πληθυσμού οδηγούν σε προβλέψεις οι οποίες υποστηρίζουν ότι μεταξύ του 2008 και του 2035 η παγκόσμια ζήτηση σε γαιάνθρακα θα αυξηθεί κατά 20%. Τις τελευταίες δεκαετίες ένας νέος και οικολογικά πιο φιλικός τρόπος απόληψης του άνθρακα από τα στρώματα γαιάνθρακα σε σχέση με την απευθείας εξόρυξη κερδίζουν έδαφος κάθε χρόνο. Η μέθοδος της υπόγειας αεριοποίησης κοιτασμάτων γαιάνθρακα UCG όχι μόνο μπορεί να εφαρμοστεί στα βαθιά στρώματα γαιάνθρακα τα οποία διαφορετικά θα παρέμεναν ανεκμετάλλευτα αλλά σχετίζεται και με τεχνολογίες καθαρού άνθρακα (CCSt).

Το UCG είναι μια τεχνολογική μέθοδος όπου ο γαιάνθρακας μετατρέπεται σε αέρια φάση επί τόπου. Για να επιτευχθεί αυτό, λαμβάνει χώρα μια έγχυση με οξυγόνο, αέρα απευθείας στο στρώμα του γαιάνθρακα το οποίο μετατρέπεται αυτόματα σε ένα υπόγειο αντιδραστήρα αεριοποίησης υψηλών θερμοκρασιών. Αντιδράσεις όπως η πυρόλυση μετατρέπουν τα κοιτάσματα του άνθρακα σε ένα αέριο σύνθεσης γνωστό ως "syngas". Μέσω άλλων φρεατίων παραγωγής, το αέριο αυτό που περιέχει κυρίως υδρογόνο, μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα και μονοξείδιο ταξιδεύει στην επιφάνεια για επεξεργασία και περαιτέρω χρήση. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, ο αντιδρών άνθρακας και το παραγόμενο αέριο είναι υπεύθυνοι για το σχηματισμό κοιλοτήτων στο στρώμα του γαιάνθρακα μεταξύ της έγχυσης και του φρεατίου παραγωγής, οι οποίες αναπτύσσονται καθώς συνεχίζεται η διαδικασία. Μόλις επιβραδυνθεί η παραγωγικότητα του αερίου, διανοίγονται νέα φρεατία έγχυσης ή παραγωγής, για να αντιδράσει και να εκμεταλλευτεί περισσότερη ποσότητα γαιάνθρακα που δεν αντέδρασε αρχικά

**Περίληψη**

Αδιαμφισβήτητα τα μη ανανεώσιμα καύσιμα παραμένουν οι κύριες πηγές ενέργειας σε όλον τον κόσμο. Η αλόγιστη όμως εκμετάλλευσή τους σε συνδυασμό με την ταχύτατη πληθυσμιακή και οικονομική ανάπτυξη, είχε ως αποτέλεσμα την γρήγορη εξάντληση των περισσότερων οικονομικά εκμεταλλεύσιμων κοιτασμάτων τους και την παράλληλη εμφάνιση σοβαρών περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Ο γαιάνθρακας (συμπεριλαμβανομένου και του λιγνίτη) είναι από τις σημαντικότερες μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και καλύπτει σήμερα περίπου το 25% των συνολικών ενεργειακών απαιτήσεων παγκοσμίως. Τα αποθέματα του αν και παραμένουν σημαντικά, σε πολλές περιπτώσεις βρίσκονται σε βάθη στα οποία η εξόρυξη με κλασικές μεθόδους είναι οικονομικά ασύμφορη.

Μέσα στα πλαίσια της σημαντικής προσπάθειας που γίνεται σήμερα ανά τον κόσμο για περιβαλλοντικά φιλική και αειφόρα παραγωγή ενέργειας έχει ξεκινήσει μια μεγάλη και ελπιδοφόρα έρευνα ώστε να βρεθούν τρόποι με τους οποίους θα είναι δυνατή η εκμετάλλευσή των κοιτασμάτων γαιάνθρακα που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη, με όσο το δυνατόν μικρότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και φιλικότερη προς το περιβάλλον.

Μια τέτοια μέθοδος εκμετάλλευσής των υπόγειων αποθεμάτων είναι η υπόγεια αεριοποίηση στρωμάτων γαιάνθρακα, γνωστή διεθνώς και ως Underground Coal Gasification (UCG). Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια γέφυρα ανάμεσα στην αξιοποίηση στρωμάτων γαιάνθρακα που εντοπίζονται σε βάθη που καθιστά την εκμετάλλευσή τους οικονομικά μη βιώσιμη και στην παραγωγή ενέργειας από γαιάνθρακα με ελεγχόμενες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα καθώς και περιορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Με βάση τα παραπάνω η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει αφενός στο να αναλύσει τις σύνθετες μηχανικές και χημικές διεργασίες που συντελούνται κατά την υπόγεια αεριοποίηση του γαιάνθρακα και αφετέρου να εντυπώσει στις απαραίτητες γεωλογικές συνθήκες που απαιτούνται για να μπορεί να λάβει χώρα η διαδικασία της αεριοποίησης.

Στο πλαίσιο της εργασίας γίνεται εκτενής ανάλυση της διαδικασίας μέσω της οποίας παράγεται το αέριο σύνθεσης (Syngas - SNG) από την υπόγεια αεριοποίηση καθώς και της δυνατότητας περαιτέρω επεξεργασίας και χρήσης του αερίου. Επιπρόσθετα αναφέρονται λεπτομερώς οι γεωλογικές συνθήκες οι οποίες επικρατούν σε τόσο μεγάλα βάθη και παρουσιάζονται οι περιορισμοί που τίθεντο για να εφαρμοστεί η μέθοδος αυτή καθώς είναι απαραίτητη η ύπαρξη απολύτως στεγανών υπερκείμενων στρωμάτων και η πολύ προσεκτική μελέτη του υδροφόρου ορίζοντα της περιοχής. Παρατίθενται στην συνέχεια τόσο τα περιβαλλοντικά όσο και τα οικονομικά οφέλη από την εφαρμογή της υπόγεια αεριοποίησης. Γίνεται αναφορά στις χώρες στις οποίες σήμερα η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται, είτε εκτενώς, είτε σε ερευνητικό επίπεδο και στοιχειοθετείται η δυνατότητα εφαρμογής της υπόγεια αεριοποίησης του γαιάνθρακα στην χώρα μας. Τέλος όπως κάθε νέα τεχνολογία έτσι και η συγκεκριμένη έχει κάποια μειονεκτήματα και αδυναμίες, τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά και αναφέρονται τρόποι αντιμετώπισης τους.



***POST-GRADUATE THESIS:***      « **UNDERGROUND LIGNITE RESERVES  
GASIFICATION** »

***STUDENT:***                      **Roza Aglaia**

***SUPERVISOR:***                **Kakaras Emmanuel, Professor, Section of Thermal  
Engineering**

***ACADEMIC YEAR:***            **2018-19**

## **Abstract**

Within the last hundreds of years, coal mining has given a tremendous push in many aspects evolving our everyday lives. Metals and industrial material production, electrical energy, and transport are some of the uses even nowadays. The continuous improvement of living standards in parallel with population growth leads to predictions supporting that between 2008 and 2035 and world coal demand will be increased by 20% . In the last few decades, a new and ecologically friendlier way to recover carbon from coal seams instead of direct mining gains ground year by year. The Underground Coal Gasification (UCG) method can not only be applied to deep coal deposits that would otherwise remain unmined, but is also related to functional clean coal technologies (CCTs).

UCG is a technological method where the seam of solid carbon is converted into a gaseous phase in situ. In order to achieve this, an injection—often inclined well supplies oxygen, air, or even steam directly to the coal seam which becomes an underground gasification reactor in high temperatures. Reactions such as pyrolysis convert coal deposits to a synthesis gas known as “syngas”. Via other production wells, this gas mainly hydrogen, methane, carbon dioxide, and monoxide travels to the surface for treatment and further use. During this process, the reacted coal and the produced gas are responsible for the formation of cavities in the coal body between injection and production well, which are growing as the process continues. Once gas productivity slows down, new injection or production wells are drilled further, for more unreacted coal to be exposed to the input steam current.

## **Summary**

Undoubtedly, non-renewable fuels remain the main sources of energy around the world. However, their reckless exploitation, coupled with rapid population and economic development, has resulted in the swift depletion of most of their economically exploitable deposits and the parallel occurrence of serious environmental impacts.

Coal (including lignite) is one of the most important non-renewable energy sources and currently covers around 25% of the total energy requirements worldwide. Its reserves, although important, are often found in depths where extraction by conventional methods is economically unprofitable. In the context of the considerable effort currently being made worldwide for environmentally friendly and sustainable energy production, a major and promising research has begun to find ways to exploit the coal deposits that are in deep depth, with simultaneously lower carbon dioxide emissions and more environmentally friendly.

Such a method of exploiting the coal underground reserves is the underground gasification of coal seams, also known internationally as Underground Coal Gasification (UCG). This method is a bridge between the exploitation of coal found at depths that make their exploitation economically unsustainable and the production of coal energy with controlled carbon dioxide emissions as well as limited environmental impacts.

Based on the above, the present thesis aims to analyze the complex mechanical and chemical processes involved in the underground coal gasification and to study the geological conditions that are necessary for the underground gasification. In the course of the work, an extensive analysis is made for the process by which synthesis gas (Syngas) is produced from underground gasification as well as the possibility of further processing and use of the produced gas. Additionally, there is an extensive reference to the geological conditions prevailing at such great depths and the limitations imposed for this method to be applied, as it is necessary to have absolutely impermeable overlying layers and a very careful study of the regional aquifer.

Subsequently, the environmental and economic benefits of underground gasification are outlined below. References are made to countries where this method is currently applied, either extensively or at the research level, and the possibility of applying the underground gasification of coal in our country is established. Finally, as every new technology, this particular one has some drawbacks and weaknesses, which are presented in detail and ways of handling them, are mentioned.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## 1.1 Παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες

Η ανάπτυξη του παγκόσμιου πληθυσμού και της οικονομίας, σε συνδυασμό με την ταχεία αστικοποίηση, θα οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της ενεργειακής ζήτησης κατά τα προσεχή έτη. Ο Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών (ΟΗΕ) εκτιμά ότι ο παγκόσμιος πληθυσμός θα αυξηθεί από 7,6 δισεκατομμύρια το 2017 σε 9,8 δισεκατομμύρια μέχρι το 2050. Η διαδικασία αστικοποίησης - η οποία σήμερα προσθέτει μια πόλη του μεγέθους της Σαγκάης στον αστικό πληθυσμό του κόσμου κάθε τέσσερις μήνες - καταλήγει σε περίπου τα δύο τρίτα των κατοίκων του πλανήτη να ζουν σε αστικές περιοχές έως το 2050 (από 54% το 2014).

Η πρόκληση να αντιμετωπιστεί η ραγδαία αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, με ταυτόχρονη μείωση των επιβλαβών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, είναι πολύ σημαντική και αποδεικνύεται δύσκολη. Το 2016 οι παγκόσμιες ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα αυξήθηκαν κατά 0,8%, η μεγαλύτερη ετήσια άνοδος που σημειώθηκε ποτέ, ενώ σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (ΠΟΥ), η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι ο μεγαλύτερος περιβαλλοντικός κίνδυνος στον κόσμο. Σύμφωνα με εκτιμήσεις του ΠΟΥ, το 2012, περίπου 7 εκατομμύρια άνθρωποι πέθαναν πρόωρα λόγω της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Υπάρχουν πολλές απόψεις για τον πρωτογενή και δευτερογενή τομέα της ενέργειας που δημοσιεύονται κάθε χρόνο, πολλές από τις οποίες συνοψίζονται παρακάτω. Μεταξύ των πιο ευρέως διαδεδομένων οργανισμών στον τομέα αυτό είναι ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (International Energy Agency - IEA) του ΟΟΣΑ(Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης). Κάθε χρόνο, ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA) δημοσιεύει την Παγκόσμια Ενεργειακή Έκθεση (World Energy Outlook - WEO), παρουσιάζοντας την τρέχουσα κατάσταση και μια σειρά μελλοντικών σεναρίων. Το «Σενάριο τρεχουσών πολιτικών» της έκθεσης εξετάζει μόνο τις πολιτικές που έχουν τεθεί σε ισχύ κατά τη στιγμή της σύνταξης, ενώ το «Σενάριο για τις νέες πολιτικές» (το κεντρικό σενάριο) ενσωματώνει πολιτικές που έχουν τεθεί σε ισχύ, καθώς και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που ενδέχεται να προκύψουν από τις ανακοινωθείσες προθέσεις πολιτικής. Σε κάθε πρόσφατη έκθεση WEO περιλαμβάνεται και ένα τρίτο σενάριο που ξεκινά με ένα όραμα για το πώς και με ποιο χρονοδιάγραμμα πρέπει να αλλάξει ο ενεργειακός τομέας.

Σε κάθε WEO που κυκλοφόρησε κατά την περίοδο 2008-2016, το κύριο σενάριο για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ήταν το «Σενάριο 450». Ένα σενάριο που συνάδει με τον περιορισμό της αύξησης των μέσων παγκόσμιων θερμοκρασιών σε 2°C. Στο WEO 2017, το «Σενάριο 450» αντικαταστάθηκε από ένα νέο, το «Σενάριο αειφόρου ανάπτυξης». Πρόκειται για ένα μονοπάτι που θα αφορά τρεις κύριους στόχους για την οικοδόμηση ενός αειφόρου, σύγχρονου ενεργειακού συστήματος:

- Πρόσβαση σε οικονομικά προσιτή, καθαρή και αξιόπιστη ενέργεια.
- Μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

- Αποτελεσματική δράση για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής.

Στο πλαίσιο αυτών των στόχων ερευνώνται εναλλακτικοί τρόποι εκμετάλλευσης των κοιτασμάτων γαιάνθρακα παγκοσμίως και εξετάζεται η δυνατότητα δέσμευσης και αποθήκευσης του παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). [134] Τι είναι όμως οι γαιάνθρακες και ποιες είναι οι μέθοδοι που σήμερα χρησιμοποιούνται για την απόληψη τους από τα βεβαιωμένα αποθέματα τους παγκοσμίως; Στις επόμενες ενότητες του παρόντος κεφαλαίου γίνεται μια προσπάθεια να απαντηθούν αυτά τα ερωτήματα.

## **1.2 Η θέση του γαιάνθρακα στην παγκόσμια αγορά ενέργειας**

Ο γαιάνθρακας είναι το πιο άφθονο παγκόσμια, ορυκτό καύσιμο. Η πρώιμη αξιοποίησή του στην ανθρώπινη ιστορία μπορεί να ανιχνευθεί από το 500 π.Χ. όταν αυτός ο μαύρος πόρος ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά στην Κίνα. Η πραγματική όμως εκμετάλλευση του ξεκίνησε με την Βιομηχανική Επανάσταση του 18ου και 19ου αιώνα οπότε οι μεγάλες εξορύξεις και η εκτεταμένη χρήση των πόρων γαιάνθρακα έλαβαν χώρα παγκοσμίως. Ο κόσμος καταναλώνει σήμερα πάνω από 7.800 εκατομμύρια τόνους γαιάνθρακα, χρησιμοποιώντας τον σε διάφορους τομείς, όπως ο τομέας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η παραγωγή σιδήρου και χάλυβα, η παραγωγή τσιμέντου και ο τομέας των υγρών καυσίμων.

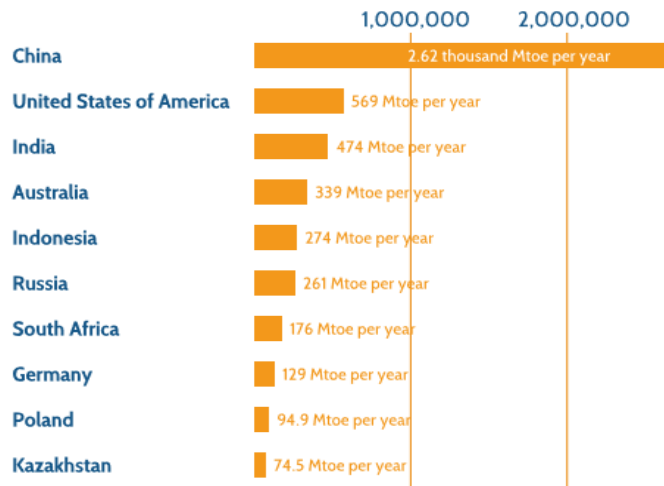
Ο γαιάνθρακας σήμερα τροφοδοτεί το 25% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας και προβλέπεται να συνεχίσει να κατέχει στρατηγικό μερίδιο κατά τις επόμενες τρεις δεκαετίες. Οι χώρες με τις μεγαλύτερες παραγωγές και καταναλώσεις γαιάνθρακα δεν περιορίζονται σε μία περιοχή. Οι πέντε κορυφαίες είναι η Κίνα, οι ΗΠΑ, η Ινδία, η Ινδονησία, η Αυστραλία και η Νότια Αφρική.

Παρακάτω παρατίθενται κάποια στοιχεία για τον γαιάνθρακα τα οποία προέρχονται από τη στατιστική ανασκόπηση της BP του 2016 και περιλαμβάνουν :

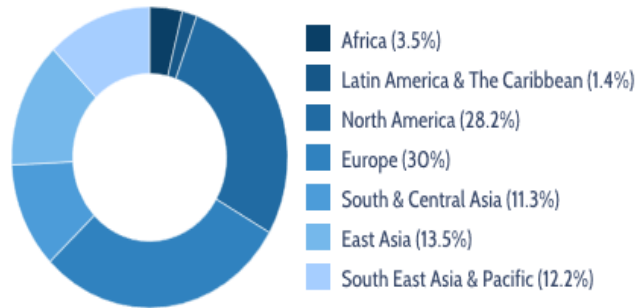
- Ανά επιλεγμένες χώρες τη συνολική παραγωγή γαιάνθρακα σε εκατομμύρια τόνους το 2015 (Εικόνα 1)

- Αποδεδειγμένα αποθέματα γαιάνθρακα με δυνατότητα ανάκτησης. Τα αποδεδειγμένα ανακτήσιμα αποθέματα είναι πόροι που παραμένουν σε γνωστές αποθέσεις γαιάνθρακα και έχει αποδειχθεί ότι είναι προσιτές υπό τις τρέχουσες τοπικές, οικονομικές και τεχνολογικές συνθήκες. (Εικόνα 2)

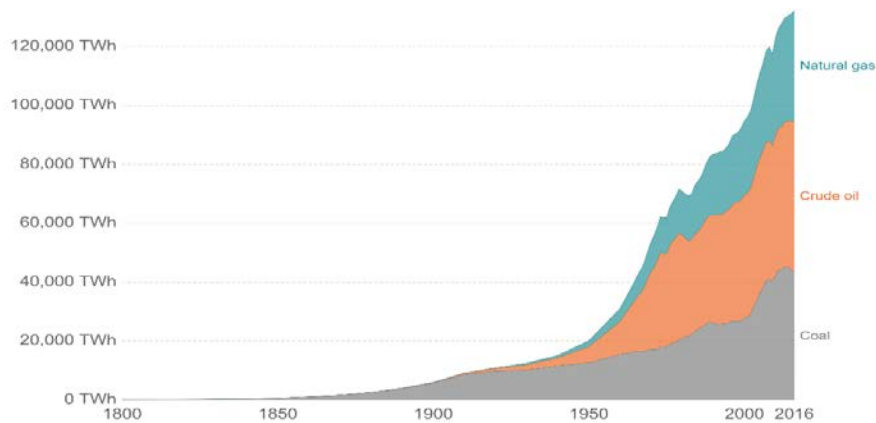
- Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, υπολογισμένη σε TWh (Terrawatt/hour) (Εικόνα 3)



**Εικ.1** Παγκόσμια παραγωγή γαιάνθρακα (τόνοι ανά χώρα) [125]



**Εικ.2** Αποδεδειγμένα αποθέματα γαιάνθρακα με δυνατότητα ανάκτησης [125]



**Εικ.3** Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας από ορυκτά καύσιμα [125]

Η κυρίαρχη όμως θέση του γαιάνθρακα στην παγκόσμια ενεργειακή αγορά έχει και θα συνεχίσει να έχει συνέπειες στις στρατηγικές μετριασμού της κλιματικής αλλαγής. Η εισαγωγή νέων συστημάτων διαχείρισης του γαιάνθρακα, όπως για παράδειγμα η υπόγεια αεριοποίηση του, καθώς και η δέσμευση και αποθήκευση CO<sub>2</sub>(CCS), είναι ζωτικής σημασίας για την άμβλυνση των επιπτώσεων της μελλοντικής χρήσης του στον άνθρωπο και στο περιβάλλον.

### **1.3 Σχηματισμός των γαιανθράκων**

Οι γαιάνθρακες είναι στερεά ιζηματογενή υλικά τα οποία προέρχονται από μια ασύνδετη απόθεση αλλοιωμένων υπολειμμάτων της προϊστορικής βλάστησης που αρχικά είχε συσσωρευτεί σε αναγωγικό και κορεσμένο σε νερό περιβάλλον όπως βάλτοι και έλη. Η ενέργεια που λαμβάνουμε από αυτούς σήμερα, πηγάζει από την ενέργεια που απορρόφησαν τα φυτά από τον ήλιο πριν από εκατομμύρια χρόνια.

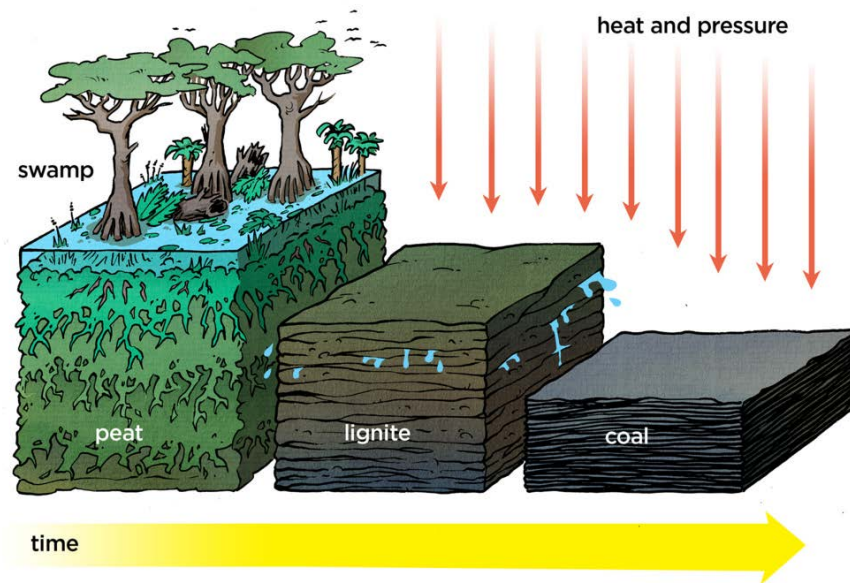
Όλα τα ζωντανά φυτά αποθηκεύουν ηλιακή ενέργεια μέσω της φωτοσύνθεσης, η οποία απελευθερώνεται καθώς τα φυτά αποσυντίθενται. Υπό ιδανικές συνθήκες όμως, οι οποίες είναι ευνοϊκές για τον σχηματισμό του γαιάνθρακα, διακόπηκε η διεργασία της αποσύνθεσης, αποτρέποντας την απελευθέρωση της αποθηκευμένης ηλιακής ενέργειας. Έτσι η ενέργεια αυτή έμεινε δεσμευμένη στον άνθρακα, σχηματίζοντας μέσω βιοχημικών διεργασιών, απουσία οξυγόνου την τύρφη. Με το πέρασμα των χρόνων οι κινήσεις των τεκτονικών πλακών παγίδεψαν και έθαψαν, συχνά σε μεγάλα βάθη, την τύρφη από τους βάλτους η οποία ήταν καλυμμένη από λάσπη και ιζήματα δημιουργώντας τις ιδανικές συνθήκες για τον σχηματισμό των γαιανθράκων.

Με την ταφή, αυτό το υλικό υποβλήθηκε σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις κάτι το οποίο προκάλεσε φυσικές και χημικές αλλαγές, μετατρέποντας το αρχικά σε λιγνίτη στην συνέχεια σε υποβιτουμενιούχο και βιτουμενιούχο γαιάνθρακα και τέλος σε ανθρακίτη.

### **1.4 Ενανθράκωση, Βιτουμενοποίηση και Κατάταξη γαιανθράκων**

Η διεργασία που γίνεται στην φύση και οδηγεί από τον φυτικό κόσμο στο σχηματισμό των κοιτασμάτων γαιάνθρακα είναι γνωστή ως ενανθράκωση και βιτουμενοποίηση (Εικόνα 4). Η πρώτη συμπληρώνεται με την τυρφοποίηση των φυτών και είναι μια βιοχημική διεργασία η οποία επιτυγχάνεται με την επίδραση διαφόρων μυκήτων και βακτηρίων και λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια της γης.

Η δεύτερη φάση γίνεται μέσα στην γη σε μεγάλο βάθος και είναι μια γεωχημική διεργασία. Γίνεται σε μεγάλο χρονικό διάστημα με ιδιαίτερες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Μόλις η θερμοκρασία φτάσει στους 100οC αρχίζει η διαδικασία της βιτουμενοποίησης, κατά την οποία χημικές αντιδράσεις εκδιώκουν το νερό, το οξυγόνο και το υδρογόνο ανεβάζοντας το ποσοστό του άνθρακα.



**Εικ.4** Διαδικασία ενανθράκωσης και βιτουμενοποίησης για τον σχηματισμό των γαιανθράκων

Η διαδικασία της ενανθράκωσης και της βιτουμενοποίησης έχει σημαντικό αντίκτυπο στις φυσικές και χημικές ιδιότητες του γαιάνθρακα και αναφέρεται ως βαθμός του γαιάνθρακα. Η κατάταξη καθορίζεται από το βαθμό μετασχηματισμού του αρχικού φυτικού υλικού, από το ποσοστό του άνθρακα και της υγρασίας που περιέχουν οι γαιάνθρακες καθώς και από την θερμογόνο δύναμη τους. Η ποιότητα κάθε κοιτάσματος γαιάνθρακα καθορίζεται από:

- Είδη βλάστησης από τα οποία προέρχεται ο γαιάνθρακας.
- Βάθος ταφής.
- Θερμοκρασίες και πιέσεις σε αυτά τα βάθη.
- Χρόνος που απαιτείται για να σχηματιστεί.

Οι βαθμοί του γαιάνθρακα αυξάνονται διαδοχικά ως κάτωθι:

**i. Τύρφη** : Είναι χαλαρή απόθεση φυτικών καταλοίπων σε ένα κορεσμένο με νερό περιβάλλον. Θεωρείται το πρώτο στάδιο σχηματισμού γαιάνθρακα και περιέχει 55-65% άνθρακα και 50-60% υγρασία. Στην τύρφη είναι ορατοί οι φυτικοί ιστοί ενώ είναι αλαμπής έχει χρώμα καστανό και θερμαντική ικανότητα 1.500-2.000 kcal/kg. Η τύρφη έχει βιομηχανική σημασία ως καύσιμο σε ορισμένες περιοχές, ενώ στην αφυδατωμένη της μορφή, είναι ένα εξαιρετικά αποτελεσματικό απορροφητικό μέσο για τη διαρροή καυσίμων και πετρελαίου στη ξηρά και το νερό. Τέλος χρησιμοποιείται ως βελτιωτικό εδάφους για να το καταστήσει πιο ικανό να συγκρατεί και να απελευθερώνει το νερό με αργό ρυθμό.



**Εικ.5** Μια στοίβα τύρφης στη Ness στο νησί Lewis (Σκωτία)



**Εικ.6** Τύρφη που μεταφέρεται για αποθήκευση μετά την κοπή.



**Εικ.7** Τύρφη

**ii. Λιγνίτης:** Ο λιγνίτης είναι ο χαμηλότερου βαθμού γαιάνθρακας ενώ είναι γνωστός και ως brown coal. Οι λιγνίτες διακρίνονται σε μαλακούς που κόβονται με μαχαίρι και σε σκληρούς. Οι μαλακοί περιέχουν 65-70% άνθρακα, 30-60% υγρασία, είναι αλαμπής μέχρι θαμποί με χρώμα καστανό και θερμαντική ικανότητα 2.000-3.500 kcal/kg. Οι σκληροί λιγνίτες περιέχουν 70-80% άνθρακα, 10-30% υγρασία ενώ είναι και αυτοί θαμποί μέχρι λιπαροί με χρώμα καστανό έως μαύρο και θερμαντική ικανότητα 3.500-7.000 kcal/kg. Λόγω της υψηλής περιεκτικότητας τους σε υγρασία, η ενεργειακή τους απόδοση είναι μειωμένη, καθώς η εξάτμιση του ενσωματωμένου νερού καταναλώνει μεγάλο μέρος της ενέργειας από την καύση. Παρά την χαμηλή του ποιότητα όμως, πολλές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής καίνε λιγνίτη για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια λόγω της προσιτής τιμής σε μέρη όπως η Ελλάδα η Αυστραλία το Τέξας και η Βόρεια Ντακότα, όπου τα αποθέματα του λιγνίτη είναι άφθονα.



**Εικ.8** Δείγματα λιγνίτη



iii. **Υποβιτουμενιούχος γαιάνθρακας:** Οι ιδιότητες αυτού του είδους γαιάνθρακα δεν είναι σταθερές και κυμαίνονται μεταξύ εκείνων του λιγνίτη και της επόμενης κατάταξης. Έχει περιεκτικότητα σε άνθρακα μεταξύ 80% και 90% και θερμαντική ικανότητα 7.000-8.000 kcal/kg. Η γεωλογική του ηλικία υπερβαίνει τα 100 εκατομμύρια χρόνια. Λόγω της υψηλότερης περιεκτικότητας σε άνθρακα, ο υποβιτουμενιούχος έχει υψηλότερη θερμαντική αξία από τους λιγνίτες. Χρησιμοποιείται πρωτίστως ως καύσιμο για παραγωγή ατμού-ηλεκτρικής ενέργειας και αποτελεί επίσης σημαντική πηγή ελαφρών αρωματικών υδρογονανθράκων για την χημική βιομηχανία.



**Εικ.9** Υποβιτουμενιούχος γαιάνθρακας

iv. **Βιτουμενιούχος γαιάνθρακας:** Ο βιτουμενιούχος γαιάνθρακας περιέχει μεταξύ 90% και 93% άνθρακα με θερμαντική ικανότητα 8.000-8.500 kcal/kg. Η ηλικία του κυμαίνεται από 100 έως 300 εκατομμύρια χρόνια. Είναι ένα πυκνό ιζηματογενές πέτρωμα, συνήθως μαύρο, αλλά μερικές φορές και σκούρο καφέ, συχνά με καλά καθορισμένες ζώνες λαμπερού και θαμπού υλικού. Χρησιμοποιείται κυρίως ως καύσιμο στην παραγωγή ατμού-ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και στον τομέα της παραγωγής οπτάνθρακα (Coke).



**Εικ.10** Βιτουμενιούχος γαιάνθρακας

v. **Ανθρακίτης:** Ο ανθρακίτης έχει περιεκτικότητα σε άνθρακα μεταξύ 93% και 98%, 1-2% υγρασία, είναι υαλώδης, έχει χρώμα μαύρο και θερμαντική ικανότητα 8.500-9.000 kcal/kg.. Έχει την υψηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα, τις λιγότερες ακαθαρσίες και την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα όλων των τύπων γαιάνθρακα.



**Εικ. 11** Ανθρακίτης

vi. **Γραφίτης:** Ο γραφίτης περιέχει 98-100% άνθρακα, έχει ημιμεταλλική λάμψη και χρώμα μαύρο. Είναι ένας από τους πιο δύσκολους άνθρακες για ανάφλεξη αφού πρακτικά δεν αναφλέγεται και δεν χρησιμοποιείται ως καύσιμο. Χρησιμοποιείται περισσότερο σε κατασκευή μολυβιών ή κονιοποιημένο για εφαρμογές λιπάνσεως.



**Εικ. 12** Γραφίτης

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας -1-) φαίνεται η κατάταξη των σημαντικότερων ειδών γαιάνθρακα με βάση την ενεργειακή αξία ανά κιλό υλικού.

**Πίνακας -1-** Ενεργειακή κατάταξη των σημαντικότερων τύπων γαιάνθρακα

ΚΑΤΑΤΑΞΗ	ΤΥΠΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑ	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΞΙΑ (MJ/kg)
#1	Ανθρακίτης	35-37
#2	Βιτουμενιούχος γαιάνθρακας	33-35

#3	Υποβιτουμενιούχος γαιάνθρακας	29-33
#4	Λιγνίτης	7.5-29

## 1.5 Εξόρυξη και παραγωγή γαιάνθρακα

Ο γαιάνθρακας εξορύσσεται με τρεις μεθόδους:

- Επιφανειακή εξόρυξη (open-cut mining),
- Υπόγεια εξόρυξη (underground mining)
- Επί τόπου εξόρυξη στο φυσικό του περιβάλλον (in situ).

Ο σχεδιασμός και οι μέθοδοι εξόρυξης σε κάποιο ορυχείο γαιάνθρακα επιλέγονται με βάση τα χαρακτηριστικά των αποθεμάτων. Όπου οι στοιβάδες άνθρακα βρίσκονται πλησίον της επιφάνειας του εδάφους, επικρατούν οι μέθοδοι επιφανειακής εξόρυξης σε σχέση με τις υπόγειες μεθόδους. Γενικά, οι μέθοδοι επιφανειακής εξόρυξης είναι λιγότερο δαπανηρές από τις μεθόδους εξόρυξης σε βάθος με στοές όταν η σχέση εκμετάλλευσης είναι μικρότερη από ένα καθορισμένο οικονομικό όριο. Η σχέση εκμετάλλευσης είναι η ποσότητα του υπερκείμενου φορτίου (εκφρασμένη σε κυβικά μέτρα) που πρέπει να αφαιρεθεί για να εξορυχτεί ένας τόνος γαιάνθρακα. Οι εταιρείες αλλάζουν μέθοδο εξόρυξης από επιφανειακή σε υπόγεια όταν η σχέση αυτή αυξάνεται σε ένα υπάρχον επιφανειακό ορυχείο, λόγω του αυξημένου πλέον κόστους παραγωγής.

Ένα παράδειγμα για το ποσοστό του γαιάνθρακα που παράγεται από κάθε μέθοδο εξόρυξης (για την περίπτωση της Αμερικής) μπορεί να προσδιοριστεί από τις στατιστικές παραγωγής που τηρεί η Υπηρεσία Ενεργειακών Πληροφοριών (EIA- Energy Information Administration), μια υπηρεσία των ΗΠΑ.

Σύμφωνα με την EIA, το 2002, 745 ορυχεία επιφανειακής εξόρυξης παρήγαγαν 736 εκατομμύρια τόνους (το 67% της συνολικής παραγωγής των ΗΠΑ) και 654 υπόγεια ορυχεία παρήγαγαν 357 εκατομμύρια τόνους (33% της συνολικής παραγωγής των ΗΠΑ).

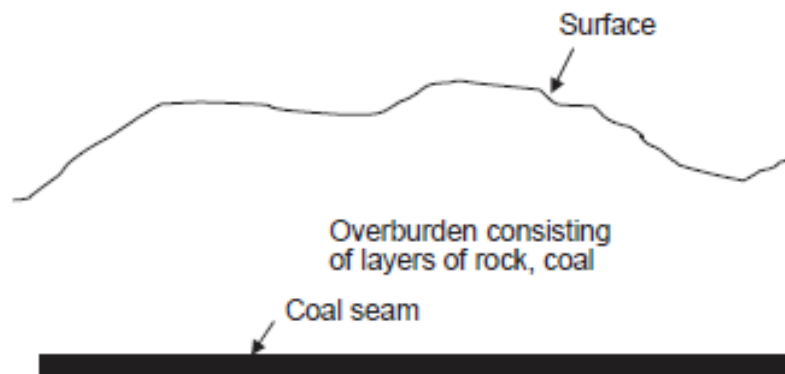
### 1.5.1 Επιφανειακές μέθοδοι εξόρυξης και σχεδιασμός

Η επιφανειακή εξόρυξη του γαιάνθρακα περιλαμβάνει τρία στάδια:

- Την απομάκρυνση του υπερκείμενου φορτίου
- Την αφαίρεση του αποθεμάτων γαιάνθρακα
- Την αποκατάσταση του ορυχείου

Το πρώτο βήμα στην επιφανειακή εξόρυξη είναι η απομάκρυνση των άγονων υλικών που βρίσκονται πάνω από τις στρώσεις του γαιάνθρακα τα οποία ονομάζονται υπερκείμενο φορτίο (Εικ.13). Αρχικά γίνονται γεωτρήσεις με χρήση γεωτρύπανων οι οποίες επιβεβαιώνουν την ύπαρξη εκμεταλλεύσιμου κοιτάσματος και στην συνέχεια τα υπερκείμενα άγονα υλικά είτε θρυμματίζονται με χρήση εκρηκτικών είτε γίνεται η αφαίρεση τους με μηχανικά μέσα. Στη

συνέχεια απομακρύνονται και μετατοπίζονται σε κάποιο προηγούμενο σημείο εξόρυξης, όπου ο γαιάνθρακας έχει ήδη αφαιρεθεί, ή σε άλλες περιοχές διάθεσης. Άλλες περιοχές διάθεσης μπορούν να περιλαμβάνουν γειτονικές κοιλάτητες ή χαμηλά τοπογραφικά εδάφη.



**Εικ.13** Πρώτο βήμα στη διαδικασία επιφανειακής εξόρυξης, η απομάκρυνση του υπερκείμενου φορτίου (σε διατομή) [126]

Μετά την αφαίρεση του υπερκείμενου φορτίου, το στρώμα του γαιάνθρακα που έχει εκτεθεί αφαιρείται με μεθόδους εκσκαφής και μεταφέρεται σε επιφανειακές εγκαταστάσεις όπου εκτελείται επεξεργασία του γαιάνθρακα για την μετέπειτα διανομή του, μέσω σιδηρόδρομων ή οχημάτων χερσαίων μεταφορών.

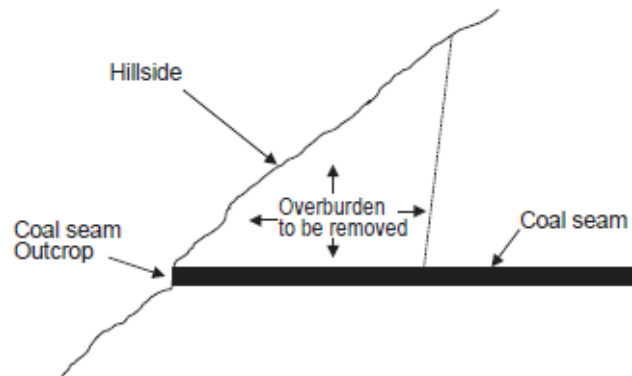
Το τρίτο βήμα στην επιφανειακή εξόρυξη είναι η αποκατάσταση του ορυχείου. Με κατάλληλη περιβαλλοντική μελέτη επιτυγχάνεται η ανάπλαση των θέσεων στους οποίους έχει ολοκληρωθεί η εξόρυξη. Συνήθως αποθηκεύεται με προσοχή το επιφανειακό στρώμα που υπήρχε πριν την έναρξη της εξόρυξης και τοποθετείται μετά το πέρας της εκμετάλλευσης, ενώ γίνεται πρόβλεψη για αναφύτευση ειδών με κατάλληλη υποδομή για πότισμα

Η βασική παράμετρος του σχεδιασμού ενός επιφανειακού ορυχείου και ο οδηγός που ορίζει το κόστος παραγωγής της μονάδας, είναι η σχέση εκμετάλλευσης ή ο λόγος αφαίρεσης. Ο λόγος για αποθέματα γαιάνθρακα έχει εύρος από 1: 1 έως 35: 1. Με μείωση του λόγου, έχουμε και μείωση του κόστους παραγωγής του γαιάνθρακα. Υπόγειες μέθοδοι εξόρυξης χρησιμοποιούνται όταν η ποσότητα του υπερκείμενου υλικού που θα πρέπει να αφαιρεθεί από την επιφάνεια έχει απαγορευτικό κόστος, δηλαδή η σχέση εκμετάλλευσης υπερβαίνει ένα ορισμένο οικονομικό όριο.

Σήμερα παγκοσμίως όπως και στην Ελλάδα χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο μια μέθοδος επιφανειακής εξόρυξης, η εξόρυξη με την μέθοδο των ορθών βαθμίδων (γερμανική μέθοδος) [126].

### **1.5.1.1 Εξόρυξη με την μέθοδο των ορθών βαθμίδων**

Οι στρώσεις του γαιάνθρακα και το σχετικό υπερκείμενο φορτίο μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να προεξέχουν από τις άκρες των λόφων και των βουνών. Η Εικόνα 14 δείχνει μια διατομή ενός τυπικού σχεδίου για ένα τέτοιου είδους ορυχείο. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε αυτή την μέθοδο περιλαμβάνει γεωτρύπανα, φορτωτές, μπουλντόζες και φορτηγά [126].



**Εικ.14** Σχεδιασμός ορυχείου με την επιφανειακή μέθοδο εξόρυξης των ορθών βαθμίδων(σε διατομή)  
[126]

Για την εξόρυξη του κοιτάσματος με την μέθοδο των ορθών βαθμίδων χωρίζονται τα υπερκείμενα άγωνα υλικά και τα στρώματα γαιάνθρακα σε βαθμίδες ύψους 10-30 μέτρων ανάλογα με τον τύπο του καδοφόρου εκσκαφέα. Αρχικά γίνεται διάτρηση και θραύση ενός τμήματος τριγωνικής μορφής του υπερκείμενου φορτίου. Το σπασμένο υπερκείμενο φορτίο φορτώνεται σε ηλεκτροκίνητους καδοφόρους εκσκαφείς (Bucket Wheel Excavator) και μεταφέρεται.

Στην συνέχεια της διεργασίας το κοίτασμα του γαιάνθρακα που αποκαλύπτεται εκσκάπτεται κατά στρώσεις σε μεγάλα τεμάχια τα οποία στην συνέχεια θρυμματίζονται στους σπαστήρες και μεταφέρονται στις αυλές των υδροηλεκτρικών σταθμών ή σε άλλους καταναλωτές ή σε υπαίθριες αποθήκες των λιγνιτωρυχείων. Σε κάποια είδη γαιάνθρακα απαιτείται γεώτρηση και ανατινάξεις με χρήση εκρηκτικών καθώς η δύναμη διάσπασης που απαιτείται για την απομάκρυνση του αποθέματος είναι πέρα από τις δυνατότητες των μηχανημάτων.

Το πλεονέκτημα της εξόρυξης με την μέθοδο των ορθών βαθμίδων οφείλεται στην ικανότητα ελέγχου της σχέσης εκμετάλλευσης κατά τη διαδικασία της εξόρυξης.



**Εικ.15** Εξόρυξη με την μέθοδο των ορθών βαθμίδων στο λιγνιτωρυχείο Αχλάδας στην περιοχή Φλώρινας

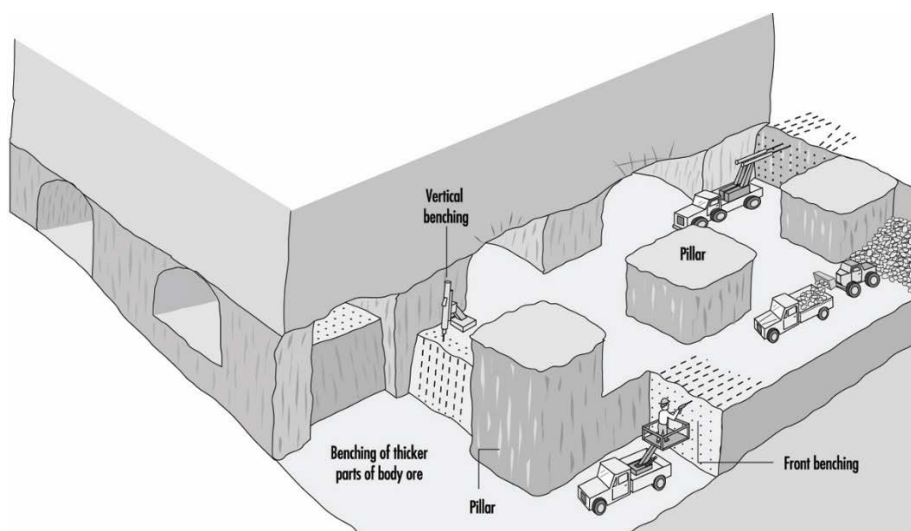
## 1.5.2 Υπόγειες μέθοδοι εξόρυξης

### 1.5.2.1 Μέθοδος θαλάμου και στύλου

Στη μέθοδο αυτή, ένας αριθμός παράλληλων διατμήσεων γίνεται στο κοίτασμα του γαιάνθρακα οι οποίες συνδέονται στη συνέχεια με ευρύτερες κάθετες διατμήσεις διαιρώντας το σε ορθογώνια τμήματα, τα οποία ονομάζονται θάλαμοι. Ο σχηματισμός πλέγματος που προκύπτει δημιουργεί πυκνούς στύλους γαιάνθρακα που υποστηρίζουν τα υπερκείμενα στρώματα προφυλάσσοντας τα από μια πιθανή καθίζηση. Υπό ευνοϊκές συνθήκες, μεταξύ του 30 και 50% του γαιάνθρακα μπορεί να ανακτηθεί κατά την ανάπτυξη αυτής της μεθόδου.

Για την ανάκτηση γαιάνθρακα από τους ίδιους τους στύλους, εφαρμόζονται πολλές μέθοδοι, ανάλογα με τις συνθήκες της οροφής και του δαπέδου. Η αυξημένη πίεση που δημιουργείται από την αφαίρεση τους πρέπει να μεταφερθεί κατά ομαλό τρόπο στους υπόλοιπους στύλους, έτσι ώστε να μην υπάρχει υπερβολική συσσώρευση πίεσης πάνω τους. Εάν δεν συμβεί αυτό, οι μη ανακτημένοι στύλοι ενδέχεται να αρχίσουν να καταρρέουν, θέτοντας σε κίνδυνο τους ανθρακωρύχους και τον εξορυκτικό εξοπλισμό.

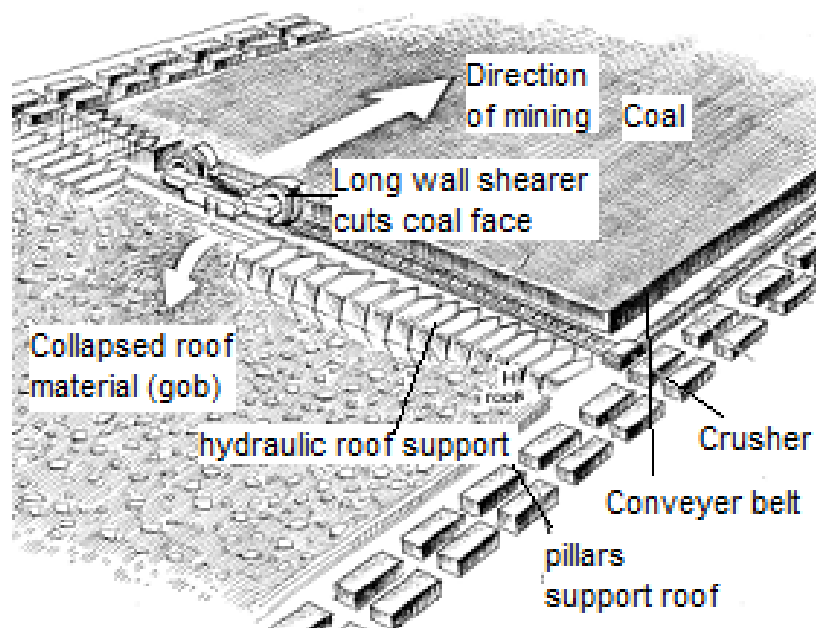
Παρόλο που η εξαγωγή όλου του άνθρακα από όλους τους θαλάμους και τους στύλους είναι ένας επιθυμητός στόχος, είναι συνηθισμένο πολλές φορές να εξάγεται μόνο ένας μικρός αριθμός στύλων. Σε βάθη μεγαλύτερα από 400 έως 500 μέτρα, οι μέθοδος θαλάμου και στύλου καθίσταται πολύ δύσκολη στην πρακτική εφαρμογή της εξαιτίας της υπερβολικής πίεσης της οροφής και της απαίτησης για ύπαρξη μεγαλύτερου μεγέθους στύλων [126].



**Εικ.16** Εξόρυξη με την μέθοδο του θαλάμου και στύλου [127]

### 1.5.2.2 Εξόρυξη Longwall

Στη μέθοδο εξόρυξης Longwall, η εκμετάλλευση οριζοντίων μέχρι μέσης κλίσης στρωμάτων γαιάνθρακα επιτυγχάνεται με τη μέθοδο των επιμηκών ευθυγράμμων μετώπων (Longwalls). Η επιφάνεια προσβολής παρουσιάζεται υπό μορφή κατακόρυφου επιπέδου, συχνά μικρού ύψους μη υπερβαίνοντος τα 2.5m και μεγάλου μήκους (1.000- 3.000m). Το μέτωπο κινείται προς σταθερή κατεύθυνση, διατηρώντας την ευθύγραμμη μορφή. Η περιοχή της εξόρυξης υποστηρίζεται από ορθοστάτες και δοκούς οροφής. Πίσω της η οροφή κατακρημνίζεται, έτσι ώστε το κατακόρυφο φορτίο που αναλαμβάνει το πέτρωμα και η υποστήριξη στο μέτωπο να διατηρείται κατά το δυνατόν σταθερό [126].



Εικ.17 Εξόρυξη Longwall [128]

Η υποχώρηση της οροφής κατόπιν της εξόρυξης των κοιτασμάτων γαιάνθρακα έχει άμεση επίπτωση στα υπερκείμενα στρώματα και κατ' επέκταση στην επιφάνεια, προκαλώντας καθίζηση. Η επιφανειακή καθίζηση που προκαλείται είναι κατά κανόνα πιο ομοιόμορφη όταν εφαρμόζεται η μέθοδος Longwall από ότι όταν εφαρμόζεται η μέθοδος θαλάμου και στύλου.

Ο κύκλος κοπής, διάτρησης, διάσπασης με εκρηκτικά, μεταφοράς γαιάνθρακα, υποστύλωσης της οροφής και μετατόπισης των μηχανημάτων επαναλαμβάνεται μέχρι να εξαντληθεί ολόκληρο το εκμεταλλεύσιμο κοίτασμα του γαιάνθρακα.

Στις σύγχρονες μηχανοποιημένες εξορύξεις Longwall, ο γαιάνθρακας κόβεται, φορτώνεται και μεταφέρεται από το ίδιο μηχάνημα συνεχούς εξόρυξης, που ονομάζεται κοπτήρας (shearer) ή οδοντωτός εκσκαφέας.



**Εικ.18** Μηχανήματα εξόρυξης τοιχωμάτων σε ανθρακωρυχείο του Κολοράντο»[129]

### 1.5.3 Μέθοδοι επί τόπου εξόρυξης – In Situ

Οι μέθοδοι επί τόπου εξόρυξης οι οποίες είναι γνωστές ως μέθοδοι In Situ εκμεταλλεύονται τον γαιάνθρακα από το εκάστοτε κοίτασμα, χωρίς να απαιτείται η ανθρώπινη παρουσία μέσα στον χώρο εξόρυξης. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν, τη χρήση διατρητικών μηχανημάτων, την υπόγεια αεριοποίηση, και τέλος την έκπλυση ή διάλυση του γαιάνθρακα με χρήση θερμότητας, πίεσης ή χημικών μέσων.

Στην πρώτη περίπτωση όπου γίνεται χρήση διατρητικών μηχανημάτων η εξόρυξη πραγματοποιείται με επαναλαμβανόμενες και παράλληλες διατρήσεις οπών στο κοίτασμα. Τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται, είναι μεγάλα κοχλιωτά γεωτρήπανα (Εικόνα 19) τα οποία διανοίγουν οπές μέσα στο κοίτασμα του γαιάνθρακα διαμέτρου 0,5 έως 1,5 μέτρα και βάθους μέχρι 180 μέτρα ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιούν την εξόρυξη του [126].



**Εικ.19** Κοχλιωτά γεωτρήπανα[126]



Μια από τις σημαντικότερες μεθόδους εξόρυξης οι οποίες εντάσσονται στην ανωτέρω κατηγορία μεθόδων In Situ είναι και η υπόγεια αεριοποίηση γαιάνθρακα (Underground Coal Gasification - UCG) για την οποία θα γίνει εκτενής αναφορά στο δεύτερο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Περιληπτικά, η υπόγεια αεριοποίηση μετατρέπει τον γαιάνθρακα σε αέριο σύνθεσης – syngas βαθιά στο υπέδαφος χωρίς να χρειάζεται η εξόρυξη του από αυτό μέσω της διάνοιξης ζεύγους γεωτρήσεων, τις γεωτρήσεις έγχυσης και παραγωγής, από την επιφάνεια του εδάφους έως την στρώση του γαιάνθρακα. Οι γεωτρήσεις έγχυσης χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία των οξειδωτικών μέσων (αέρα/ νερού, οξυγόνου/ατμού), τα οποία απαιτούνται για την ανάφλεξη του γαιάνθρακα ενώ οι γεωτρήσεις παραγωγής χρησιμοποιούνται για να οδηγηθεί το αέριο σύνθεσης-syngas, που παράγεται επί τόπου, στην επιφάνεια για να καθαριστεί και να αξιοποιηθεί άμεσα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### 2.1 Εισαγωγή

Περιορισμένες από τις υπάρχουσες μεθόδους και τεχνικές, οι παραδοσιακές μέθοδοι εξόρυξης γαιάνθρακα που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο δεν μπορούν εύκολα να ξεπεράσουν τα σοβαρά προβλήματα που παρουσιάζουν και με τα οποία είναι άρρηκτα συνδεδεμένες όπως:

- Οι εκσκαφές, οι αποθέσεις και η δέσμευση εκτάσεων για μεγάλα χρονικά διαστήματα
- Η αφαίρεση του γόνιμου εδάφους και η μείωση της αξίας της γης
- Η μετακίνηση κοινοτήτων και υποβάθμιση της ποιότητας ζωής των κατοίκων
- Η εξαφάνιση χώρων διαβίωσης άγριας πανίδας
- Η πτώση στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα
- Η μείωση και ρύπανση των νερών και τα προβλήματα στην άρδευση
- Η υποβάθμιση της αισθητικής του τοπίου
- Η μείωση της αγροτικής γης και του αγροτικού εισοδήματος
- Η έκλυση αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα
- Η πρόκληση θορύβου, δονήσεων και αυξημένης κυκλοφορίας οχημάτων
- Η αύξηση της συγκέντρωσης αιωρούμενων στερεών στα ύδατα
- Τα προβλήματα διαβίωσης για τους υδρόβιους οργανισμούς
- Η αύξηση συγκέντρωσης τοξικών ουσιών σε εδάφη και νερά
- Ο κίνδυνος για την ανθρώπινη υγεία
- Οι καθιζήσεις στην επιφάνεια

Ένας τρόπος να αντιμετωπιστούν τα ανωτέρω προβλήματα είναι να υπάρξει διαφορετική προσέγγιση στην ίδια την μέθοδο της εξόρυξης. Μια από τις λύσεις που θα βοηθήσουν στο μέλλον είναι η εφαρμογή της υπόγειας αεριοποίησης κοιτασμάτων γαιάνθρακα (Underground Coal Gasification - UCG). Με τη μετατροπή του τρόπου εξόρυξης γαιάνθρακα από φυσικό σε χημικό, η υπόγεια αεριοποίηση οδηγεί σε σημαντική μείωση του ανθρώπινου δυναμικού που απαιτείται καθώς και ελαχιστοποιεί τις παρεμβάσεις στην επιφάνεια του εδάφους.

Στο παρών κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στην ιστορική διαδρομή που έχει ακολουθήσει η μέθοδος της υπόγειας αεριοποίησης του γαιάνθρακα, αναλυτική περιγραφή της μεθόδου καθώς επίσης και αναφορά στο πώς η συγκεκριμένη μέθοδος βοηθά στην αντιμετώπιση των προβλημάτων που αναφέρθηκαν ανωτέρω.

### 2.2 Ιστορική αναδρομή UCG

Στις αρχές του 20ου αιώνα, πολλές βιομηχανικές πόλεις καλύπτονταν από ένα πυκνό ρυπογόνο νέφος, μια δυσάρεστη παρενέργεια της βιομηχανικής επανάστασης κύριο καύσιμο της οποίας ήταν ο γαιάνθρακας. Εκείνη την εποχή, ο εξέχων βρετανός επιστήμονας Sir William Ramsay πρότεινε ότι η απειλή του νέφους θα μπορούσε εξαφανιστεί με την παύση της καύσης του γαιάνθρακα στην επιφάνεια της Γης, την αεριοποίηση του υπόγεια και τη χρήση των παραγόμενων

αερίων για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών που υπήρχαν [1]. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται σήμερα υπόγεια αεριοποίηση κοιτασμάτων γαιάνθρακα (Underground Coal Gasification- UCG). Ο Ramsay έκανε αυτή την πρόταση χρονικά πολύ νωρίτερα από την χρονική στιγμή όπου αυτή η ιδέα θα μπορούσε να υλοποιηθεί.



**Εικ. 20** *William Ramsay*

Ωστόσο η παλαιότερη καταγεγραμμένη μνεία της ιδέας της αεριοποίησης του υπόγειου γαιάνθρακα έγινε αργότερα και ανήκει στον Sir William Siemens, ο οποίος πρότεινε την αεριοποίηση του γαιάνθρακα *in situ* (δηλ. στο φυσικό του περιβάλλον) στην ομιλία του προς την British Chemical Society [5].

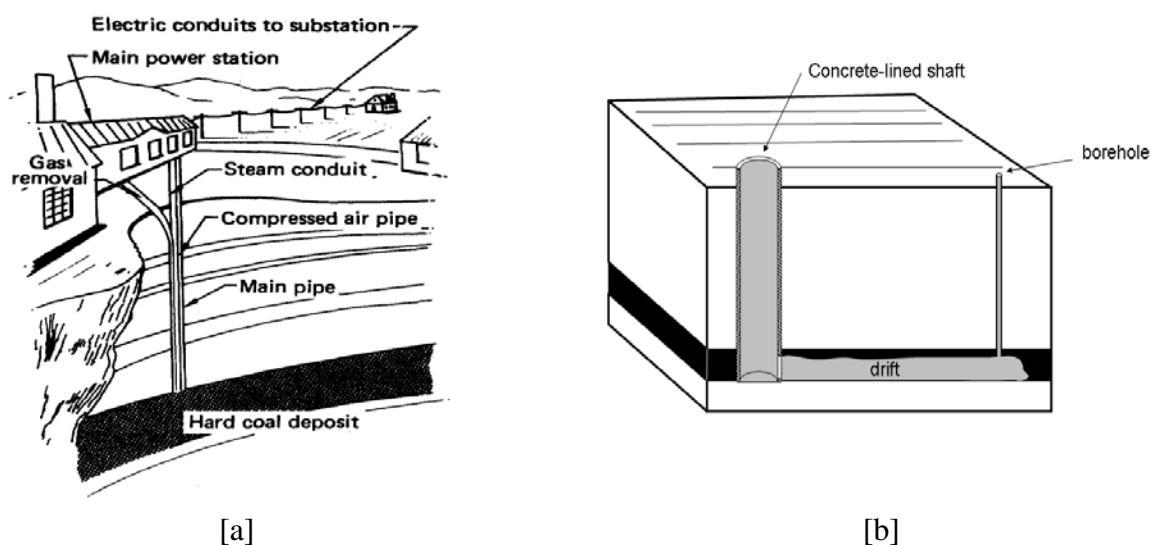
Κατά το δεύτερο μισό του 20ού αιώνα το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης έγινε λιγότερο έντονο. Αυτή η θετική αλλαγή οφειλόταν εν μέρει στις τεχνολογικές βελτιώσεις και εν μέρει στην αντικατάσταση του γαιάνθρακα από λιγότερο ρυπογόνα καύσιμα, όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο.

Η υπόγεια αεριοποίηση (UCG), της οποίας η ανάπτυξη τον 20ο αιώνα περιορίστηκε από τις ανακαλύψεις μεγάλων αποθεμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου, δεν έχει διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην θετική αλλαγή που αναφέρθηκε παραπάνω. Η ιστορία, ωστόσο, τείνει να επαναληφθεί και η ατμοσφαιρική ρύπανση σε μεγάλες πόλεις όπως η Κίνα, η οποία κατέχει την πρώτη θέση στην παραγωγή και κατανάλωση γαιάνθρακα κάνει επιτακτική την ανάγκη για εφαρμογή νέων και πιο φιλικών προς το περιβάλλον μεθόδων αξιοποίησης των γαιανθράκων.

Η UCG χρησιμοποιήθηκε σε μεγάλη κλίμακα στην πρώην Σοβιετική Ένωση και δοκιμάστηκε σε πολλές χώρες. Ελάχιστες διαταραχές στην επιφάνεια της γης, μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και μείωση της παραγωγής CO<sub>2</sub> κατά 25% λόγω πιο αποδοτικής χρήσης της ενέργειας (σε σύγκριση με τους συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα - [1, 3]) συνδυάζονται στην UCG γεγονός το οποίο την καθιστά μια μέθοδο που έχει την προοπτική να παράγει φθηνή ενέργεια από εγχώριες πηγές γαιάνθρακα χαμηλότερης ποιότητας μη οικονομικά εκμεταλλεύσιμες με τις συμβατικές μεθόδους [1]

Ενώ είναι λύση για πολλά περιβαλλοντικά προβλήματα, η UCG έχει μια δική της περιβαλλοντική ανησυχία, τη πιθανότητα μόλυνσης των υπόγειων υδάτων. Ωστόσο, το αμερικανικό πρόγραμμα

UCG της δεκαετίας του 1970 και της δεκαετίας του 1980 έδειξε πειστικά ότι, εάν οι μονάδες UCG λειτουργούν σωστά, δεν υπάρχει κίνδυνος για τους υδροφόρους ορίζοντες στις περιοχές όπου εφαρμόζεται.[4].



Εικ.21 Τα πρώτα απλοποιημένα σχέδια για τα υπόγεια συστήματα αεριοποίησης [130]

## 2.3 Ανάλυση της μεθόδου UCG

Η βασική διαδικασία της UCG περιλαμβάνει την διάνοιξη δυο γεωτρήσεων από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι μέσα στο στρώμα του γαιάνθρακα, μια για την έγχυση των οξειδωτικών (νερό/αέρα ή νερό/οξυγόνο) και μια σε κάποια απόσταση για να οδηγηθεί το αέριο που παράγεται στην επιφάνεια. Ο γαιάνθρακας αεριοποιείται υπόγεια με την δημιουργία μιας σύνδεσης, μέσω του ίδιου του στρώματος ανάμεσα στην γεώτρηση έγχυσης και παραγωγής και εγγέοντας αέρα (ή οξυγόνο) και νερό (ή ατμό) στην ζώνη του υπόγειου αντιδραστήρα. Τα εγγεόμενα αέρια αντιδρούν με τον γαιάνθρακα για να σχηματίσουν ένα αναφλέξιμο αέριο (αέριο σύνθεσης-Syngas) το οποίο έρχεται στην επιφάνεια μέσα από την γεώτρηση παραγωγής, αυτό στην συνέχεια καθαρίζεται και χρησιμοποιείται ως καύσιμο ή ως χημική πρώτη ύλη. Μια κοιλότητα διαμορφώνεται καθώς ο γαιάνθρακας αεριοποιείται της οποίας η οροφή εν μέρει καταρρέει. Αυτό οδηγεί στην πλευρική ανάπτυξη και εξέλιξη της αεριοποίησης επιτρέποντας να συνεχιστεί μέχρι την επιδείνωση της ποιότητας του αερίου προϊόντος που παράγεται. Όσο μεγαλύτερη είναι η πλευρική ανάπτυξη, τόσο μεγαλύτερη είναι η ζωή του υπόγειου αεριοποιητή και πιο οικονομικά αποδοτική η λειτουργία του.

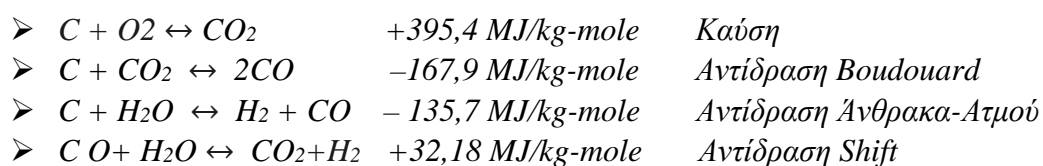
Όταν η ποιότητα του αερίου προϊόντος δεν είναι πλέον ικανοποιητική, νέο τμήμα γαιάνθρακα αναφλέγεται περαιτέρω κατά μήκος της γεώτρησης έγχυσης. Αφού έχει εξαντληθεί το τμήμα της στρώσης του γαιάνθρακα εντός του υπόγειου αεριοποιητή, διανοίγονται νέες γεωτρήσεις έγχυσης και παραγωγής και η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε μεγαλύτερη απόσταση ή σε μεγαλύτερο βάθος. Η έγχυση οξυγόνου και όχι αέρα μειώνει την περιεκτικότητα σε άζωτο και αυξάνει την

θερμογόνο δύναμη του αερίου που παράγεται στο ένα τέταρτο περίπου της θερμογόνου δύναμης του φυσικού αερίου. Αν ο στόχος είναι η παραγωγή αερίου υψηλής θερμογόνου δύναμης το ποσοστό του μεθανίου στο αέριο που παράγεται πρέπει να ενισχυθεί. Για το σχηματισμό μεθανίου στο UCG, απαιτούνται δύο πρόσθετα βήματα. Αρχικά, μέρος του μονοξειδίου του άνθρακα που παράγεται κατά τη διαδικασία της αεριοποίησης αντιδρά με ατμό για να σχηματίσει επιπλέον υδρογόνο. Αυτό το βήμα, δημιουργεί την κατάλληλη αναλογία των αερίων για το επόμενο βήμα που ονομάζεται μεθανογένεση. Το θερμό αέριο που παράγεται έτσι επιτρέπεται να περάσει μέσα από την στρώση του γαιάνθρακα μέχρι την γεώτρηση παραγωγής μέσω της οποίας μεταφέρεται στην επιφάνεια όπου καθαρίζεται και αναβαθμίζεται ποιοτικά για περαιτέρω χρήση.

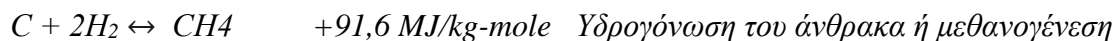
Στην πραγματικότητα, η αεριοποίηση διαφέρει από την καύση, η οποία λαμβάνει χώρα όταν καίγεται ο γαιάνθρακας στο λόγο αέρα, που στην πρώτη περίπτωση είναι υποστοιχειομετρικός  $\lambda < 1$  ενώ στη δεύτερη υπερστοιχειομετρικός ( $\lambda \geq 1$ ), σε σχέση με το απαιτούμενο οξυγόνο για πλήρη καύση. Μια άλλη σημαντική διαφορά μεταξύ της καύσης του γαιάνθρακα και της αεριοποίησης του είναι στον σχηματισμό των ρύπων. Το αναγωγικό περιβάλλον στην αεριοποίηση μετατρέπει το θείο (S) από τον γαιάνθρακα σε υδρόθειο (H<sub>2</sub>S) και το άζωτο (N) σε αμμωνία (NH<sub>3</sub>), ενώ η καύση (οξειδωση) παράγει διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>) και οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>).

Οι κυριότερες διεργασίες μπορούν να χωριστούν σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι αυτό της πυρόλυσης (επίσης γνωστό ως εξανθράκωση ή θερμική αποσύνθεση) και το δεύτερο είναι η αεριοποίηση. Κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης ο γαιάνθρακα μετατρέπεται σε ένα υπολειμματικό εξανθράκωμα απελευθερώνοντας πίσσες, υδρογονάνθρακες με χαμηλότερο μοριακό βάρος και άλλα αέρια πολύ πλουσιότερα σε υδρογόνο από ότι το κύριο σώμα του γαιάνθρακα. Η αεριοποίηση λαμβάνει χώρα όταν το νερό, το οξυγόνο, το οξείδιου του άνθρακα και το υδρογόνο αντιδρούν με αυτό το υπολειμματικό εξανθράκωμα παράγοντας το αέριο σύνθεσης .

Η αεριοποίηση των γαιανθράκων διαφοροποιείται από την πυρόλυση και απαιτεί την υποχρεωτική παρουσία περίσσειας υδρατμού οδηγώντας μετά από επαρκή χρόνο παραμονής σε υψηλές θερμοκρασίες, στην πλήρη μετατροπή του οργανικού μέρους του άνθρακα σε καύσιμο αέριο πλούσιο σε υδρογόνο. Οι χημικές αντιδράσεις που σε διάφορους συνδυασμούς και βαθμούς μετατροπής αεριοποιούν τους γαιάνθρακες, συνήθως εξελίσσονται με σημαντικούς ρυθμούς σε θερμοκρασίες ανώτερες των 1500°F (815°C) και μπορούν γενικά να αποδοθούν με τις ακόλουθες χημικές εξισώσεις :



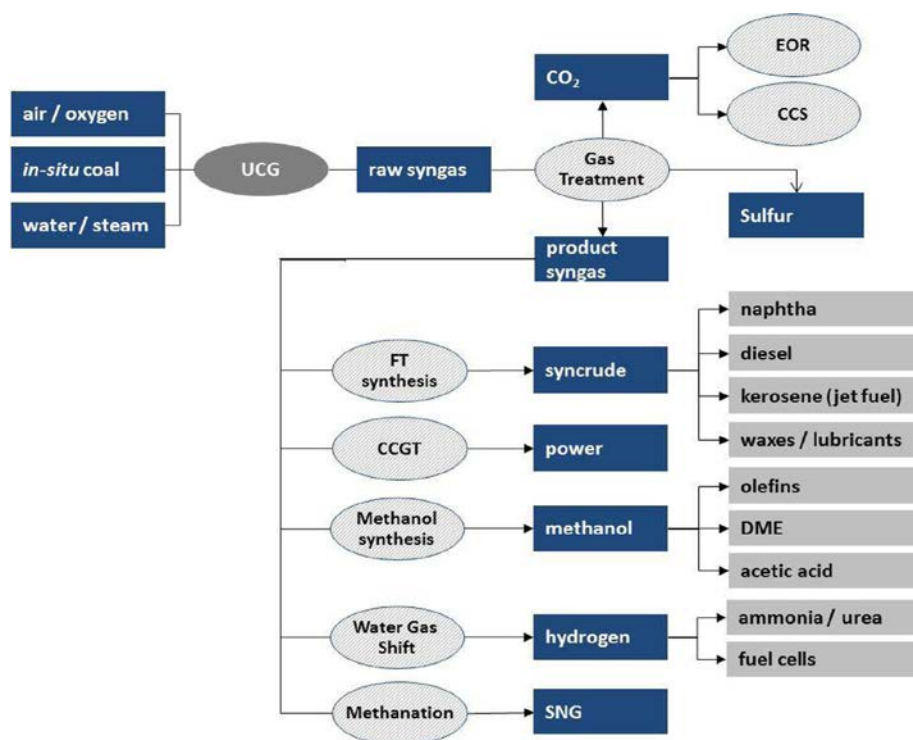
Σε θερμοκρασίες μικρότερες των 2000°F (1150°C) και σε αυξημένες πιέσεις, το υδρογόνο αντιδρά, επίσης, με τον άνθρακα προς σχηματισμό μεθανίου:



Η μεγάλη ποικιλία συνθηκών και αεριοποιούμενων τύπων γαιάνθρακα, οδηγεί σε μεγάλη ποικιλία συμμετοχής και βαθμού μετατροπής των παραπάνω αντιδράσεων και κατ' επέκταση σε μία ευρεία γκάμα πιθανών συστάσεων του παραγόμενου αερίου. Το ξηρό παραγόμενο αέριο είναι μίγμα κυρίως CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> και CH<sub>4</sub>, ενώ είναι πολύ πιθανό να φέρει μικροποσότητες H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, ελαφρών αερίων υδρογονανθράκων και πτητικών συστατικών της πίσσας πυρολύσεως (tars).

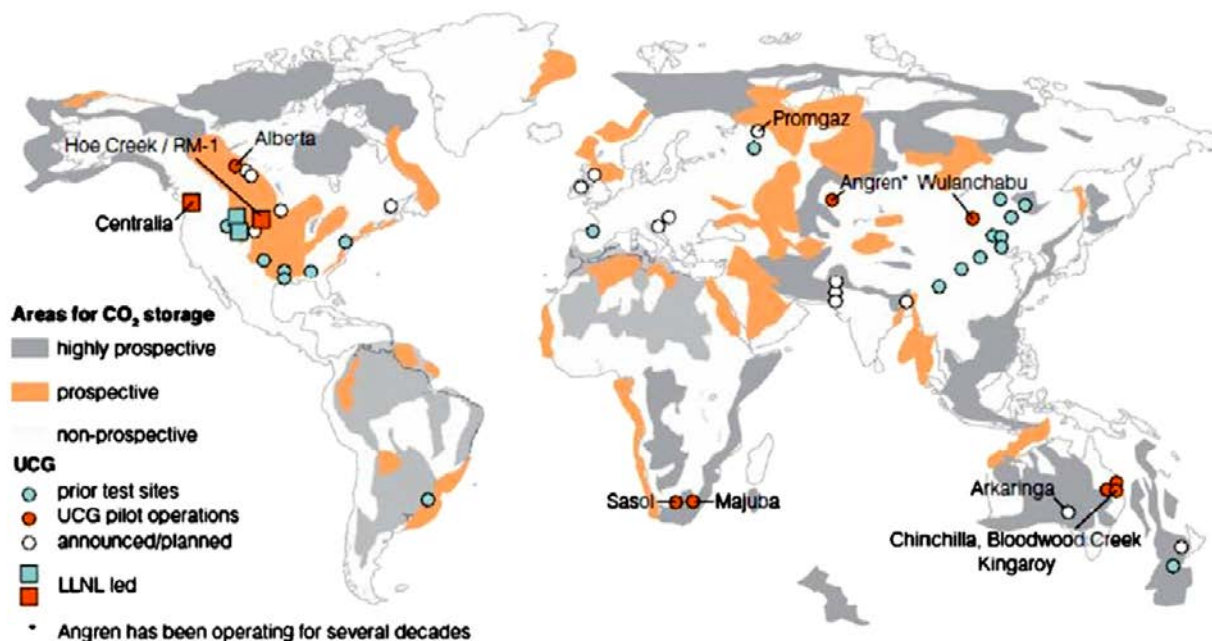
Το αέριο σύνθεσης (syngas) που προκύπτει από την UCG μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί σε μια ποικιλία διεργασιών όπως:

- Καύση σε αεριοστρόβιλο συνδυασμένου κύκλου για την παραγωγή ηλεκτρισμού.
- Μετατροπή του σε συνθετικό αργό πετρέλαιο για την παραγωγή νάφθας, ντίζελ και κηροζίνης μέσω της διαδικασίας Fischer-Tropsch.
- Μετατροπή του σε μεθανόλη, η οποία μπορεί να αναλυθεί περαιτέρω σε διμεθυλικό αιθέρα (πιθανό καύσιμο μεταφοράς), ολεφίνες και οξικό οξύ.
- Μετατροπή του σε υδρογόνο για παραγωγή αμμωνίας και ουρίας για χρήση αυτών σε κυψέλες καυσίμου (π.χ. [15-17])
- Τη μετατροπή του σε συνθετικό φυσικό αέριο μέσω της μεθόδου μεθανογένεσης (methanation process).



**Εικ.22** Διεργασίες επεξεργασίας του αερίου σύνθεσης που παράγεται από την υπόγεια αεριοποίηση γαιάνθρακα και προϊόντα που προκύπτουν από αυτές. [131]

Η εικόνα 23 δείχνει τις παγκόσμιες θέσεις όπου χρησιμοποιείται η μέθοδος UCG καθώς και τις περιοχές που θεωρείται ότι υπάρχουν προοπτικές για χρήση της.



**Εικ.23** Σύνοψη των χωρών όπου γίνεται χρήση της υπόγειας αεριοποίησης γαιάνθρακα, συμπεριλαμβανομένων των χωρών δοκιμής, πιλοτικών εργασιών και περιοχών που πιστεύεται ότι υπάρχουν προοπτικές για τη δέσμευση CO<sub>2</sub>( [14]).[131]

### 2.3.1 Υπόγειες μέθοδοι αεριοποίησης γαιάνθρακα

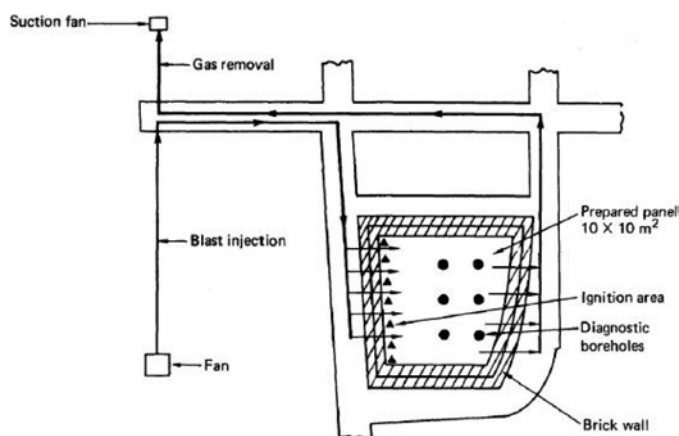
Οι κύριες μέθοδοι για την υπόγεια αεριοποίηση άνθρακα είναι:

- Μέθοδος θαλάμου και ροής
- Μέθοδος των συνδεδεμένων κάθετων γεωτρήσεων
- Μέθοδος απότομης κλίνης
- Μέθοδος ελεγχόμενης απομάκρυνσης του σημείου έγχυσης
- Μέθοδος μεγάλης σήραγγας (Long Tunnel Method)

### 2.3.2 Μέθοδος θαλάμου και ροής

Οι προσπάθειες για την ανάπτυξη μεθόδων UCG ξεκίνησαν στη δεκαετία του 1930 στην πρώτη Σοβιετική Ένωση. Τα αρχικά πειράματα διεξήχθησαν σε ένα εύρος γαιανθράκων σε τρεις λεκάνες: τη Μόσχα, το Ντόνετσκ και το Κουζνέτσκ, με μερικές από τις πρώτες προσπάθειες να αποσκοπούν στην εκμετάλλευση στύλων γαιάνθρακα που απέμειναν από την εξόρυξη του με τη μέθοδο θαλάμου και στύλου [18]. Η εικόνα 23 δείχνει τη διαμόρφωση του πρώτου πειράματος της UCG που πραγματοποιήθηκε στο ορυχείο Krutova στη λεκάνη της Μόσχας το 1933 [19,20]. Ένα πάνελ γαιάνθρακα μεγέθους 10x10 (m) διαχωρίστηκε από το υπόλοιπο κοίτασμα χρησιμοποιώντας

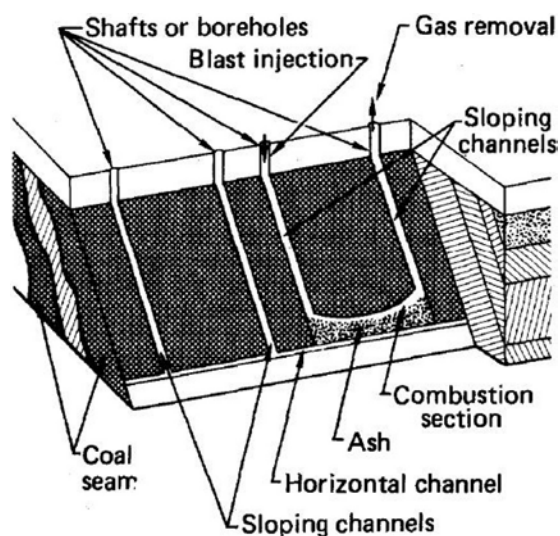
τοιίχους από τούβλα και στην συνέχεια κάνοντας έγχυση αέρα στη μία πλευρά των υφιστάμενων οπών υπήρχε συλλογή του παραγόμενου αερίου από την άλλη πλευρά του θαλάμου. Σε αυτά τα πρώιμα πειράματα UCG, διαπιστώθηκε ότι το μέτωπο της φλόγας που δημιουργούταν ήταν πολύ δύσκολο να ελεγχθεί λόγω της ετερογενούς φύσης των αποθεμάτων γαιάνθρακα, και έτσι κρίθηκαν μη ικανοποιητικά. Αυτή η μέθοδος ονομάστηκε μέθοδος θαλάμου.



**Εικ. 24** Το πρώτο πείραμα UCG- η μέθοδος θαλάμου [131]

Το 1933 μια ομάδα μηχανικών από το Ινστιτούτο Χημείας Άνθρακα του Ντόνετσκ πρότεινε την αεριοποίηση του γαιάνθρακα σε κανάλι [35]. Η μέθοδος περιλάμβανε την διάνοιξη δύο κάθετων καναλιών (Sloping Channels) μέχρι το απόθεμα του γαιάνθρακα και την διάνοιξη ενός τρίτου οριζόντιου καναλιού (Horizontal Channel) μεταξύ τους και παράλληλα στην στρώση του κοιτάσματος. Το οξειδωτικό θα εγγεόταν στο ένα κάθετο κανάλι και η απόληψη του παραγόμενου αερίου θα γινόταν από το δεύτερο. Η τεχνική αυτή, η οποία έγινε γνωστή και ως μέθοδος ροής, εφαρμόστηκε σε αποθέματα γαιάνθρακα στο Ντόνετσκ [18]. Η εικόνα 24 δείχνει μια σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου ροής.





**Εικ. 25** Μέθοδος ροής [131]

Στη δεκαετία του 1940 οι Σοβιετικοί άρχισαν να πειραματίζονται χρησιμοποιώντας διάφορα μοτίβα διάνοιξης οπών από την επιφάνεια μέχρι τα υπόγειες στρώσεις γαιάνθρακα. [18,21,22,23]. Οι πρώτες μέθοδοι (χωρίς την χρήση καναλιών) χρησιμοποίησαν ορθογώνιες και κυκλικές συστοιχίες γεωτρήσεων σε μικρή απόσταση μεταξύ τους (απόσταση κάποιων μέτρων). Η διαδικασία επιτόπιας καύσης ξεκίνησε με ρίψη φλεγόμενων γαιανθράκων σε ένα ποσοστό των οπών που είχαν διανοιχθεί, ενώ παράλληλα σε κάποια από αυτές πραγματοποιούταν τροφοδότηση με αέρα. Τέλος από τις υπόλοιπες οπές που απέμεναν γινόταν η ανάκτηση των παραγόμενων αερίων. Αυτή η μέθοδος ήταν μια παραλλαγή της μεθόδου ροής η οποία ονομάζονταν γενικά μέθοδος διήθησης. Λόγω της χαμηλής φυσικής διαπερατότητας των αποθεμάτων του γαιάνθρακα, οι Σοβιετικοί δυσκολευτήκαν να επιτύχουν ικανοποιητικές επιδόσεις ενώ το κόστος ήταν απαγορευτικά υψηλό λόγω της ανάγκης για γεωτρήσεις σε πολύ κοντινές αποστάσεις.

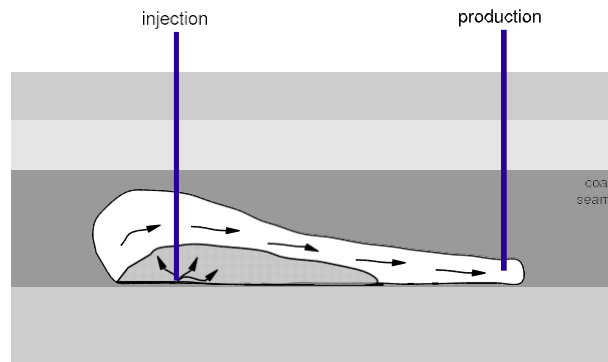
### 2.3.3 Μέθοδος των συνδεδεμένων κάθετων γεωτρήσεων

Η τεχνική των συνδεδεμένων κατακόρυφων γεωτρήσεων (Long Vertical Wells-LVW) εξελίχθηκε μέσα σε μια περίοδο αρκετών δεκαετιών καθώς οι Σοβιετικοί πειραματίστηκαν με μια σειρά από μεθόδους, αποκαλούμενες «μέθοδοι σύνδεσης», για να αυξήσουν το ποσοστό εκμετάλλευσης των αποθεμάτων του γαιάνθρακα μεταξύ των παράλληλων κάθετων γεωτρήσεων.

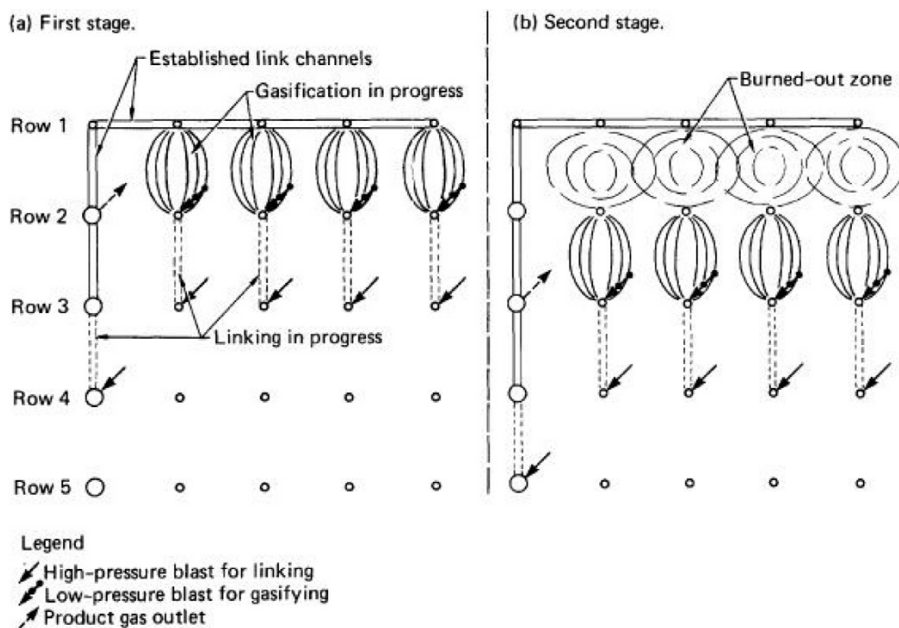
Αυτές οι μέθοδοι περιλάμβαναν την ανάστροφη καύση, την ηλεκτρική αντίσταση θέρμανσης, την υδραυλική διάσπαση και την κατευθυντήρια διάτρηση [18,24,25]. Η τεχνική της ανάστροφης καύσης βρέθηκε να είναι μια αξιόπιστη μέθοδος, υλοποιήσιμη σε σχετικά μικρά βάθη και σε σχετικά χαμηλής ποιότητας στρώσεις γαιάνθρακα (λιγνίτες, υποβιτουμενιούχοι γαιάνθρακες) η οποία θα μπορούσε να λειτουργήσει με αποστάσεις κέντρων των γεωτρήσεων της τάξης των 20 m έως 50 m μεταξύ τους.

Στις εικόνες 25 και 26 φαίνεται ένα τυπικό παράδειγμα της συστοιχίας γεωτρήσεων και της ακολουθίας αεριοποίησης της ανωτέρου μεθόδου. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε στο σταθμό

Shatskaya στη λεκάνη της Μόσχας, παράγοντας αρκετές εκατοντάδες εκατομμύρια κυβικά μέτρα (m<sup>3</sup>) αερίου σύνθεσης(syngas) ετησίως από λιγνίτη πάχους 2 έως 4 m, σε μικρό βάθος [26]. Η μέθοδος της ανάστροφης καύσης έχει αρκετούς περιοριστικούς παράγοντες καθώς απαιτεί σχετικά διαπερατές στρώσεις γαιάνθρακα, μικρές αποστάσεις μεταξύ των γεωτρήσεων και σχετικά πολύ χρόνο για την ολοκλήρωση μιας υπόγειας διασύνδεσης, με τυπικές ταχύτητες σύνδεσης μεταξύ 1 και 4 m ανά ημέρα [27].



**Εικ.26** Μέθοδος συνδεδεμένων κάθετων φρεατίων [131]

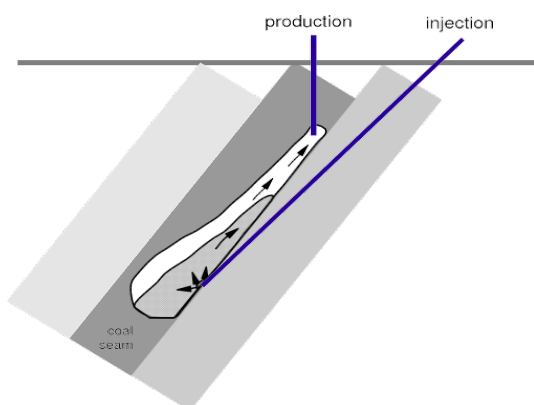


**Εικ.27** Μέθοδος συνδεδεμένων κάθετων φρεατίων [131]

### 2.3.4 Μέθοδος απότομης κλίνης

Πολλά κοιτάσματα γαιάνθρακα εκτείνονται σε απότομες γωνίες και βάθη και όχι οριζόντια γεγονός που τα καθιστά οικονομικά μη εκμεταλλεύσιμα. Για αυτές τις περιπτώσεις οι Σοβιετικοί ανέπτυξαν μια εναλλακτική τεχνική.

Οι γεωτρήσεις έγχυσης, συνήθως κεκλιμένες, διανοίγονταν από την επιφάνεια έως το στρώμα του γαιάνθρακα και μια δεύτερη σειρά από γεωτρήσεις δημιουργούνταν ως το υποκείμενο κοιτάσμα για να λειτουργήσουν ως γεωτρήσεις παραγωγής [22]. Η αεριοποίηση γαιάνθρακα με αυτή την μέθοδο πραγματοποιήθηκε στη θέση Rawlins στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής [18,28,29]. Ο γαιάνθρακας αεριοποιείται στον πυθμένα της κοιλότητας που δημιουργείται προκαλώντας την απελευθέρωση της υγρασίας και των πτητικών ουσιών που περιλαμβάνονται σε αυτόν ενώ τα παραγόμενα αέρια κινούνται προς τα πάνω όπως φαίνεται στην εικόνα 27. Η ποιότητα των αερίων που δημιουργούνται από αυτή την μέθοδο είναι πολύ καλή [30] - πιθανώς λόγω της μεγάλης επιφάνειας αντίδρασης ωστόσο, η εφαρμογή της περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα κοιτασμάτων γαιάνθρακα με τις κατάλληλες προϋποθέσεις. Δεδομένου ότι η τέφρα και η σκωρία έχουν την τάση να δημιουργήσουν μια ζώνη χαμηλής διαπερατότητας πάνω από το φρεάτιο έγχυσης, χρειάζονται πολλαπλά φρεάτια έγχυσης για την αεριοποίηση ενός κοιτάσματος γαιάνθρακα [22].



**Εικ.28** Μέθοδος απότομης κλίνης [131]

### 2.3.5 Μέθοδος ελεγχόμενης απομάκρυνσης του σημείου έγχυσης

Η τεχνική CRIP (Controlled Retracting Injection Point Method) χρησιμοποιεί κατευθυντήριο διάτρηση για να δημιουργήσει μια γεώτρηση έγχυσης, χαμηλά και οριζόντια στο κοιτάσμα, όπως φαίνεται στις εικόνες 28 και 29[31]. Έχοντας ένα ανασυρόμενο αναφλεκτήρα / εγχυτήρα, η θέση της έγχυσης μπορεί να μετακινηθεί από τους χειριστές στην επιφάνεια, επιτρέποντας μια σταδιακή πρόσβαση στο κοιτάσμα του γαιάνθρακα.

Στο πρώτο στάδιο, το σημείο έγχυσης βρίσκεται κοντά στην γεώτρηση παραγωγής. Στο δεύτερο και στα επόμενα στάδια το σημείο έγχυσης αποσύρεται μακριά από την γεώτρηση παραγωγής για να σχηματίσει μια νέα κοιλότητα αεριοποίησης στον φρέσκο γαιάνθρακα.

Η τεχνική εφαρμόστηκε πρωταρχικά σε μεγάλη κλίμακα σε δοκιμαστική αεριοποίηση στην Centralia (Πενσυλβανία) [46]. Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής CRIP είναι ότι η θέση της έγχυσης παραμένει χαμηλά στο κοίτασμα ενώ η ζημία που προκαλείται από τις καθιζήσεις ελαχιστοποιείται και μεγάλες ποσότητες γαιάνθρακα μπορούν να αεριοποιηθούν με ένα μόνο ζεύγος γεωτρήσεων (έγχυσης και παραγωγής)

Η τεχνική CRIP χωρίζεται σε δυο τύπους (L-CRIP και P-CRIP) τα χαρακτηριστικά των οποίων συνοψίζονται στον Πίνακα 2. Ενώ υπάρχουν πολλά ζητήματα με τα βασικά να αφορούν την απόδοση κάθε σχεδίου για έναν πλήρη κύκλο ζωής από την έναρξη μέχρι το κλείσιμο του υπόγειου αεριοποιητή.

**Πίνακας -2-Χαρακτηριστικά των (L-CRIP και P-CRIP)**

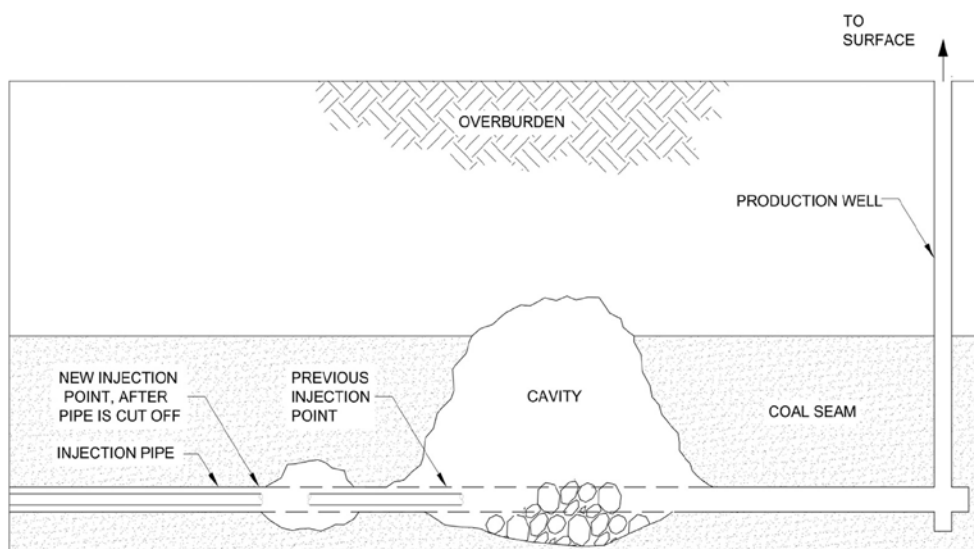
<u>L-CRIP</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Μονή οριζόντια γεώτρηση. Μειωμένο κόστος γεωτρήσεων.</li> <li>➤ Πιθανές γεωμηχανικές επιπτώσεις στην παραγωγή.</li> <li>➤ Υψηλότερες θερμοκρασίες κατά την παραγωγή και κατά την έναρξη της ζωής τους.</li> <li>➤ Χαμηλότερες θερμοκρασίες στο τέλος της ζωής τους</li> <li>➤ Αβεβαιότητα χρόνου παραμονής και απώλειας θερμότητας στην απόδοση της διαδικασίας</li> </ul>
<u>P-CRIP</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Δύο οριζόντιες γεωτρήσεις . Υψηλότερο κόστος γεωτρήσεων</li> <li>➤ Μειωμένες γεωμηχανικές επιπτώσεις στη γεώτρηση παραγωγής</li> <li>➤ Προοπτικές για υψηλότερη μετατροπή γαιάνθρακα ανά ζεύγος γεωτρήσεων</li> <li>➤ Χαμηλότερες θερμοκρασίες κατά την παραγωγή και κατά την έναρξη της ζωής τους. Υψηλότερες θερμοκρασίες στο τέλος του κύκλου ζωής τους</li> <li>➤ Πιθανή παρεμπόδιση παραγωγής από την παραγόμενη πίσσα κατά την εκκίνηση.</li> <li>➤ Αβεβαιότητα του εφικτού μήκους του μετώπου της αεριοποίησης (πλευρική απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων)</li> </ul>

Ο σχεδιασμός L-CRIP είναι οικονομικά ελκυστικός λόγω της απαίτησης για μια μονή οριζόντια γεώτρηση, ωστόσο πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε να αποφευχθούν πιθανές γεωμηχανικές επιπτώσεις στην γεώτρηση παραγωγής και για την διαχείριση των υψηλών θερμοκρασιών που υπάρχουν κατά την έναρξη. Ο σχεδιασμός είναι κατάλληλος για γεωλογικές συνθήκες, όπου το υπερκείμενο υλικό είναι ισχυρά συνεκτικό και έχει χαμηλή τάση να υποστεί κατάρρευση. Ενώ η έννοια της χρήσης διακριτών αναφλέξεων αποτέλεσε τη βάση της μεθόδου L-CRIP, η πρόσφατη επιχειρησιακή εμπειρία με το Gasifier 5 στο Chinchilla της Αυστραλίας δείχνει ότι η συνεχής αεριοποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί υπό συνθήκες με εμφύσηση αέρα και φαίνεται επίσης εφικτή για την αεριοποίηση με εμφύσηση οξυγόνου. Μια εναπομένουσα αβεβαιότητα είναι το

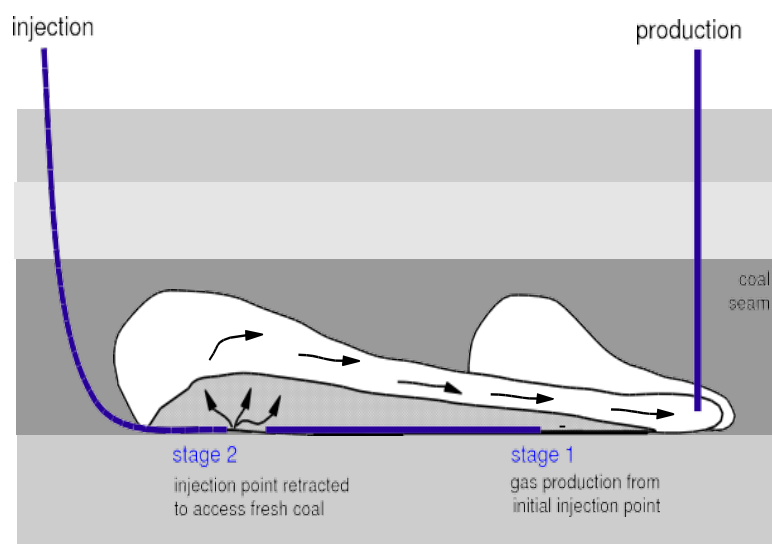
πόσο καλά οι αεριοποιητές με μεγάλο μήκος (L-CRIP (> 500 m)) θα αποδίδουν προς το τέλος της ζωής τους, λόγω των επιπτώσεων από την απώλεια θερμότητας.

Ο σχεδιασμός P-CRIP είναι ελκυστικός για γεωλογικές συνθήκες, οι οποίες ενδέχεται να έχουν μεγάλη τάση να καταρρεύσουν, καθώς το υπολείμματά πιθανής καθίζησης πίσω από το μέτωπο αεριοποίησης δεν θα εμποδίσουν καταστροφικά τη διαδρομή ροής του οξειδωτικού και του παραγόμενου αερίου σύνθεσης (Syngas). Ωστόσο, καθώς ο σχεδιασμός P-CRIP απαιτεί τη διάνοιξη δύο οριζοντίων γεωτρήσεων, είναι γενικά πιο δαπανηρή μέθοδος από το σχεδιασμό L-CRIP. Μία σημαντική αβεβαιότητα του P-CRIP είναι κατά πόσον μια κάθετη μετακίνηση του μετώπου της αεριοποίησης μπορεί να γίνει σε μεγάλη απόσταση (> 500 m).

Ένα άλλο ζήτημα με το σχέδιο P-CRIP είναι η τάση της πίσσας όταν στερεοποιείται να περιορίζει ή να αποκόπτει τελείως την ροή στη γεώτρηση παραγωγής κατά την εκκίνηση. Αυτό το ζήτημα παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια του έργου Gasifier 4 στο Chinchilla και συνέβαλε στην επιλογή του σχεδιασμού L-CRIP στο Gasifier 5. Παρόλα αυτά, παρόμοια θέματα δεν αναφέρθηκαν στο έργο BloodwoodCreek. Αν το κοιτάσμα γαιάνθρακα που θέλουμε να εκμεταλλευτούμε είναι πλούσιο σε πτητικά συστατικά και παράγει σημαντική ποσότητα πίσσας, τότε η έναρξη λειτουργίας μιας μεγάλης ψυχρής οριζόντιας γεώτρησης παραγωγής μπορεί να γίνει πολύ δύσκολη.



**Εικ.29** Ελεγχόμενη διαδικασία επανατοποθέτησης του σημείου έγχυσης (L-CRIP) για υπόγεια αεριοποίηση γαιάνθρακα [131]



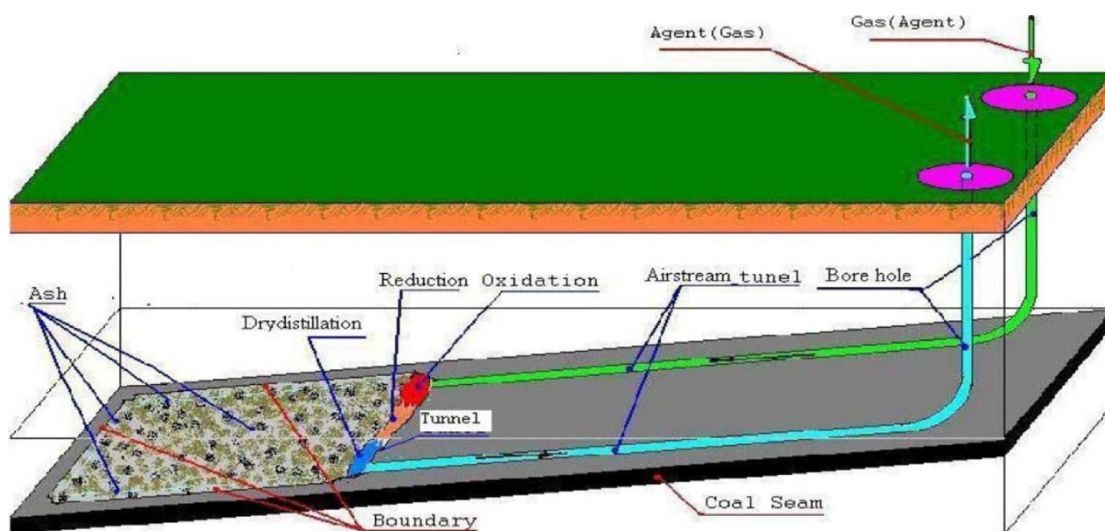
**Εικ.30** Ελεγχόμενη διαδικασία επανατοποθέτησης του σημείου έγχυσης (L-CRIP) για υπόγεια αεριοποίηση γαιάνθρακα [131]

### 2.3.6 Μέθοδος μεγάλης σήραγγας (Long tunnel method)

Η μέθοδος μεγάλης σήραγγας έχει αναπτυχθεί στο Κινεζικό Πανεπιστήμιο Μεταλλείων και Τεχνολογίας (CUMT) και είναι ένα μίγμα μεθόδων UCG με χρήση νέων ή ήδη διανοιγμένων γεωτρήσεων σε παλαιότερα ορυχεία [29,49,50]. Η διαδικασία ονομάζεται μέθοδος UCG "μακράς σήραγγας, μεγάλης διατομής, δύο σταδίων" [32].

Περιλαμβάνει γεωτρήσεις, δημιουργία σήραγγας αερισμού και σήραγγας αεριοποίησης όπως φαίνεται στην εικόνα 30. Το μέγεθος κάθε χώρου που γίνεται αεριοποίηση είναι περίπου 200 m x 200 m [33]. Στο πρώτο στάδιο της λειτουργίας, εισάγεται αέρας στον αεριοποιητή, για να στηρίξει την καύση, θερμαίνοντας την επιφάνεια του κοιτάσματος του γαιάνθρακα σε πάνω από 1000 ° C. Στο δεύτερο στάδιο, ο ατμός εγχέεται και αντιδρά με τον γαιάνθρακα σε υψηλή θερμοκρασία για να σχηματίσει μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο, με τη συγκέντρωση του H<sub>2</sub> να φτάνει περίπου 50% vol. στο παραγόμενο αέριο σύνθεσης (Syngas) [34].

Ο κύριος στόχος της μεθόδου είναι η πρόσβαση σε πόρους γαιάνθρακα από τις ήδη υπάρχουσες γεωτρήσεις σε κοιτάσματα παλαιότερων ορυχείων και έχει το πλεονέκτημα να παράγει υψηλής ποιότητας αέριο σύνθεσης (Syngas) όταν χρησιμοποιεί τον αέρα ως οξειδωτικό [35]. Οι παραγωγικές ικανότητες κάθε αεριοποιητή αναφέρεται ότι είναι της τάξης των 1500 Nm<sup>3</sup> / h αέριο σύνθεσης (Syngas) [32]. Από τη δεκαετία του 1990 έχουν κατασκευαστεί και λειτουργούν πάνω από 15 σημεία αεριοποίησης με την ανωτέρω μέθοδο παγκόσμια [33].



Εικ.31 Μέθοδος μακράς σήραγγας αεριοποίησης κοιτασμάτων γαιάνθρακα [131]

## 2.4. Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της διαδικασίας της αεριοποίησης

Έχουν γίνει προσπάθειες για την αεριοποίηση ενός ευρέος φάσματος τύπων γαιάνθρακα σε διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες κοιτασμάτων. Ο Πίνακας 3 παρέχει μια σύνοψη των υπόγειων αεριοποιητών που λειτουργούν μέχρι σήμερα ενώ ο Πίνακας 4 παρουσιάζει ένα σύνολο βασικών δεικτών απόδοσης (Key Performance Indicators-KPI) για την UCG.

**Πίνακας -3-**«Σύνοψη σημαντικών έργων υπόγειας αεριοποίησης γαιάνθρακα που λειτουργούν παγκοσμίως»

Χώρα	Τοποθεσία	Έτος έναρξης	Τύπος γαιάνθρακα	Τεχνική	Εγγεόμενο αέριο	Βάθος κοιτάσματος (m)	Πάχος κοιτάσματος (m)	Θερμική ισχύς αερίου (MJ/m <sup>3</sup> )	Αναφορά
Πρώην Σοβιετική Ένωση	Lisichansk	1935	Bit.	SDB	Air	30	1	3.8	[21]
	Podmoskovna	1947	L	LVW	Air	55	3	3.4	[21]
	Yuzno-Abinskaja	1955	Bit.	SDB	Air	» 100	3	4.1	[21]
	Shatskaya	1959	L	LVW	Air	50	2	3.2	[26]
	Angrenskaja	1961	L	LVW	Air	150	9	3.4	[36]
ΗΠΑ	Hanna I	1973	HVC	LVW	Air	120	9	4.2	[30]
	Hanna II	1975	HVC	LVW	Air	85	9	5.3	[30]
	Hanna III	1977	HVC	LVW	Air	85	9	4.1	[30]
	HoeCreek I	1976	HVC	LVW	Air	40	8	3.6	[30]
	HoeCreek IIA	1977	HVC	LVW	Air	40	8	3.4	[30]
	HoeCreek IIB	1977	HVC	LVW	O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	40	8	9.0	[30]

	HoeCreek IIIA	1979	HVC	LVW	Air	40	8	3.9	[30]
	HoeCreek IIIB	1979	HVC	LVW	O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	40	8	6.9	[30]
	Pricetown I	1979	Bit.	LVW	Air	270	2	6.1	[30]
	Rawlins IA	1979	SB	SDB	Air	105	18	5.6	[30]
	Rawlins IB	1979	SB	SDB	O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	105	18	8.1	[30]
	Centralia A	1984	SBC	K-CRIP	O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	75	6	9.7	[37]
	Centralia B	1984	SBC	LVW	O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	75	6	8.4	[37]
	RockyMountain IA	1987	SB	K-CRIP	O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	110	7	9.5	[38]
	RockyMountain IB	1987	SB	LVW	O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	110	7	8.8	[38]
Ηνωμένο Βασίλειο	Newman-Spinney P5	1949	SB	BH	Air	75	1	1.4	[39]
Βέλγιο	Thulin	1986	A	LVW	Air	860	6	7.0	[40]
Ισπανία	El Tremedal	1997	SB	L-CRIP	O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	580	2	10.9	[40]
Πολωνία	Wieczorek	2014	SB	SM	Air, O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>	464	5.5	3.4	[41]
Κίνα	Xinhe	1994	Bit.	LT	Air/Steam	80	3.5	11.8	[32]
	Liuzhuang	1996	HVC	LT	Air/Steam	100	3	12.2	[32]
	Xinwen	2000	HVC	LT	Air/Steam	100	1.8	10.4	[32]
	Feichang	2001	Bit.	LT	Air	90	1.5	5.1	[32]
	Xiyang	2001	A	LT	Air/Steam	190	6	11.9	[32]
Αυστραλία	Chinchilla G1	2000	SB	LVW	Air	132	10	4,5	[42]
	Chinchilla G3	2007	SB	LVW	Air	132	10	4,5	[43]
	Chinchilla G4	2009	SB	P-CRIP	Air	132	10	4,8	[43]
	Chinchilla G5	2011	SB	L-CRIP	Air & O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	132	5.5	4,11	[43]
	Bloodwood Ck, Panel 1	2009	SB	P-CRIP	Air & O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	200	9	5,12	[44]
	BloodwoodCk, Panel 2	2011	SB	P-CRIP	Air	200	9	5,6	[45]
Καναδάς	SwanHills	2011	HVB	L-CRIP	O <sub>2</sub> / H <sub>2</sub> O	1400	4.5	16	[46]

Οδηγός για τα σύμβολα:

Τύπος γαιάνθρακα: :L=λιγνίτης,SB=υποβιτουμενιούχος γαιάνθρακας,SBC=υποβιτουμενιούχος τύπου C,Bit.=βιτουμενιούχος ,HVB=βιτουμενιούχος υψηλής πηκτικότητας τύπουB,A=Ανθρακίτης.

Τεχνική:LVW=Συνδεδεμένες κάθετων γεωτρήσεων,CRIP=Ελεγχόμενου σημείου έγχυσης,L-CRIP=γραμμικός CRIP,P-CRIP=παράλληλος CRIP,K-CRIP=Knife-edge CRIP,SDB=απότομη κλίση, BH=μέθοδος γεώτρησης,LT=μακρύ τούνελ,SM=μέθοδος άξονα



**Πίνακας -4-**

<b>Βασικοί δείκτες απόδοσης της υπόγειας αεριοποίησης γαιάνθρακα.</b>		
<b>Στόχος</b>	<b>Μονάδα μέτρησης</b>	<b>Τρόπος επίτευξης</b>
Αξιόπιστη εκκίνηση και ανάφλεξη	%	Η διαδικασία έναρξης και το σύστημα ανάφλεξης να δοκιμάζονται υπό αντιπροσωπευτικές συνθήκες
Διαθεσιμότητα Αερίου σύνθεσης (Syngas)	%	Συνεχείς εργασίες
Ανάκτηση πόρων γαιάνθρακα	%	Λειτουργία πολλαπλών αεριοποιητών
Χρήση οξυγόνου και ατμού	MJ/kmol -O <sub>2</sub> MJ/kmol-Ατμού	Επιλογή τόπου Επιλογή Οξειδωτικού μέσου Σχεδιασμός αεριοποιητή Λειτουργικές διαδικασίες
Αποδεκτές περιβαλλοντικές επιπτώσεις	Καθίζηση επιφάνειας Επιπτώσεις στο υπέδαφος Συγκέντρωση του Αερίου σύνθεσης (Syngas) Επιπτώσεις σε υπόγεια ύδατα	Επιλογή τόπου Σχεδιασμός αεριοποιητή Λειτουργικές διαδικασίες Παρακολούθηση λειτουργίας
Αποδεκτή χρήση νερού και διαχείριση	Κατανάλωση νερού και ποιότητα εκφόρτισης	Επιλογή τόπου Σχεδιασμός αεριοποιητή Σχεδιασμός εγκαταστάσεων
Κόστος αερίου σύνθεσης (Syngas)	\$/GJ	Επιλογή τόπου Επιλογή Οξειδωτικού μέσου Σχεδιασμός αεριοποιητή Λειτουργικές διαδικασίες

Βασικά, είναι επιθυμητό να υπάρχει χαμηλό κόστος, υψηλή απόδοση, υψηλή ανάκτηση πόρων και αξιόπιστες λειτουργίες με χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Στην πράξη, υπάρχουν πολλές αποφάσεις και συμβιβασμοί που πρέπει να γίνουν για να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα, οι οικονομικές και οι περιβαλλοντικές πτυχές.

Σε αυτό το τμήμα εξετάζεται ένα πιο περιορισμένο σύνολο παραγόντων, συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης των οξειδωτικών μέσων, των ιδιοτήτων του γαιάνθρακα, του βάθους του κοιτάσματος γαιάνθρακα, της κλίμακας της διεργασίας, του σχεδιασμού του αεριοποιητή και των συνθηκών της εγκατάστασης.

## 2.4.1 Επίδραση του οξειδωτικού

Το εγγεόμενο οξειδωτικό είναι συνήθως, αέρας, εμπλουτισμένος με O<sub>2</sub> αέρας, ή μίγμα ατμού / οξυγόνου ή νερού / οξυγόνου. Ο ρυθμός παραγωγής αερίων και η σύνθεσή τους ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο οξειδωτικό, τις συνθήκες λειτουργίας, τις γεωλογικές συνθήκες της θέσης του κοιτάσματος, συμπεριλαμβανομένου του τύπου γαιάνθρακα, καθώς και τη συμπεριφορά των γύρω στρωμάτων και των υδρογεωλογικών συνθηκών.

Όταν χρησιμοποιείται αέρας, το αέριο σύνθεσης που παράγεται έχει χαμηλότερη θερμική ισχύ (3-6 MJ / m<sup>3</sup>) και η περιεκτικότητά του σε άζωτο είναι 40-50% vol. Όταν ένα μίγμα ατμού / οξυγόνου χρησιμοποιείται ως οξειδωτικό, η τιμή της θερμικής ισχύος του αερίου προϊόντος μπορεί να φθάσει τα 11 MJ / m<sup>3</sup> ή περισσότερο.

Ο Πίνακας 5 δείχνει τις επιδόσεις του αεριοποιητή No 5 στη θέση Chinchilla στην Αυστραλία, τόσο για τις διεργασίες όπου έγινε έγχυση αέρα όσο και για τις διεργασίες όπου υπήρξε τροφοδότηση με οξυγόνο. Υπό συνθήκες αεριοποίησης με αέρα, η τιμή της θερμικής ισχύος του αερίου ήταν τυπικά γύρω στα 5 MJ / m<sup>3</sup> ενώ υπό συνθήκες αεριοποίησης με οξυγόνο (με έγχυση νερού) η τιμή ανέρχεται στα 10 MJ / m<sup>3</sup> [43]. Αυτά τα αποτελέσματα είναι τυπικά των έργων UCG που διεξάγονται σε υποβιτουμενιούχους γαιάνθρακες σε σχετικά χαμηλή πίεση.

**Πίνακας 5** Απόδοση του έργου Chinchilla, Gas 5 για τις διεργασίες που έγινε έγχυση αέρας και οξυγόνου [43].

Παράμετρος	Μονάδα	Εγγεόμενος αέρας	Εγγεόμενο οξυγόνο
Σύνθεση αερίου			
H <sub>2</sub>	mol%	18-20	40-45
CO	mol%	8-10	5-10
CO <sub>2</sub>	mol%	15-20	30-35
CH <sub>4</sub>	mol%	5-10	10-13
N <sub>2</sub>	mol%	40-45	0-3
Θερμική ισχύς Syngas επί ξηρού (LHV)	MJ/Nm <sup>3</sup>	5-6	10-11
Χρήση οξυγόνου	MJ/kmol	900-1000	1100-1300
Πίεση λειτουργίας	bar	7	7

Στα σχέδια δοκιμών της μεθόδου στις ΗΠΑ που πραγματοποιήθηκαν τη δεκαετία του 1980, αναλύθηκαν αναλογίες ατμού / οξυγόνου: 1 προς 1, 2 προς 1 και 3 προς 1. Ο πίνακας 6 δείχνει την επίδραση των αλλαγών στον λόγο ατμού / οξυγόνου του οξειδωτικού στην προκύπτουσα σύνθεση του αερίου προϊόντος.

**Πίνακας 6** Επίπτωση της μεταβολής της αναλογίας ατμού / οξυγόνου του οξειδωτικού στην προκύπτουσα σύνθεση του αερίου σύνθεσης (Syngas) στο LBK-5 Large Block Experiment [54].

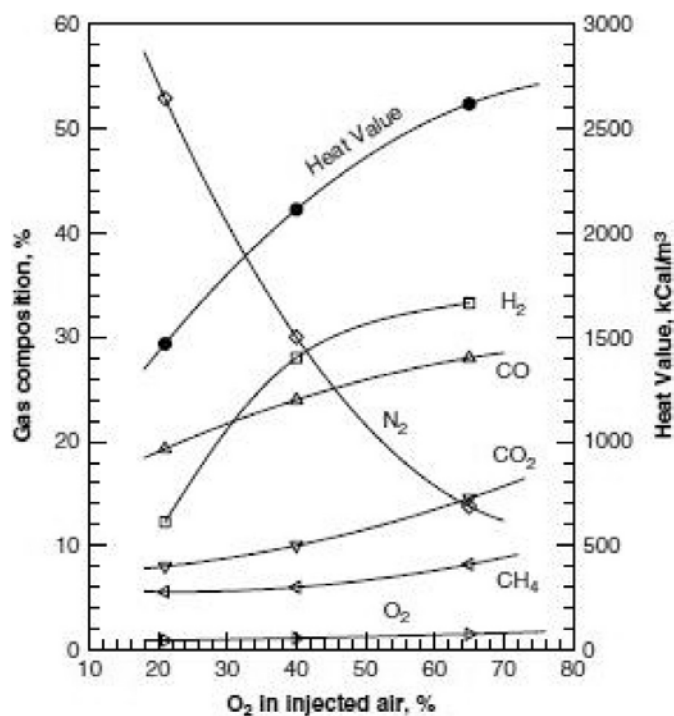
Αλλαγή αναλογίας ατμού / οξυγόνου	Από 1: 1 έως 2: 1	Από 2:1 έως 3:1
Αλλαγή της σύνθεσης του αερίου		
H <sub>2</sub>	+3%	+2%
CO	-19%	-11%
CO <sub>2</sub>	+6%	+3%

Αυξήσεις της αναλογίας ατμού / οξυγόνου οδηγούν σε σημαντικές μειώσεις στην περιεκτικότητα σε CO του αερίου σύνθεσης (Syngas) και μικρότερη αύξηση της περιεκτικότητας σε H<sub>2</sub> και CO<sub>2</sub>[54]. Μεταγενέστερες αναλύσεις έδειξαν ότι η βέλτιστη αναλογία ατμού / οξυγόνου θα ήταν 1,3 προς 1. [47].

Στη μέθοδο της μεγάλης σήραγγας χρησιμοποιείται μια τεχνική αεριοποίησης δύο σταδίων. Στην πρώτη φάση ο αέρας χρησιμοποιείται για τη θέρμανση της επιφάνειας του γαιάνθρακα και στη συνέχεια στη δεύτερη φάση εισάγεται ατμός για να παράγει υψηλής ποιότητας αερίου σύνθεσης (Syngas). Κατά τη φάση της αεριοποίησης με ατμό, η ποιότητα του αερίου είναι τυπικά 11-12 MJ / m<sup>3</sup> και η σύνθεση αερίου αναφέρεται ως:

- H<sub>2</sub> 47-58% κατ' όγκο,
- CO 8-14% κατ' όγκο,
- CO<sub>2</sub> 19-23% κατ' όγκο,
- CH<sub>4</sub> 9- 12% και
- N<sub>2</sub> 5-9% κατ' όγκο [29].

Η επίδραση της περιεκτικότητας σε οξυγόνο του αέρα που χρησιμοποιείται στην ποιότητα του προϊόντος που παράγεται (από τις δοκιμές της μεθόδου της μεγάλης σήραγγας) φαίνεται στην εικόνα 32. Η χρήση υψηλών επιπέδων εμπλουτισμού O<sub>2</sub> στον αέρα οδηγεί σε υψηλότερη περιεκτικότητα σε CO, H<sub>2</sub> και CH<sub>4</sub> στο αερίου του προϊόντος και σε χαμηλότερη περιεκτικότητα σε N<sub>2</sub>, προκαλώντας αύξηση της συνολικής θερμικής ισχύος του αερίου σύνθεσης (Syngas).



**Εικ.32H** επίδραση της περιεκτικότητας σε οξυγόνο του αέρα που χρησιμοποιείται στην ποιότητα του προϊόντος που παράγεται [131]

Το αέριο που παράγεται από την μέθοδο UCG τυπικά έχει περιεκτικότητα σε μεθάνιο παρόμοια με αυτό που παράγεται με την αεριοποίηση κινητής κλίνης, λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών εξόδου που είναι ανεπαρκείς για να διασπάσουν πλήρως τα πτητικά στοιχεία από την πυρόλυση [48]. Σε λειτουργίες υψηλής πίεσης, προτιμάται ο σχηματισμός μεθανίου μέσω της αντίδρασης του H<sub>2</sub> με τον άνθρακα. Οι επιπτώσεις των υγρών υδρογονανθράκων (πίσσες) από UCG είναι τυπικά μικρότερες από ό, τι στους αεριοποιητές κινητής κλίνης, επειδή μερικές από αυτές διασπώνται στις ζώνες υψηλής θερμοκρασίας και άλλες παραμένουν παγιδευμένες στην υπόγεια κοιλότητα.

Η συγκέντρωση του CO στο αέριο προϊόν στην UCG είναι χαμηλότερη από ότι στη συμβατική αεριοποίηση επιφανείας, λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών και η συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> είναι αντίστοιχα υψηλότερη. Ωστόσο, σε ένα καλά σχεδιασμένο και λειτουργικό υπόγειο αεριοποιητή, αναμένεται ότι η μεγαλύτερη παραγωγή μεθανίου μπορεί να αντισταθμίσει τη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε CO, καθιστώντας έτσι τη συνολική θερμική αξία του αερίου προϊόντος συγκρίσιμη με αυτή που επιτυγχάνεται από την επιφανειακή αεριοποίηση [49].

## 2.4.2 Επίδραση των ιδιοτήτων του βαθμού του γαιάνθρακα

Οι ιδιότητες του γαιάνθρακα έχουν ουσιαστική επίδραση στη λειτουργία και τις επιδόσεις της μεθόδου UCG. Ιστορικά, οι δοκιμές της μεθόδου πραγματοποιήθηκαν κατά κύριο λόγο σε γαιάνθρακες χαμηλού βαθμού, οι οποίοι αντιδρούν εύκολα και θρυμματίζονται με την θέρμανση, ιδιότητες που βοηθούν σημαντικά στη μετατροπή του γαιάνθρακα σε αέριο [85]. Μερικές από τις

πιο επιτυχημένες δοκιμές UCG, όπως το Rocky Mountain I, το BloodwoodCreekPanel 2 και το Chinchilla Gasifier5, έχουν εφαρμοστεί σε υποβιτουμενιούχους γαιάνθρακες με σχετικά υψηλά πτητικά κλάσματα, μέτρια περιεκτικότητα σε υγρασία και μέτρια περιεκτικότητα σε τέφρα [38,43,45].

Γενικά έχει εκτελεστεί ένα σύνολο ελεγχόμενων πειραμάτων σε μεγάλα τεμάχια γαιάνθρακα για να καθοριστεί η επίδραση της κατάταξης του γαιάνθρακα στις πιθανές επιδόσεις της UCG [32]. Ο Πίνακας 7 παρουσιάζει τις παραγόμενες συνθέσεις του αερίου σύνθεσης που προκύπτει, την θερμική ισχύ του και το ρυθμό παραγωγής του από τρεις τύπους γαιάνθρακα. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι οι υποβιτουμενιούχοι γαιάνθρακες δίνουν υψηλή περιεκτικότητα σε μεθάνιο, μέτρια έως υψηλή θερμική ισχύ και υψηλό ρυθμό παραγωγής αερίου ανά μονάδα γαιάνθρακα. Οι λιγνίτες παράγουν αέριο σύνθεσης με χαμηλότερη θερμική αξία και παράγουν λιγότερο αέριο σύνθεσης ανά τόνο γαιάνθρακα. Στα εργαστηριακά πειράματα, οι βιτουμενιούχοι γαιάνθρακες παράγουν αέριο υψηλότερης θερμαντικής αξίας από τους λιγνίτες (παρόμοια με εκείνη των υποβιτουμενιούχων γαιανθράκων) με ελαφρώς υψηλότερη παραγωγή αερίου ανά τόνο γαιάνθρακα.

**Πίνακας 7** «Επίδραση των ιδιοτήτων του γαιάνθρακα στην απόδοση της διεργασίας, όπως μετρήθηκε πειραματικά με την αεριοποίηση μεγάλων τεμαχίων γαιάνθρακα [32]»

Παράμετρος	Μονάδα	Λιγνίτης	Υποβιτουμενιούχος γαιάνθρακας	Βιτουμενιούχος γαιάνθρακας
Σύνθεση αερίου				
H <sub>2</sub>	mol%	36-45	33-42	35-45
CO	mol%	20-30	25-35	25-35
CO <sub>2</sub>	mol%	25-35	20-25	25-30
CH <sub>4</sub>	mol%	1-5	4-10	2-8
N <sub>2</sub>	mol%	1-3	2-3	1-3
Θερμική ισχύς Αερίου σύνθεσης (Syngas)	MJ/Nm <sup>3</sup>	8.5-9.5	9.6-11	9.5-10

Η τάξη του γαιάνθρακα, η τάση του να θρυμματίζεται όταν θερμαίνεται και η συμπεριφορά της ορυκτής ύλης κατά τη θέρμανση είναι βασικοί παράγοντες για τον προσδιορισμό της απόδοσης ενός έργου UCG μεγάλης κλίμακας. Οι χαμηλής κατάταξης γαιάνθρακες συρρικνώνονται γενικά και καταστρέφονται κατά την θέρμανση, επιτρέποντας την ανανέωση του πλευρικού και ανωτέρω τοιχώματος και την δημιουργία μιας διαπερατής κοιλότητας γαιάνθρακα και τέφρας μέσω της οποίας το εγχυμένο οξειδωτικό μπορεί εύκολα να φτάσει και να διεισδύσει, για να ολοκληρωθεί η διαδικασία της αεριοποίησης του συνόλου του κοιτάσματος. [50].

Οι υψηλότερης κατάταξης γαιάνθρακες αντιδρούν λιγότερο και έχουν την τάση να διογκώνονται κατά τη θέρμανση, προκαλώντας δυνητικά προβλήματα με τη διάχυση των πτητικών συστατικών (αερίων) από τον αεριοποιητή μέχρι την επιφάνεια. Επιπλέον, η συμπεριφορά των γαιανθράκων

υψηλής κατάταξης όταν αυτοί θρυμματίζονται δεν έχει πλήρως αποτυπωθεί και κατανοηθεί από την επιστημονική κοινότητα.

Η συμπεριφορά της ορυκτής ύλης κατά τη διάρκεια της αεριοποίησης είναι σημαντική. Εάν σχηματιστεί μια στιβάδα τέφρας πάνω στον γαιάνθρακα, τότε αυτό θα εμποδίσει σημαντικά τη διάχυση του οξυγόνου, του ατμού και του διοξειδίου του άνθρακα στο ορυκτό καύσιμο, γεγονός το οποίο θα οδηγήσει σε σημαντικό περιορισμό του ρυθμού μετατροπής του γαιάνθρακα σε αέριο σύνθεσης (Syngas) [51]. Παρομοίως, αν η ορυκτή ύλη έχει τάση σκωρίας, μπορεί επίσης να παρεμποδίσει σημαντικά τη διαδικασία αεριοποίησης.

Οι δοκιμές σε πραγματικό πεδίο UCG και σε υψηλής κατάταξης γαιάνθρακες έχουν δημιουργήσει μια σειρά προκλήσεων. Το έργο Pricetown ήταν η πρώτη απόπειρα αεριοποίησης των βιτουμενιούχων κοιτασμάτων γαιάνθρακα στις Ηνωμένες Πολιτείες [52]. Μια κακή μελέτη και η διόγκωση κατά την διάρκεια της αεριοποίησης του υψηλής κατάταξης γαιάνθρακα οδήγησε σε σημαντικά λειτουργικά προβλήματα τα οποία επέτρεψαν μόνο 17 ημέρες λειτουργίας του έργου [30,52].

Το έργο Thulin που έγινε στα μέσα της δεκαετίας του '80 σχεδίαζε να δημιουργήσει μια διαπερατή σύνδεση μεταξύ δύο κατακόρυφων γεωτρήσεων σε ένα βαθύ κοίτασμα ανθρακίτη [53]. Εντούτοις, όλες οι προσπάθειες σύνδεσης των γεωτρήσεων απέτυχαν και χρησιμοποιήθηκαν οπές μικρής ακτίνας για την τελική σύνδεση των γεωτρήσεων έγχυσης και παραγωγής. Ο ανθρακίτης, που είναι ένας υψηλής ποιότητας γαιάνθρακας, δεν αντέδρασε ικανοποιητικά, όπως αποδεικνύεται από τα αποτελέσματα των δοκιμών που έδειξαν την παρουσία οξυγόνου στα αέρια του προϊόντος [63]. Συνεπώς, δεν υπήρχαν ικανοποιητικές συνθήκες αεριοποίησης UCG και λιγότεροι από 300 τόνοι γαιάνθρακα μετατράπηκαν σε αέριο σύνθεσης (Syngas).

Οι μελέτες στα έργα City Price και Thulin απέδειξαν ότι όταν εφαρμόζεται UCG σε γαιάνθρακες υψηλής κατάταξης, πρέπει να δημιουργηθεί μια πολύ καλή διαδρομή μεταξύ των γεωτρήσεων έγχυσης και παραγωγής και να μεγιστοποιηθεί η περιοχή όπου θα λάβει μέρος η αντίδραση. Η χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και η χαμηλή πτητικότητα του ανθρακίτη και των βιτουμενιούχων γαιανθράκων, μαζί με τη χαμηλή διαπερατότητα, σημαίνει ότι υπάρχουν λίγα αντιδρώντα (ατμός, CO<sub>2</sub>, πτητικά υλικά) για την αεριοποίηση που μπορούν να τροφοδοτηθούν από το ίδιο το κοίτασμα του γαιάνθρακα. Συνεπώς, η αεριοποίηση με έγχυση οξυγόνου μαζί με την έγχυση ατμού ή νερού θα πρέπει εφαρμόζεται κάτω από αυτές τις συνθήκες για να εξασφαλιστούν οι υψηλές θερμοκρασίες αντίδρασης και η επαρκής παροχή αντιδρώντων για την ολοκλήρωση της αντίδρασης.

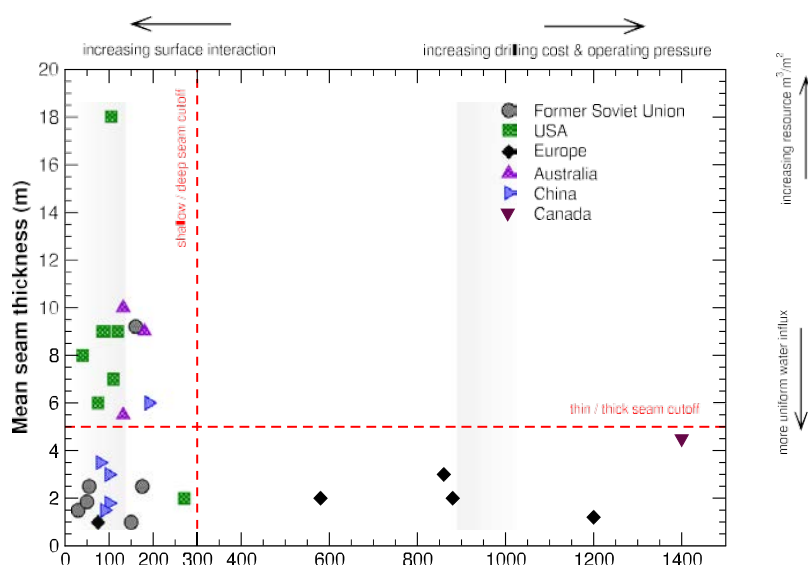
Οι γαιάνθρακες υψηλότερης κατάταξης έχουν γενικά χαμηλότερες περιεκτικότητες σε πτητικά συστατικά από τους κατώτερους γαιάνθρακες και επομένως μαζί με τη χαμηλή αντιδραστικότητα τους είναι πιο δύσκολο να αναφλεγούν. Τα υψηλά επίπεδα θείου, τα υψηλά επίπεδα χλωρίου και άλλες μολυσματικές ουσίες καθορίζουν τον σχεδιασμό των επιφανειακών εγκαταστάσεων, την επεξεργασία των ακατέργαστων αερίων και τον καθαρισμό του παραγόμενου αερίου σύνθεσης (Syngas). Η παρουσία του CO<sub>2</sub> και του νερού σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση είναι επίσης ιδιαίτερα διαβρωτική. Η παρουσία χαμηλών συγκεντρώσεων όπως το θείο και το χλώριο μπορεί να επιδεινώσει σημαντικά την κατάσταση. Η επιλογή των υλικών για τις σωληνώσεις παραγωγής

και τις επιφανειακές σωληνώσεις επηρεάζονται πολύ από τη σύνθεση του παραγόμενου αερίου σύνθεσης (Syngas), τη θερμοκρασία και την πίεση. Γενικά, τα υψηλά επίπεδα θείου, χλωρίου και άλλων ρύπων οδηγούν σε υψηλότερο κόστος για το χειρισμό και την επεξεργασία των παραγόμενων αερίων.

### 2.4.3 Επίδραση του βάθους του κοιτάσματος γαιάνθρακα

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία UCG και το βάθος του κοιτάσματος είναι ένας πολύ σημαντικός. Η πίεση λειτουργίας καθορίζεται από αυτό το βάθος. Κατά κανόνα, η πίεση λειτουργίας αυξάνεται κατά  $\gg 1$  MPa ( $\gg 10$  bar) για κάθε 100 μέτρα βάθους.

Η Εικ. 33 παρουσιάζει προηγούμενα έργα UCG για στρώσεις γαιάνθρακα κυρίως μέσου βάθους και μέσου πάχους. Γενικά μπορούμε να κάνουμε διάκριση των έργων UCG σε δύο κατηγορίες - εκείνα που διεξάγονται σε μικρό βάθος (<300 m) και αυτά που διεξάγονται σε λεπτά στρώματα (<5 m). Για παράδειγμα, δεν υπάρχουν δοκιμές που έχουν διεξαχθεί σε στρώσεις γαιάνθρακα μεγάλου πάχους σε αξιοσημείωτο βάθος.



Εικ. 33 Διάγραμμα του μέσου βάθους και του μέσου πάχους των στρωμάτων γαιάνθρακα στα οποία έχει εφαρμοστεί η UCG παγκοσμίως [131]

Ποιοτικά πρέπει να αναμένεται ότι σε μικρά βάθη υπάρχει πιθανότητα αυξημένης αλληλεπίδρασης μεταξύ της κοιλότητας που δημιουργείται από την αεριοποίηση και της επιφάνειας και ότι οι λειτουργικές πιέσεις θα είναι χαμηλές. Κατά γενικό κανόνα, η UCG θα πρέπει να εκτελείται σε γαιάνθρακες οι οποίοι βρίσκονται βαθύτερα από 200 m για να εξασφαλιστεί επαρκής πίεση συγκράτησης από τα περιβάλλοντα γεωλογικά στρώματα [54]. Καθώς αυξάνεται το βάθος, αυξάνεται η πίεση λειτουργίας αλλά και το κόστος γεώτρησης.

Η επίδραση του βάθους του κοιτάσματος στην απόδοση του έργου παρουσιάζεται στον Πίνακα 8 συγκριτικά με τη σύνθεση του αερίου και την θερμική ισχύ του που προκύπτει από τέσσερα

έργα. Καθώς αυξάνεται η πίεση, υπάρχει μια γενική τάση για μεγαλύτερη ποσότητα CO<sub>2</sub> και CH<sub>4</sub> στο παραγόμενο αέριο σύνθεσης (Syngas) και χαμηλότερες ποσότητες CO και H<sub>2</sub>, δεδομένο που συμβαδίζει με τους θερμοδυναμικούς υπολογισμούς. Γενικά, η θερμική ισχύς (χωρίς άζωτο) του αερίου σύνθεσης (Syngas) αυξάνεται με την πίεση.

**Πίνακας 8** «Σύνθεση Αερίου σύνθεσης (Syngas) από υπόγεια έργα αεριοποίησης γαιάνθρακα που χρησιμοποιούν ατμό και οξυγόνο σε διαφορετικά βάθη.

Τοποθεσία	Βάθος	Πίεση	Σύνθεση αερίου (% κατ 'όγκο)						Χωρίς N <sub>2</sub> (LHV, MJ/m <sup>3</sup> )	Αναφορά
			CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CH <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>		
Rocky Mountain I	110	8	12	37	40	9	nr	2	9.5	[55]
El Tremedal	550	50	14	4	27	14	nr	< 10	10.9	[56]
Thulin	860	186	1	46	5	24	nr	nr	12.4	[57]
SwanHills	1400	120	5	41	15	37	2	< 2	16.3	[46]

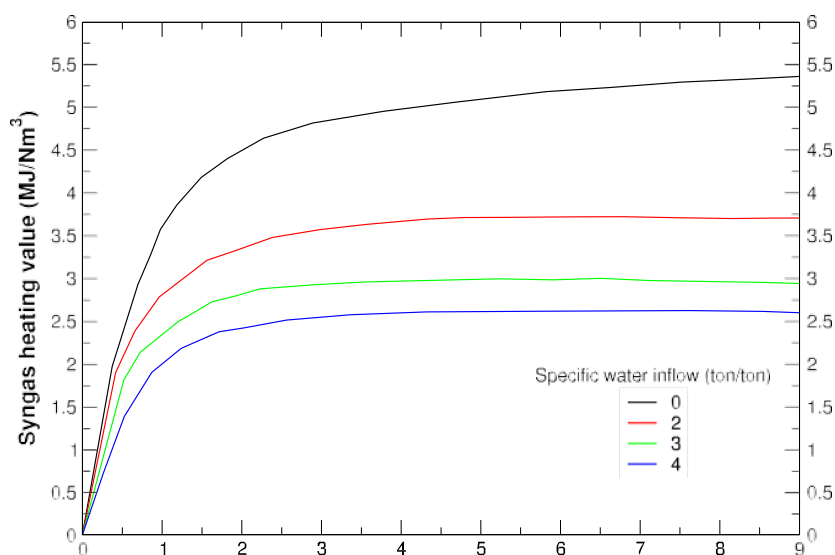
nr=not reported (Δεν έχουν αναφερθεί)

#### 2.4.4 Επίδραση του πάχους του κοιτάσματος του γαιάνθρακα

Η εφαρμογή της UCG σε κοιτάσματα μεγάλου πάχους (πάχους > 5 m) έχει θεωρηθεί ελκυστική σε πολλά μέρη του κόσμου [58]. Αυτού του είδους τα κοιτάσματα προσφέρουν έναν αναλογικά υψηλότερο δυνητικό πόρο ανά μονάδα προβαλλόμενης επιφάνειας, η οποία θα πρέπει να μεταφράζεται σε χαμηλότερο κόστος ανά μονάδα αερίου. Από την άλλη πλευρά, ο βαθμός της υδροστατικής πίεσης είναι ανάλογος του πάχους του κοιτάσματος, και έτσι η ροή του νερού μπορεί να είναι πολύ πιο δύσκολο να ελεγχθεί σε αυτού του είδους τα κοιτάσματα.

Η εικόνα 34 δείχνει την επίδραση του πάχους του κοιτάσματος στην θερμική αξία του παραγόμενου αερίου από την αεριοποίηση με έγχυση αέρα, όπως μετρήθηκε από τους Σοβιετικούς και αναφέρθηκε από τους Greggetal. [21]. Η θερμική αξία του αερίου σύνθεσης (Syngas) είναι πολύ χαμηλή (<4 MJ / m<sup>3</sup>) όταν το πάχος του κοιτάσματος είναι μικρότερο από 3 m και όταν η ειδική εισροή νερού (τόνος νερού / τόνος γαιάνθρακα-αερίου) είναι μεγαλύτερη από 2 τόνους / τόνο. Τα κοιτάσματα με μεγαλύτερο πάχος οδηγούν σε λιγότερη απώλεια θερμότητας ανά μονάδα όγκου γαιάνθρακα που συνεπώς παρέχουν υψηλότερες τιμές θερμικής αξία παραγόμενου αερίου.





**Εικ. 34** Επίδραση του πάχους του κοιτάσματος του γαιάνθρακα στην τιμή της θερμικής ισχύος του παραγόμενου αερίου σύνθεσης (Syngas) για διάφορες ταχύτητες εισροής ύδατος για αεριοποίηση με έγχυση αέρα [131]

#### 2.4.5 Επίδραση της κλίμακας του έργου της UCG

Όπως και σε άλλες μεθόδους αεριοποίησης, η οικονομική απόδοση της UCG είναι συνάρτηση της κλίμακας στην οποία γίνεται η διαδικασία. Εδώ, η κλίμακα της διαδικασίας, αναφέρεται στην παραγωγική ικανότητα σε αέριο σύνθεσης (Syngas) ανά ζεύγος γεωτρήσεων έγχυσης-παραγωγής αερίου. Αν η κλίμακα της διαδικασίας είναι μικρή, τότε θα χρειαστεί να διανοιχθούν αρκετά ζευγάρια γεωτρήσεων για να έχουμε την επιθυμητή παραγωγή αερίου σύνθεσης (Syngas), καθιστώντας το έργο λιγότερο οικονομικά ελκυστικό.

Μια σειρά δοκιμών αεριοποίησης σε διαφορετικές κλίμακες υπό παρόμοιες συνθήκες πραγματοποιήθηκαν στις Η.Π.Α, ξεκινώντας με εργαστηριακά πειράματα μικρής κλίμακας σε δοχεία, ακολουθούμενα από δοκιμές σε μεγάλης εκτάσεως μπλοκ γαιάνθρακα, στη συνέχεια στη δοκιμή CRIP PartialSeam και τελειώνοντας στο έργο RockyMountain I. Τα βασικά αποτελέσματα των πειραμάτων παρέχονται στον Πίνακα 9. Οι κύριες παρατηρήσεις όσον αφορά την κλίμακα του έργου είναι:

- Η περιεκτικότητα σε CO μειώθηκε με την αύξηση της κλίμακας του έργου.
- Η περιεκτικότητα σε CH<sub>4</sub> αυξήθηκε με την αύξηση της κλίμακας του έργου.
- Η περιεκτικότητα σε H<sub>2</sub> και CO<sub>2</sub> ήταν σχετικά σταθερή με τη μεταβολή της κλίμακας του έργου
- Η χρήση οξυγόνου αυξήθηκε με την αύξηση της κλίμακας

**Πίνακας 9** «Διαδικασία κλιμάκωσης της υπόγειας αεριοποίησης γαιάνθρακα με τη μέθοδο CRIP.»

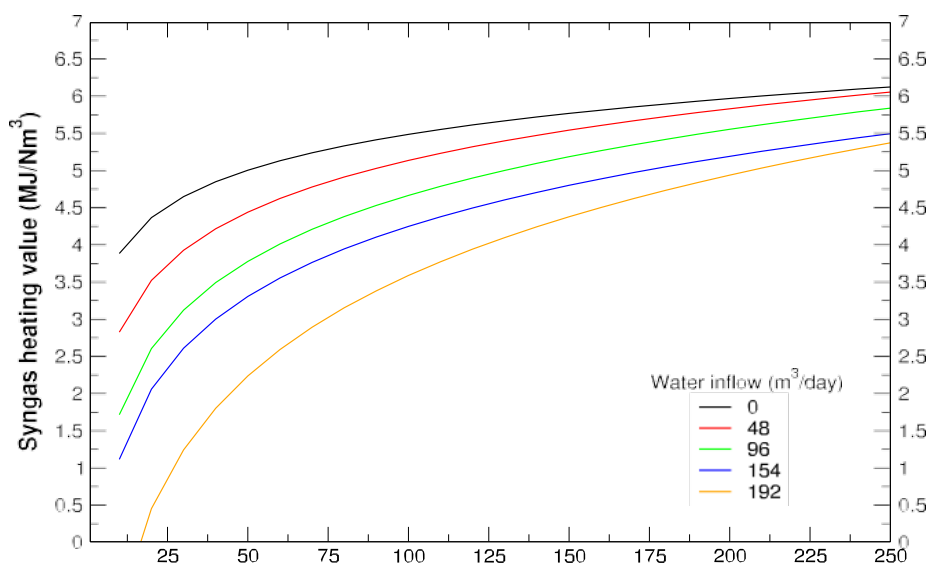
Παράμετροι	Εργαστηριακά πειράματα	Δοκιμές σε μεγάλα μπλοκ	PartialSeam CRIP	RockyMountain I
Έτος	1981	1981-1982	1983	1987-1988
Τοποθεσία	Livermore, CA	Centralia, WA	Centralia, WA	Hanna, WY
Πείραμα	WID-1	LBK-1	CRIP	CRIP
Παράμετροι γαιάνθρακα				
Βάθος (m)	N/A	15-22	61	110
Πάχος (m)	N/A	6	6	7.6
Τύπος	sub-bit.	sub-bit.	sub-bit.	sub-bit.
Παράμετροι διαδικασίας				
Πίεση Παραγωγής (kPa)	100	105	425	815
Οξειδωτικό ατμός / οξυγόνο (mol: mol)	2:1	3:1	3:1	2:1
Οξυγόνο που εγχύθηκε (Mmol)	167x10 <sup>-6</sup>	0.5	17.3	102
Χρήση οξυγόνου (MJ / kmol)	644	887	794	» 1200
Μετατροπή γαιάνθρακα (m <sup>3</sup> )	0.014	16	1400	8077
Διάρκεια (ημέρες)	0.2	2.4	30	93
Ρυθμός μετατροπής γαιάνθρακα (m <sup>3</sup> / d)	0.07	6.7	46.7	86.9
Συνθέσεις ξηρού αερίου (% mol)				
H <sub>2</sub>	36.7	42.2	34.2	38.5
CO	23.8	24.9	17.5	11.8
CO <sub>2</sub>	33.5	27.5	34.4	37.6
CH <sub>4</sub>	2.7	3.5	5.5	9.4
Σχετική ποσότητα γαιάνθρακα που αντιδρά				
Σχετικός ρυθμός μετατροπής γαιάνθρακα	10 <sup>-3</sup>	1	88	504
Βιβλιογραφικές αναφορές	[59]	[60,61]	[62]	38,49,63,64

Οι παρατηρήσεις που αφορούν τα CO, CH<sub>4</sub> και οξυγόνου θεωρείται ότι σχετίζονται με τον χρόνο παραμονής και επίσης με τη σχετική αύξηση του μεγέθους της ζώνης πυρόλυσης στο κανάλι εξόδου. Τα χαρακτηριστικά απώλειας θερμότητας των διαφόρων δοκιμών θα έπαιζαν επίσης κάποιο ρόλο. Ο μεγαλύτερος χρόνος παραμονής, οι χαμηλότερες θερμοκρασίες και η απώλεια

θερμότητας, οδηγούν σε μειωμένη περιεκτικότητα σε CO στο παραγόμενο αέριο σύνθεσης. Επίσης μια μεγαλύτερη ζώνη πυρόλυσης θα οδηγούσε σε ύπαρξη H στο παραγόμενο αέριο και καλύτερη χρήση του οξυγόνου.

Το γεγονός ότι ακόμη και σχετικά μικρής κλίμακας πειράματα ήταν σε θέση να παράσχουν μια ουσιαστική αναπαράσταση της διαδικασίας UCG είναι πολύ ενθαρρυντικό, καθώς τέτοια πειράματα είναι σημαντικά φτηνότερα από ότι τα έργα UCG πλήρους κλίμακας. Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών πειραμάτων θα πρέπει να συνδυαστούν με τη μαθηματική μοντελοποίηση ώστε να επιτρέψουν μεγαλύτερους παράγοντες προσομοίωσης κατά την εμπορική χρήση της διαδικασίας UCG στο μέλλον.

Η εικόνα 35 δείχνει την επίδραση του ρυθμού αεριοποίησης γαιάνθρακα στην θερμική ισχύ του παραγόμενου αερίου σύνθεσης όπως μετρήθηκε από τους Σοβιετικούς και αναφέρεται από τους Greggetal. [21]. Μεγαλύτερος ρυθμός αεριοποίησης γαιάνθρακα οδηγεί σε υψηλότερη θερμική αξία, λόγω της χαμηλότερης ειδικής απώλειας θερμότητας και της μικρότερης εισροής νερού. Γενικά, οι ρυθμοί αεριοποίησης γαιάνθρακα μεταξύ 100 και 200 tpd (τόνοι ανα ημέρα) φαίνονται ελκυστικοί για την παροχή μιας σχετικά καλής ποιότητας αερίου σύνθεσης ( $> 4 \text{ MJ} / \text{m}^3$  με έγχυση αέρα) με συγκεκριμένες ποσότητες νερού μεταξύ 0 -1 (τόνου νερού/ τόνο Syngas). Εάν η εισροή νερού είναι υψηλή και ο ρυθμός αεριοποίησης του γαιάνθρακα είναι χαμηλός, τότε η θερμική απόδοση του παραγόμενου αερίου είναι χαμηλή και η ποιότητα του κακή.



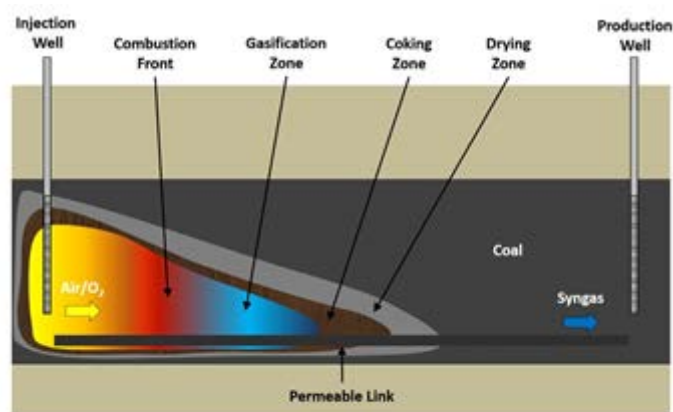
**Εικ. 35.** Επίδραση του ρυθμού αεριοποίησης στην τιμή της θερμικής ισχύος του αερίου σύνθεσης (Syngas) για διάφορους ρυθμούς εισροής νερού [21],[131]

#### 2.4.6 Επίδραση του σχεδιασμού του υπόγειου αεριοποιητή

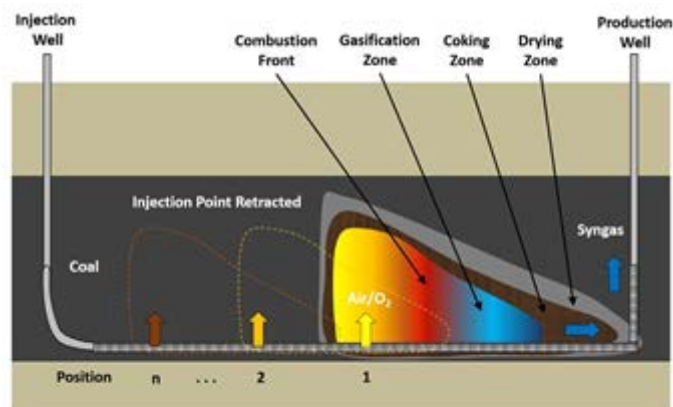
Η Εικόνα 36 δείχνει σχέδια των κοινών μεθόδων UCG: Ο σχεδιασμός K-CRIP είναι μια προσέγγιση της σχεδίασης P-CRIP, όπου οριζόντιες παράλληλες γεωτρήσεις έγχυσης και παραγωγής τέμνονται σε ένα σημείο. Στο πλαίσιο των μελετών στα έργα PartialSeam CRIP και

Rocky Mountain, διενεργήθηκε ένα σχέδιο K-CRIP, κυρίως λόγω περιορισμών στις τεχνολογίες κατευθυνόμενων γεωτρήσεων εκείνη τη εποχή. Γενικά, στα σχέδια K-CRIP και P-CRIP, διανοίγεται και κάθετη γεώτρηση η οποία χρησιμοποιείται ως φρεάτιο ανάφλεξης για τον αεριοποιητή. Το έργο Gasifier4 στο Chinchilla και τα Panel 1 και 2 στο έργο BloodwoodCreek χρησιμοποίησαν σχέδιο P-CRIP [65,43].

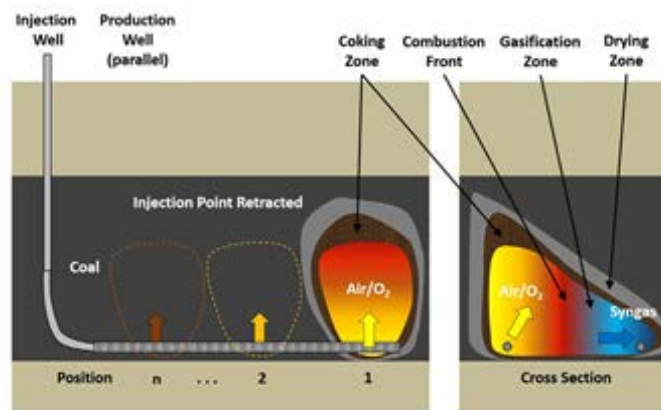
Στο σχεδιασμό L-CRIP μια οριζόντια γεώτρηση έγχυσης συνδέεται με μια κατακόρυφη γεώτρηση παραγωγής. Το έργο SwanHillsSynfuels στην Αλμπέρτα του Καναδά χρησιμοποίησε ένα σχέδιο L-CRIP [46], ενώ στην περίπτωση του Gasifier 5 στο Chinchilla, χρησιμοποιήθηκε ένας τροποποιημένος σχεδιασμός L-CRIP [43]. Στο μέλλον, τα σχέδια P-CRIP και L-CRIP είναι πιθανότερο να χρησιμοποιηθούν μαζί με παραλλαγές που περιλαμβάνουν τη χρήση πολλαπλών φρεάτων έγχυσης ή / και παραγωγής.



(a)



(b)



(c)

**Εικ. 36.** Σχέδια μεθόδων UCG: (α) συνδεδεμένα κάθετα φρεάτια, (β) L-CRIP και (γ) P-CRIP [66].[131]

Είναι συχνά δύσκολο να γίνει διάκριση μεταξύ σχεδιασμού και λειτουργικών αποτελεσμάτων κατά την αξιολόγηση της απόδοσης ενός συγκεκριμένου σχεδιασμού. Για παράδειγμα, δεν είναι γνωστό αν μια πιο επιθετική τροφοδότηση των οξειδωτικών ρευμάτων στο Gasifier 4 θα μπορούσε αποτρέψει την συγκέντρωση της στερεοποιημένης πίσσας και ποιο ρόλο έπαιξαν τα τεμάχια γαιάνθρακα που αποκόπηκαν από τις εργασίες γεώτρησης στις διαδικασίες έναρξης του έργου.

Σήμερα υπάρχει επαρκής εμπειρία τόσο με το σχεδιασμό L-CRIP όσο και με το P-CRIP η οποία οδηγεί στο συμπέρασμα ότι και οι δύο μέθοδοι είναι εφικτές τόσο από τεχνικής όσο και από οικονομικής άποψης. Κάθε σχεδιασμός έχει τα δικά του χαρακτηριστικά και ο εκάστοτε σχεδιασμός του υπόγειου αεριοποιητή πρέπει να επιλέγεται σε σχέση με τις γεωλογικές συνθήκες της εγκατάστασης (ιδιαίτερα την τάση του υπερκείμενου φορτίου όσον αφορά την στατικότητα). Παρά την πολύ διαφορετική φύση των διαδρομών των αερίων στο σχέδιο L-CRIP και P-CRIP, η απόδοση των δύο μεθόδων φαίνεται αρκετά παρόμοια. Οι συνθέσεις του αερίου, η θερμική του ισχύς και η αποτελεσματικότητα της χρήσης του οξυγόνου είναι αρκετά συγκρίσιμες και στις δύο μεθόδους.

Ο Πίνακας 10 δείχνει μια σύγκριση της απόδοσης P-CRIP του έργου BloodwoodCreekPanel 2 με την απόδοση L-CRIP του Chinchilla Gasifier 5 (αυτά τα δύο έργα λειτουργούν στον ίδιο τύπο γαιάνθρακα). Φαίνεται ότι ο σχεδιασμός P-CRIP οδήγησε σε μια ελαφρώς υψηλότερη τιμή θερμικής ισχύος του αερίου σύνθεσης στο έργο BloodwoodCreek και αυτό μπορεί να οφείλεται στη μεγαλύτερη ζώνη πυρόλυσης που υπάρχει στον σχεδιασμό P-CRIP και / ή στην ελαφρώς υψηλότερη πίεση του αερίου στη θέση του συγκεκριμένου έργου.

**Πίνακας10** «Σύγκριση των επιδόσεων του έργου BloodwoodCreek, και του έργου ChinchillaGasifier5 υπό συνθήκες φυσικού αερισμού.»[131]

Παράμετροι	BloodwoodCreekPanel 2	ChinchillaGasifier 5
Σχεδιασμός αεριοποιητή	P-CRIP	L-CRIP
Έτος	2011-2013	2011-2013
Βάθος (m)	200	130
Πάχος (m)	13	5.5
Τύπος	sub-bit.	sub-bit.
Παράμετροι διαδικασίας		
Πίεση εγχυμένου οξειδωτικού (kPa)	1200	» 700
	Air	Air
Χρήση οξυγόνου (MJ / kmol)	N/A	950
Μετατροπή γαιάνθρακα (m <sup>3</sup> )	» 17,0	19,5
Διάρκεια (ημέρες)	577	730
Ρυθμός μετατροπής γαιάνθρακα (m <sup>3</sup> / d)	29.5	26.7
Σύνθεση ξηρού αερίου (mol%)		
H <sub>2</sub>	20.9	20
CO	2.6	10
CO <sub>2</sub>	21.6	15
CH <sub>4</sub>	8.6	10
N <sub>2</sub>	44.7	45
Θερμική Ισχύς(MJ/Nm <sup>3</sup> )	5.7	5
Αναφορές	[45]	[43]

Στο έργο RockyMountain I μια μονάδα P-CRIP και μια μονάδα ELW (Extended Linked Well) λειτουργήσαν στο ίδιο κοίτασμα γαιάνθρακα χρησιμοποιώντας τις ίδιες εγκαταστάσεις. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις δύο δοκιμές παρέχει ορισμένες πληροφορίες σχετικά με την επίδραση της ρύθμισης των φρεατίων και της μεθόδου αεριοποίησης στην απόδοση της όλης διαδικασίας. Η διαδικασία CRIP είχε καλύτερη αποτελεσματικότητα και καλύτερη ανάκτηση πόρων από την μέθοδο ELW [26,96].

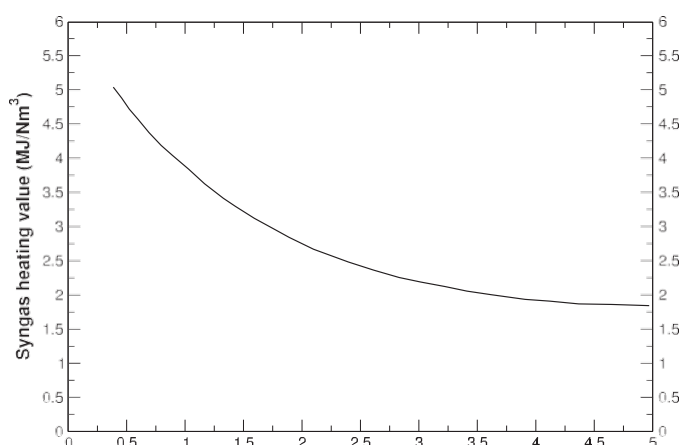
Συνοπτικά, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο σχεδιασμός CRIP θα έχει ανώτερη απόδοση από τους σχεδιασμούς LVW ή ELW και ότι ο σχεδιασμός P-CRIP και L-CRIP θα δώσει πιθανώς παρόμοια απόδοση στον ίδιο γαιάνθρακα. Επομένως, η επιλογή του σχεδιασμού CRIP πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις λεπτομέρειες των ιδιοτήτων του υπόγειου και υπερκείμενου φορτίου και της συμπεριφοράς του εκάστοτε γαιάνθρακα κατά τη θέρμανση και να αξιολογεί σε κάθε περίπτωση το κόστος παραγωγής του αερίου σύνθεσης. Οι αβεβαιότητες και στα δύο σχέδια σχετίζονται κυρίως με τη συνολική ανάκτηση πόρων και τις μεταβολές στις επιδόσεις που μπορεί να

προκύψουν από την εκκίνηση μέχρι το κλείσιμο στην μέθοδο P-CRIP λόγω των πολύ μεγάλων μηκών των οριζόντιων γεωτρήσεων.

#### 2.4.7 Επίδραση των συνθηκών της γεωλογικής θέσης του έργου

Υπάρχουν πολλοί συντελεστές της γεωλογικής θέσης του έργου που επηρεάζουν τη διαδικασία, συμπεριλαμβανομένων των ιδιοτήτων του υπόγειου εδάφους, του υπερκείμενου φορτίου καθώς επίσης και των υδρογεωλογικών ιδιοτήτων του σχηματισμού, επιπλέον εκείνων που έχουν ήδη ληφθεί υπόψη όπως το πάχος του κοιτάσματος και ο βαθμός του γαιάνθρακα.

Η εικόνα 37 δείχνει την επίδραση της ειδικής ροής του νερού στην τιμή της θερμικής ισχύος του αερίου που παράγεται χρησιμοποιώντας αεριοποίηση με έγχυση αέρα. Γενικά όσο υψηλότερη είναι η ειδική ροή νερού, τόσο χαμηλότερη είναι η τιμή της θερμικής ισχύος του αερίου σύνθεσης που προκύπτει. Προκειμένου να επιτευχθεί υψηλής απόδοσης αεριοποίηση και καλής ποιότητας αέριο σύνθεσης, η ειδική ροή νερού πρέπει να είναι μεταξύ 0 και 1 τόνο / τόνο βάσει των δεδομένων μέχρι σήμερα. Η ειδική ροή νερού είναι συνάρτηση της διαπερατότητας και του κορεσμού των γεωλογικών σχηματισμών κοντά στο έργο UCG, της πίεσης λειτουργίας και του επιλεγμένου ρυθμού αεριοποίησης γαιάνθρακα ανά ζεύγος φρεατίων έγχυσης-παραγωγής.



**Εικ. 37.** Επίδραση ειδικής ροής νερού στην τιμή της θερμικής ισχύος του αερίου σύνθεσης (Syngas) σε αεριοποίηση με έγχυση αέρα [21].

Η συνολική επίδοση του έργου εξαρτάται ταυτόχρονα από διάφορους παράγοντες που σχετίζονται με τον βαθμό του γαιάνθρακα, τις συνθήκες εγκατάστασης, τον σχεδιασμό και τις λειτουργίες του αεριοποιητή. Ένας κοινός στόχος απόδοσης είναι η επιτυχής μετατροπή μεγάλων ποσοτήτων γαιάνθρακα σε αέριο. Ως εκ τούτου, για τους σκοπούς της αναθεώρησης της επίδρασης των γεωλογικών συνθηκών της θέσης αεριοποίησης, η ποσότητα του μετατρεπόμενου γαιάνθρακα θεωρείται πρωτογενής δείκτης επιτυχίας.

Με αυτό το σκεπτικό, ο Πίνακας 11 παρουσιάζει μερικά από τα πιο επιτυχημένα και μερικά από τα λιγότερο επιτυχημένα έργα UCG που έχουν διεξαχθεί. Με βάση τα ιστορικά δεδομένα, τα πιο επιτυχημένα έργα εκτελούνται τυπικά σε σχετικά ρηχά κοιτάσματα γαιάνθρακα (<300 m), τα οποία έχουν μέτριο πάχος (6-10 m), έχουν χαμηλό βαθμό ενανθράκωσης (υποβιτουμενιούχος

γαιάνθρακας ή λιγνίτης), περιβάλλονται από σχιστόλιθους, άργιλο ή ψαμμίτες και έχει εφαρμοστεί ένας σχεδιασμός αεριοποίησης CRIP. Τα λιγότερο επιτυχημένα έργα έχουν εκτελεστεί είτε σε πολύ αβαθή είτε σε σχετικά βαθιά κοιτάσματα, τα οποία είναι αρκετά λεπτά (<7 m) και είναι υψηλότερου βαθμού, όπως οι βιτουμενιούχοι γαιάνθρακες και ο ανθρακίτης.

**Πίνακας 11** «Έργα UCG που έχουν διεξαχθεί»

Κατηγορία	Τοποθεσία	Έτος εκκίνησης	Τύπος γαιάνθρακα	Τεχνική	Εγγεώμενο αέριο	Βάθος κοιτάσματος (m)	Πάχος κοιτάσματος (m)	Τιμή θερμικής ισχύος αερίου (MJ / m <sup>3</sup> )	Μετατροπή γαιάνθρακα (σε τόνους)
Περισσότερο επιτυχημένα	Angrenskaja	1961	L	LVW	Air	150	9	3.4	> 1,000,000
	ChinchillaGasi fier 5	2011	SB	L-CRIP	Air & O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	132	5.5	4,11	> 19,000
	RockyMountain I	1987	SB	K-CRIP	O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	110	7	9.5	11,194
	BloodwoodCk P2	2011	SB	P-CRIP	Air & O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	180	13	5,12	10,3
Λιγότερο επιτυχημένα	HoeCreek IIIB	1979	HVC	LVW	O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	40	8	6.9	3950
	Pricetown I	1979	Bit.	LVW	Air	270	2	6.1	350
	Thulin	1986	A	LVW	Air	860	6	7.0	< 300
	ElTremedal	1997	SB	L-CRIP	O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	550	2	10.9	209
	SwanHills	2011	HVB	L-CRIP	O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	1400	4.5	16.3	nr

nr= not reported (δεν έχουν)αναφερθεί

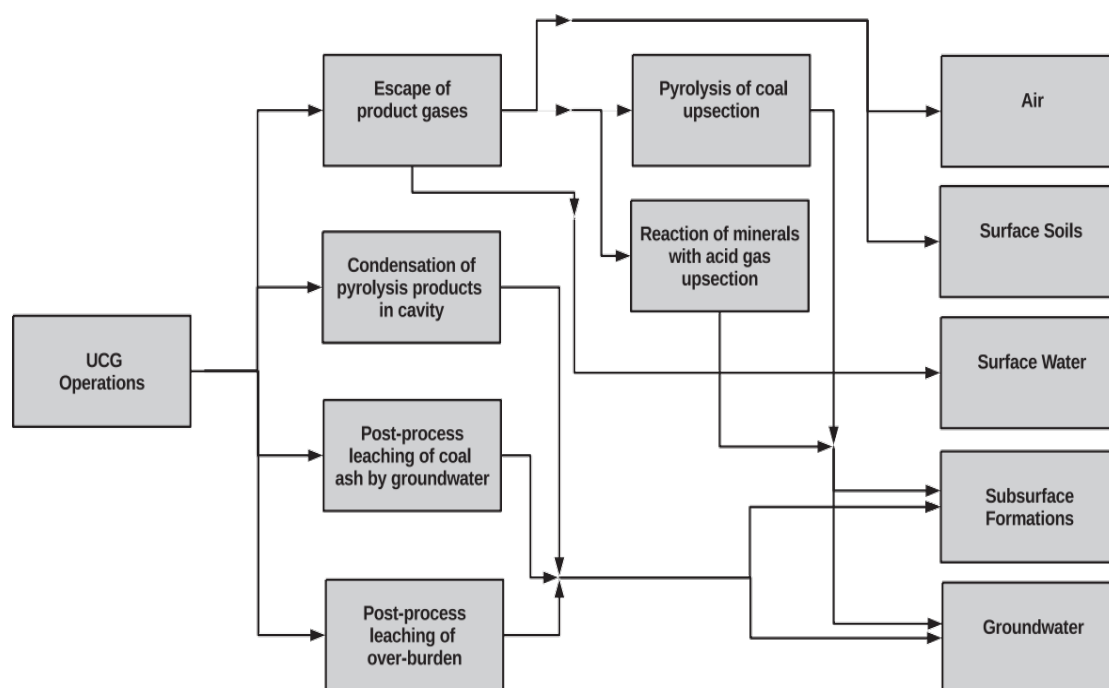
Η εξέταση κάθε μεμονωμένου έργου μπορεί να αποκαλύψει τα ιδιαίτερα ζητήματα που οδήγησαν σε λιγότερο επιτυχημένα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα αυτής της εξέτασης μπορούν τώρα να χρησιμεύσουν ως διδάγματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη στη μελλοντική ανάπτυξη της μεθόδου UCG.

Κάποιος μελετώντας όλα τα στοιχεία που έχουν προκύψει μέχρι σήμερα συγκεντρωτικά, θα διαπιστώσει πως τα μελλοντικά έργα UCG που αφορούν γαιάνθρακες υψηλής κατάταξης σε μεγάλα βάθη (> 500 m), θα χρειαστούν ιδιαίτερη προσοχή στα θέματα σχεδιασμού και λειτουργίας, προκειμένου να μετριαστούν όλες οι προκλήσεις που παρουσιάστηκαν σε παλαιότερα έργα ίδιου τύπου και να έχουν επιτυχή λειτουργία.



## 2.5 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Στην UCG, το πλάνο της διαδικασίας σχεδιασμού και λειτουργίας της μονάδας δεν μπορεί να διαχωριστεί από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, επειδή είναι στενά συνδεδεμένα. Αντίθετα με τις συμβατικές εγκαταστάσεις αεριοποίησης γαιάνθρακα επιφανείας όπου το περιβάλλον του αντιδραστήρα είναι πλήρως μελετημένο και ελεγχόμενο, η απόδοση της επιτόπου αεριοποίησης επηρεάζεται σημαντικά από τις γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες στις οποίες λειτουργεί [107]. Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός και η λειτουργία οποιασδήποτε εγκατάστασης UCG πρέπει να βασίζεται σε θεμελιώδη γνώση του χώρου αεριοποίησης. Η εικόνα 38 δείχνει ένα διάγραμμα του τρόπου με τον οποίο μια εγκατάσταση UCG θα μπορούσε να επηρεάσει τον αέρα, τα επιφανειακά εδάφη, τα επιφανειακά νερά, το υπόγειο έδαφος και τα υπόγεια ύδατα. Στις επόμενες ενότητες εξετάζονται σύντομα οι δυνητικές επιπτώσεις στην επιφάνεια, οι επιπτώσεις στο υπέδαφος και η επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.



Εικ. 38. Πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της UCG. [131]

### 2.5.1. Επιπτώσεις στο επιφανειακό περιβάλλον

Κατά την λειτουργία των εγκαταστάσεων UCG είναι πιθανόν να διαφύγουν αέρια του προϊόντος στην ατμόσφαιρα αλλά και στην επιφάνεια όπως επίσης και να προκληθεί παραμόρφωση και καθίζηση της επιφανειακής τοπογραφίας. Η πιο πιθανή διαδρομή από την οποία τα αέρια μπορούν να διαφύγουν στον επιφανειακό αέρα ή σε ρηχά εδάφη γίνεται μέσω των φρεατίων (έγχυσης, παραγωγής, παρακολούθησης) τα οποία δημιουργούνται με γεώτρηση από την επιφάνεια. Επομένως, ο σχεδιασμός του περιβλήματος και του τσιμέντου των γεωτρήσεων είναι πολύ σημαντικός.

Ο Younger και ο Bhat εισήγαγαν διάφορα σχεδιαγεωτρήσεων [108,109]. Τα τσιμέντα υψηλής θερμοκρασιακής αντοχής διατίθενται από μεγάλες εταιρείες παροχής υπηρεσιών πετρελαίου (π.χ. [67]). Για να μειωθεί ο κίνδυνος από προβλήματα που σχετίζονται με την ακεραιότητα της εγκατάστασης, οι κανόνες σχεδιασμού και οι βέλτιστες πρακτικές προσαρμόζονται από τις βιομηχανίες πετρελαίου και φυσικού αερίου, εκμεταλλευόμενες ιδίως την εμπειρία από θερμικά πηγάδια που χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση βαρύ πετρελαίου [68]. Οι γεωτρήσεις παραγωγής UCG που μπορούν να χειριστούν θερμοκρασίες μέχρι 400 °C έχουν λειτουργήσει για αρκετά χρόνια χωρίς κάποιο σημαντικό πρόβλημα, όταν έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί σύμφωνα με τις παραπάνω οδηγίες [43]. Θα πρέπει επίσης να εφαρμοστούν επιχειρησιακές διαδικασίες και συστήματα ασφαλείας για να αποφευχθούν οι εκρήξεις, όπως αυτή που παρατηρήθηκε στο Swan Hills [69].

Η υποχώρηση του εδάφους (καθίζηση,  $\delta$ ) λόγω UCG είναι ένα άλλο δυνητικό πρόβλημα και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το βάθος του σχηματισμού (D) και την πυκνότητα (H), την αντοχή των υλικών του σχηματισμού και το πλάτος των ζωνών μετατροπής άνθρακα (W) [70,71]. Η καθίζηση,  $\delta$ , συσχετίζεται με τις υπόλοιπες παραμέτρους ως εξής :  $\delta = W \times H \times D^{-1}$  [72].

Έτσι, παρατηρήθηκε υποχώρηση της επιφάνειας σε πολλά έργα UCG που λειτουργούσαν σε μικρό βάθος και σε μέτρια έως πυκνά κοιτάσματα γαιάνθρακα. Για παράδειγμα το έργο Hoe Creek III ανέπτυξε έναν εκτεταμένο κρατήρα επιφάνειας, επειδή η επιλεγμένη γεωλογική θέση είχε μόνο 40 μέτρα βάθος και είχε επίσης αδύναμο και υγρό υπερκείμενο φορτίο [73,74].

Τα αποτελέσματα των μελετών του Derbin και άλλων ερευνητών πάνω στα έργα των Σοβιετικών αναφέρουν ότι, μετρήθηκαν καθιζήσεις έως και 2,2 μέτρα σε έργα βάθους 50 m ή λιγότερο και καθίζηση μέχρι 1,2 m σε έργα σε βάθος μέχρι 120 m τα οποία είχαν ως υπερκείμενο φορτίο άργιλο [70]. Όταν η UCG διεξήχθη σε βαθύτερα κοιτάσματα γαιάνθρακα με συνεκτικά υπερκείμενα υλικά, υπήρξε αμελητέα καθίζηση επιφάνειας. Για παράδειγμα, δεν υπήρξαν καταγεγραμμένα ζητήματα καθίζησης στα έργα που πραγματοποιήθηκαν στο Chinchilla και το BloodwoodCreek στην Αυστραλία [31,65,40,46,53,75]. Ο κίνδυνος καθίζησης της επιφάνειας μπορεί να μετριαστεί μέσω της διερεύνησης και της επιλογής της γεωλογικής θέσης και μέσω της εφαρμογής γεωτεχνικών μοντέλων για τον κατάλληλο σχεδιασμό της διάταξης του αεριοποιητή.

### **2.5.2. Η ρύπανση των υπογείων υδάτων**

Οι κυριότερες ανησυχίες για τη ρύπανση των υπόγειων υδάτων προέρχονται από την απελευθέρωση οργανικών ενώσεων όπως το BTEX (μείγμα ρυπογόνων βενζολικών ουσιών), οι φαινόλες και οι πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs) κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης, η έκλυση βαρέων μετάλλων κατά τη διάρκεια της αεριοποίησης και η απόπλυση ανόργανων υλικών όταν ολοκληρωθεί η αεριοποίηση [116]. Τα κύρια ανόργανα περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα ιοντικών ειδών όπως το νάτριο, το ασβέστιο (Ca), το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>-), το όξινο ανθρακικό (HCO<sub>3</sub>-), το χλώριο (Cl<sup>-</sup>), η αμμωνία (NH<sub>3</sub>) και το βρώμιο (Br<sup>-</sup>) [76]. Άλλες ουσίες που ενδιαφέρουν περιλαμβάνουν μέταλλα, αρσενικό και βόριο.

Η έκταση και η συγκέντρωση της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα ροής των υπόγειων υδάτων, τη διασπορά, την αντίδραση και την προσρόφηση διαφόρων

ρύπων. Η διαχείριση του κινδύνου μόλυνσης των υπόγειων υδάτων κοντά στην UCG αποτελεί μείζονα στόχο για την επιλογή χώρου, το σχεδιασμό και τις επιχειρησιακές δραστηριότητες.

Πολλοί οργανικοί μολυσματικοί παράγοντες όπως το BTEX, οι φαινόλες και οι PAH είναι πυκνότεροι σε σύγκριση με το αέριο σύνθεσης και συμπυκνώνονται κατά προτίμηση στην υγρή φάση σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, επομένως δεν απομακρύνονται εύκολα από την κοιλότητα του αεριοποιητή. Επιπλέον, δεν διαλύονται εύκολα στο νερό [77]. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας που αναφέρονται από τους Meadetal, η συγκέντρωση των φαινολών μειώνεται ραγδαία με το χρόνο και με την απόσταση από τη ζώνη αεριοποίησης [117]. Η προσρόφηση του γαιάνθρακα και των σχηματισμών της περιοχής συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση των συγκεντρώσεων των ρυπογόνων ουσιών με την πάροδο του χρόνου και με την απόσταση από τη ζώνη αεριοποίησης. Ο Πίνακας 12 δείχνει τη μείωση των συγκεντρώσεων των φαινολών που μετρούνται ως συνάρτηση της απόστασης και του χρόνου από το έργο UCG στο HoeCreek I. Η μείωση της συγκέντρωσης φαινόλης με το χρόνο αποδίδεται στην απορρόφηση των φαινολών από τον γαιάνθρακα, όπως επιβεβαιώνεται σε εργαστηριακά πειράματα [78]. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί για έργα UCG που πραγματοποιήθηκαν στην πρώην Σοβιετική Ένωση [76].

**Πίνακας 12** «Μείωση των φαινολικών συγκεντρώσεων σε συνάρτηση με τον χρόνο και την απόσταση από έναν υπόγειο αεριοποιητή γαιάνθρακα (Liuetal [76])»

Χρόνος Μέρες	Απόσταση από την κοιλότητα (m)		
	3	15	30
3	8	0.09	0.008
83	0.6	0.03	0.004
182	0.09	0.007	< 0.001
280	0,04	0,003	<0,001
762	0.02	0.001	< 0.001

Αρκετές μελέτες έχουν εντοπίσει ανόργανες ουσίες στα υπόγεια ύδατα λόγω της διαδικασίας της αεριοποίησης του γαιάνθρακα. Γενικά, αναμένεται ότι η συγκέντρωση των ανόργανων μολυσματικών ουσιών αυξάνεται ως αποτέλεσμα της έκπλυσης της τέφρας και των προϊόντων της αεριοποίησης που έχουν απομείνει μετά την διαδικασία. Ο Πίνακας 13 παρουσιάζει αποτελέσματα αναλύσεων ύδατος πριν και μετά το πείραμα HoeCreek I.

**Πίνακας 13** «Σύγκριση των συγκεντρώσεων διαφόρων οργανικών συστατικών που βρέθηκαν στο νερό κοντά στο έργο UCG του HowCreek I (σε απόσταση 44 μέτρων από τον αεριοποιητή) στην 6<sup>η</sup>, 83<sup>η</sup> και 762<sup>η</sup> ημέρα μετά την αεριοποίηση [79].»

Παράμετροι	Συγκέντρωση (ppb) ημέρες μετά την αεριοποίηση		
	6 <sup>η</sup>	83 <sup>η</sup>	762 <sup>η</sup>
Πτητικά συστατικά			
<i>n</i> -πεντάνιο	1.4	-	-
<i>n</i> -εξάνιο	4.8	5.00	-
Βενζόλιο	180	290	-
Θειοφαίνιο	0.7	0.87	-
Τολουίνη	0.8	Tr	0.92

<i>n</i> -οκτάνιο	0.1	Nr	nd
Αιθυλο - βενζόλιο	0.4	0.25	0.16
Ξυλόλια	1.4	0.49	0.11
<i>n</i> -νονανίου	4.1	nr	nd
<i>n</i> -δεκανίου	0.2	nr	nd
Ναφθαλήνη	tr	0.53	-
Διφαινύλιο	nr	6.20	-
<b>Ημι-πτητικά συστατικά</b>			
Φαινόλη	138	93	-
Ισομερή διμεθυλοφαινόλης	721	412	-
Ισομερή αιθυλο-φαινόλης	522	420	-
<i>n</i> -εξανάνιο	tr	tr	-
<i>n</i> -επτανάλη	nr	nr	-
<i>n</i> -οκτανάλη	3	nr	-
<i>n</i> -νονανάλη	34	66	-

tr = Ίχνη.

nr =not reported (Δεν έχουν αναφερθεί)

nd = not detected (Δεν έχουν ανιχνευθεί)

Κατά τη διάρκεια του έργου Rocky Mountain I, διεξήχθη διεξοδική έρευνα και ανάλυση των υδάτινων συνθηκών της περιοχής του έργου καθώς επίσης και της ποιότητας των παραγόμενων υδάτων πριν και μετά την ολοκλήρωση του έργου. Επιπλέον, υπάρχουν διαθέσιμες αναφορές που ξεκινούν από την έναρξη και την μελέτη του χώρου έως και τον τερματισμό λειτουργίας. Τέλος είναι διαθέσιμες αναφορές για τις αλλαγές στην ποιότητα των υπόγειων υδάτων - όπως για παράδειγμα στις μελέτες Barbour. [80],Boysen [81], Lindblom [82,83,84] και Covell [85].

Ο Πίνακας 14 δείχνει μια σύγκριση μεταξύ των αναλύσεων του νερού αναφοράς, των αναλύσεων του παραγόμενου ύδατος από την διαδικασία της αεριοποίησης και των υψηλότερων αναφερόμενων συγκεντρώσεων ρυπογόνων ουσιών στα φρεάτια που οδηγούν στα κοιτάσματα γαιάνθρακα για την μονάδα CRIP στο έργο Rocky Mountain I. Είναι εμφανές ότι το νερό που παράγεται από τη διεργασία είναι υψηλό σε φαινόλες, οργανικά, αμμωνία, ολικά διαλυμένα στερεά και μερικά μέταλλα. Αυτό το παραγόμενο νερό συλλέγεται από το φρεάτιο παραγωγής κατά τη διάρκεια των εργασιών και συχνά θεωρείται αντιπροσωπευτικό εκείνου που θα μπορούσε να βρίσκεται στην κοιλότητα (εάν οι θερμοκρασίες ήταν αρκετά χαμηλές). Ωστόσο, μέσα σε λιγότερο από τρία χρόνια από την ολοκλήρωση των εργασιών αεριοποίησης, οι περισσότερες από τις βασικές συνθήκες ποιότητας νερού επανέρχονται στα επίπεδα που υπήρχαν πριν το έργο εκτός από τις υψηλές συγκεντρώσεις του βορίου.

**Πίνακας 14** «Αναλύσεις ποιότητας ύδατος εδάφους, παραγόμενου ύδατος και ύδατος μετά την αεριοποίηση από το έργο Rocky Mountain I.»

Παράμετροι.	Συνθήκες αναφοράς (1986-1987) (mg / L)	Παραγόμενο νερό από την μονάδα CRIP (Ιανουάριος 1988) (mg / L)	Υψηλότερες συγκεντρώσεις στα φρεάτια των κοιτασμάτων γαιάνθρακα (Δεκέμβριος 1990)
<b>Συστατικά</b>			
Βενζόλιο	nr	60	< 5
Τολουΐνη	nr	59	nr
Αιθυλοβενζόλιο	nr	18	nr
Ξυλένιο	nr	86	nr
Φαινόλες	< 0.1	2950	< 0.02
Αμμωνία	2.4-7.8	12,86	8.6
Θεικά άλατα	300-1400	130	1310
Κυανίδιο	< 0.02	0.5	< 0.02
Βόριο	0-0.037	0.21	0.9
Αλουμίνιο	0-0.253	1.7	0.108
Κάδμιο	< 0.01	0.03	< 0.01
Χρώμιο	< 0.01	< 0.02	< 0.008
Χαλκός	< 0.01	0.04	< 0.006
Μόλυβδος	< 0.05	0.12	< 0.05
Υδράργυρος	< 0.00005	< 1	< 0.0002
Νικέλιο	< 0.01	< 0.02	< 0.02
Σίδηρο	0.042-1.06	0.27	1.36
Ψευδάργυρος	< 0.015	0.05	< 0.003
<b>Ιδιότητες</b>			
Αλκαλικότητα	< 10-858	33,6	1040 meqCaCO <sub>3</sub>
pH	7.7-9.2	8.7	7.7-8.9
Πλήρως διαλυθέντα στερεά	1400-2700	914	3390
Οργανικός άνθρακας	11-43	44,00	51
Αναφορά	[84]	[80]	[84]

nr =not reported (Δεν έχουν αναφερθεί).

Η παρακολούθηση των υπόγειων υδάτων από τον πρώτο σταθμό υπόγειας αεριοποίησης στην Chinchilla της Αυστραλίας έδειξε ότι τα επίπεδα συγκέντρωσης βενζολίου, φαινόλης και PAH στην περιοχή του αεριοποιητή ήταν »10 mg / L,» 100 mg / L και »10 mg / L αντίστοιχα [66 ]. Εκτός των ενεργών ζωνών αεριοποίησης, οι συγκεντρώσεις ήταν μικρότερες από 1 mg / L και εντός του εύρους των μετρούμενων τιμών γενικά για την περιοχή [66].

Ο Mallett έχει κάνει αναφορές για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των έργων UCG στο έργο του BloodwoodCreek στην Αυστραλία [86]. Στον πάνελ No2, εντός 48 ωρών από την διακοπή της έγχυσης του αέρα, οι αντιδράσεις αεριοποίησης είχαν σταματήσει και η πίεση του αερίου μειώθηκε για να επιτρέψει την εισροή των υπόγειων υδάτων, παράγοντας ατμό και μειώνοντας τις θερμοκρασίες κοιλοτήτων κάτω από 300 ° C [54]. Η παραγωγή ατμού και η εισροή υπογείων υδάτων συνεχίστηκε για εννέα μήνες, κατά τη διάρκεια των οποίων το 92% των οργανικών χημικών ουσιών μεταφέρθηκαν στα αέρια εξαερισμού που ανήλθαν στην επιφάνεια. Ακολούθως εκπονήθηκε μια μοντελοποίηση η οποία έδειξε πως θα μπορούσε να επιτευχθεί μία ασφαλής για τον άνθρωπο συγκέντρωση βενζολίου 1 mg / L και σε απόσταση 27 m από την κοιλότητα, φαινόλης (85 mg / L ) σε απόσταση 4,5 m από την κοιλότητα και ναφθαλίνης (2 mg /L) σε απόσταση 0,5 m από την κοιλότητα [54].

Δεδομένου ότι τα υπόγεια ύδατα παρουσιάζουν σημαντικούς κινδύνους για την υγεία ή το περιβάλλον και δεν προβλέπεται η χρήση τους κατά την περίοδο των μειούμενων συγκεντρώσεων, η προσέγγιση που υιοθετείται είναι να υπάρχει φυσικός έλεγχος εξασθένισης, δηλαδή αναμονή μέχρι η κοιλότητα να ανακτήσει, με τη πάροδο του χρόνου, τις αρχικές τις συνθήκες [54].

Τα έργα UCG των RockyMountain I, Chinchilla και BloodwoodCreek δείχνουν ότι η ρύπανση των υπόγειων υδάτων δεν είναι εγγενής στη διαδικασία της UCG και οι επιπτώσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν με κατάλληλη επιλογή γεωλογικής θέσης, σχεδιασμού και λειτουργίας του αεριοποιητή [87]. Σε αυτά τα έργα υλοποιήθηκε η λεγόμενη "Clean Cavern Concept" στην οποία ο αέρας λειτουργεί έτσι ώστε: η πίεση λειτουργίας να διατηρείται κάτω από την περιβάλλουσα πίεση σχηματισμού κατά τη διάρκεια και μετά από την ολοκλήρωση των διεργασιών ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διαφυγή των προϊόντων πυρόλυσης και να εξασφαλιστεί μια θετική ροή των υπόγειων υδάτων προς την κοιλότητα. Μόλις τερματισθεί η αεριοποίηση, τα προϊόντα της πυρόλυσης να εξαερίζονται από την κοιλότητα και οι θερμοκρασίες της κοιλότητας να μειώνονται μέσω της ροής των υπογείων υδάτων όσο το δυνατόν γρηγορότερα, μετά τη διακοπή της αεριοποίησης, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η απελευθέρωση περισσότερων προϊόντων πυρόλυσης

Ενώ στις μελέτες τους οι Boysen κ.ά. υποστηρίζουν ότι η έγχυση ατμού στην κοιλότητα μετά την αεριοποίηση είναι ωφέλιμη για την απομάκρυνση των υπολειμματικών υδρογονανθράκων από την κοιλότητα [81], τα αποτελέσματα από το RockyMountain I και το BloodwoodCreek δείχνουν ότι το μεγαλύτερο μέρος του ατμού που χρησιμοποιείται για να παρασύρει τα οργανικά χημικά παράγεται από την εξάτμιση των υπογείων υδάτων που φθάνουν στις θερμές κοιλότητες. Στο έργο RockyMountain I, το νερό της κοιλότητας αντλήθηκε δύο φορές και υποβλήθηκε σε κατεργασία πριν από την απελευθέρωσή του στο περιβάλλον. Το συνολικό νερό που αντλήθηκε και κατεργάστηκε ανά τόνο γαιάνθρακα που αεριοποιήθηκε ήταν περίπου 0,85 t / t. [88,89-91].

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μόλυνση των υπόγειων υδάτων αποτελεί βασικό στοιχείο για κάθε επιτυχή διαδικασία UCG. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος μόλυνσης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, είναι απαραίτητη μια συνολική αξιολόγηση των γεωλογικών και υδρογεωλογικών παραγόντων της περιοχής. Σε τέτοιες συνθήκες βάθους, για να ερευνηθεί η επίδραση της UCG στα υπόγεια ύδατα επιβάλλεται να λαμβάνονται υπό όψιν τα ακόλουθα:

- Οι προτιμώμενοι υπόγειοι δρόμοι, μέσω των οποίων οι μολυντές μεταναστεύουν σε υπόγεια υδάτινα ρεύματα οικονομικής ή οικολογικής σημασίας.
- Η επίδραση των ανθρωπογενών ενεργειών.
- Η δυνατότητα μετανάστευσης σημαντικών ρύπων επιπλέον της μόνιμα ακατάλληλης ζώνης.
- Η επίπτωση των επιφανειακών δραστηριοτήτων στην ποσότητα και την ποιότητα των υπογείων υδάτων.

### **2.5.2.1 Γεωλογική και υδρογεωλογική αξιολόγηση**

Η αξιολόγηση των γεωλογικών και υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών απαιτεί δύο κύριες δραστηριότητες:

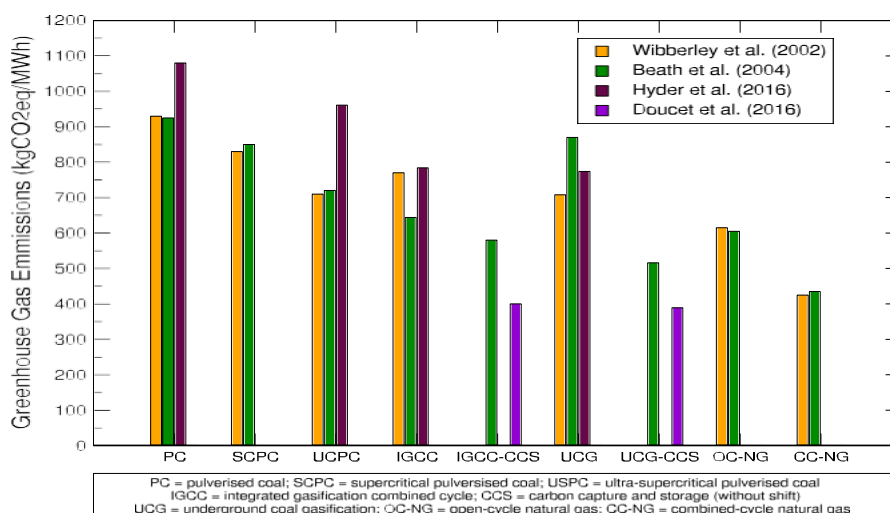
- Τον εντοπισμό των κυριότερων δυνητικά μεταδιδόμενων χαρακτηριστικών και των δεσμών μεταξύ τους που θα μπορούσαν να παράσχουν μια διαδρομή συνεχούς μετάδοσης πέρα από τη μόνιμα ακατάλληλη ζώνη
- Τον καθορισμό του εάν οι υδρογεωλογικές συνθήκες οδηγούν σε ευπάθεια.

Η καλή κατανόηση της γεωλογίας και της υδρογεωλογίας σε μια περιοχή είναι απαραίτητη και περιλαμβάνει:

- Λεπτομερή εξέταση της γεωλογίας της περιοχής στην οποία θα εφαρμοστεί η UCG ( χαρτογράφηση, στρωματογραφία)
- Ανάλυση χημικής σύνθεσης των παρακείμενων υδροφόρων οριζόντων.
- Λεπτομερή υδρογεωλογική έρευνα της ευρύτερης περιοχής.
- Υπολογισμός τις διαπερατότητας των γαιανθράκων και των υποκείμενων πετρωμάτων.
- Την μελέτη της τεκτονικής διαμόρφωσης μιας περιοχής για πιθανές διαφυγές μέσω αυτών.

### **2.5.3 Εκπομπές αερίων που αφορούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου**

Οι εκπομπές άνθρακα των ενεργειακών τεχνολογιών στο περιβάλλον, έχουν σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Είναι γενικά αποδεκτό ότι οι παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα πρέπει να μειωθούν, εάν πρέπει να περιοριστεί η αύξηση της θερμοκρασίας (λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου) [93]. Ενώ ο γαιάνθρακας είναι γενικά άφθονος και σχετικά φθηνός, είναι ένα καύσιμο υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, απελευθερώνοντας υψηλά επίπεδα CO<sub>2</sub> όταν καίγεται ανά μονάδα παραγωγής ενέργειας. Η εικόνα 39 δείχνει μια σύγκριση των εκπομπών CO<sub>2</sub> από έναν κύκλο ζωής των συμβατικών τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας και UCG, με και χωρίς δέσμευση και αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα - CCS.



**Εικ 39.** Οι εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά την διάρκεια του κύκλου ζωής του UCG για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες άνθρακα και φυσικού αερίου ( [95 [58],[94] [96,[131]]).

Μια πρόσφατη μελέτη από τους Doucetet al. εκτιμά ότι ένα έργο UCG με αεριοστρόβιλους συνδυασμένου κύκλου και δέσμευση CO<sub>2</sub> από το αέριο σύνθεσης θα εκπέμπει 389 (kgCO<sub>2</sub>eq / MWh) που είναι παρόμοιο τόσο με τις εκπομπές ενός εργοστασίου επιφανειακής IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) με δέσμευση CO<sub>2</sub> όσο και με τις εκπομπές από το φυσικό αερίου που χρησιμοποιείται σε αεριοστρόβιλους συνδυασμένου κύκλου [96].

Στην περίπτωση παραγωγής υγρών καυσίμων, οι Perkinset al. εκτιμούν ότι οι εκπομπές από ένα έργο UCG με δέσμευση CO<sub>2</sub> που χρησιμοποιείται για ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου θα ήταν παρόμοιες με τις υπάρχουσες εκπομπές από τα καύσιμα μεταφοράς με βάση το αργό πετρέλαιο [65].

#### 2.5.4 Δέσμευση και Αποθήκευση Άνθρακα (Carbon Capture Storage - CCS)

Ενώ η CCS εφαρμόστηκε σε μεγάλη κλίμακα για πολλά έργα παραγωγής φυσικού αερίου, η εφαρμογή της στην χρήση του γαιάνθρακα είναι πολύ λιγότερο διαδεδομένη. Οι κύριες προκλήσεις όσον αφορά τη σύζευξη της CCS με την καύση και την αεριοποίηση του γαιάνθρακα είναι τόσο τεχνικές όσο και οικονομικές.

Από τεχνικής απόψεως, η ύπαρξη κατάλληλων γεωλογικών χώρων αποθήκευσης κοντά στις τοποθεσίες όπου χρησιμοποιείται γαιάνθρακας αποτελεί πρόκληση. Επίσης από οικονομικής άποψης, όταν χρησιμοποιείται γαιάνθρακας, υπάρχει πολύ μεγαλύτερη ποσότητα παραγόμενου CO<sub>2</sub> ανά μονάδα ενέργειας που παράγεται. Έτσι, ο διαχωρισμός και η εκ νέου συμπίεση του CO<sub>2</sub>, που προέρχεται είτε από το παραγόμενο αέριο σύνθεσης είτε από τα καυσαέρια είναι ενεργειακά κοστοβόρο και δαπανηρό. Όπου έχουν αναληφθεί έργα, το CO<sub>2</sub> χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον για βελτιωμένη ανάκτηση πετρελαίου και ως εκ τούτου μπορεί να αποδοθεί χρηματική αξία για την παραγωγή περισσότερου πετρελαίου. Ορισμένα έργα γαιάνθρακα με CCS έχουν κατασκευαστεί πρόσφατα, συμπεριλαμβανομένου του έργου Saskpower's Post-CaptureBoundaryDam στο Saskatchewan του Καναδά [97]. το έργο PetraNova στο Τέξας των



ΗΠΑ [98]. και το έργο IGCC (Integrated gasification combined cycle) στο KemperCounty που βρίσκεται στο Μισισσιπή, ΗΠΑ [99].

Αξιολόγηση της δυνατότητας αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> μέσα στις κοιλότητες UCG έχει αναφερθεί από διάφορους συντάκτες (π.χ., [2,77]). Οι εκτιμήσεις δείχνουν ότι μόνο ένα μέρος του CO<sub>2</sub> που εκπέμπεται από το UCG θα μπορούσε να αποθηκευτεί στις κοιλότητες βάσει των διαθέσιμων όγκων [100]. Ο Younger πρότεινε ότι η περίσσεια του CO<sub>2</sub> θα μπορούσε να αποθηκευτεί στα παραμορφωμένα στρώματα πάνω από το κοίτασμα γαιάνθρακα και έχει υπολογίσει ότι ένα ύψος περίπου 10 με 60 φορές μεγαλύτερο από το πάχος του κοιτάσματος θα ήταν επαρκές για την αποθήκευση του συνόλου του CO<sub>2</sub> ανάλογα με το πορώδες των υπερκείμενων στρωμάτων [77]. Υπάρχουν σημαντικές αβεβαιότητες σχετικά με την ικανότητα των σχηματισμών που υποβάλλονται στην UCG να αποθηκεύουν με ασφάλεια το CO<sub>2</sub> [100,101]. Η ιδέα μπορεί να είναι τεχνικά εφικτή, εάν ο γαιάνθρακας βρίσκεται αρκετά βαθιά και τα υλικά σχηματισμού είναι κατάλληλα.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα γίνει εκτενής αναφορά στις τεχνικές και τις υπάρχουσες διαδικασίες δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα, από τα παραγόμενα καυσαέρια διαφόρων βιομηχανικών διαδικασιών, καθώς επίσης και ανάλυση των τρόπων αποθήκευσης του ανωτέρω CO<sub>2</sub> με αναφορά στην αποθήκευση του στις κοιλότητες οι οποίες δημιουργούνται λόγω της εφαρμογής της μεθόδου UCG σε ένα έργο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

Μία από τις προσεγγίσεις για την άμβλυνση της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής η οποία σε μεγάλο βαθμό οφείλεται στις εκπομπές CO<sub>2</sub> και άλλων αερίων, είναι η δέσμευση CO<sub>2</sub> από πηγές που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα και η αποθήκευση σε γεωλογικούς ταμιευτήρες. Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται οι τεχνολογίες δέσμευσης και υπολογίζονται οι επιδόσεις και οι ενεργειακές τους κυρώσεις. Επίσης υπολογίζονται οι ικανότητες αποθήκευσης και η αποτελεσματικότητα, καθώς και το κόστος μεταφοράς και οι πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Τέλος γίνεται εκτενής αναφορά στην δυνατότητα αποθήκευσης του δεσμευμένου CO<sub>2</sub> στις κοιλότητες οι οποίες δημιουργούνται λόγω της χρήσης της μεθόδου UCG.

### 3.1. Εισαγωγή

Επί του παρόντος, τα ορυκτά καύσιμα είναι η κυρίαρχη πηγή που ικανοποιεί την παγκόσμια ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας και πιθανότατα θα παραμείνει για τον υπόλοιπο αιώνα. Τα ορυκτά καύσιμα παρέχουν πάνω από το 85% της συνολικής πρωτογενούς ενέργειας. Η πυρηνική ενέργεια, η υδροηλεκτρική ενέργεια και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (εμπορική βιομάζα, γεωθερμία, αιολική και ηλιακή ενέργεια) παρέχουν το υπόλοιπο 15%.

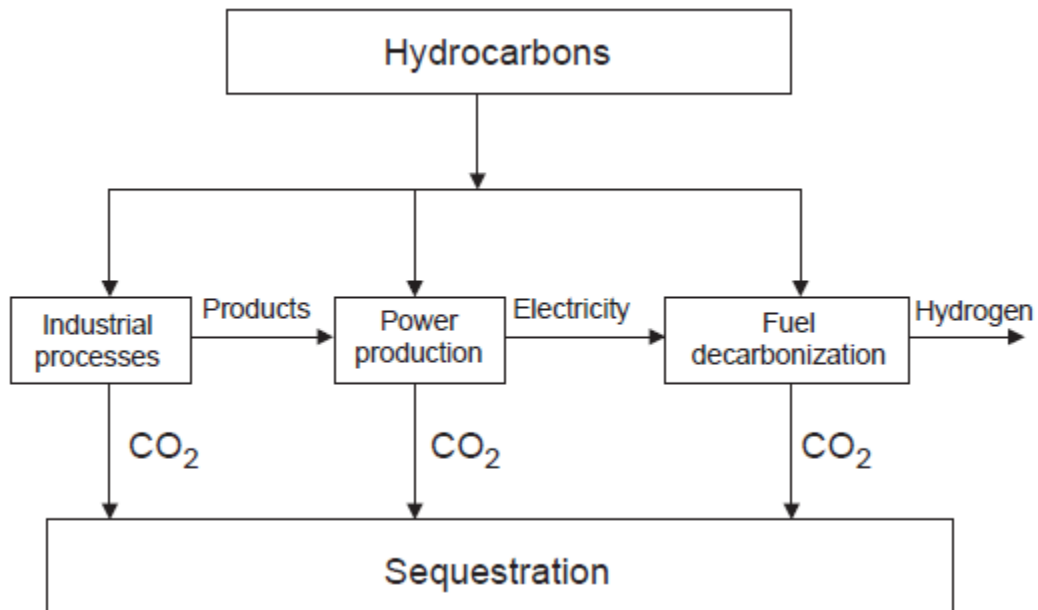
Η απευθείας δέσμευση του 90% περίπου του παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα CO<sub>2</sub> από την χρήση των ορυκτών καυσίμων στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και σε άλλες βιομηχανικές διεργασίες σε ασφαλείς γεωλογικές δεξαμενές ώστε να αποφευχθεί η απελευθέρωση του στην ατμόσφαιρα ονομάζεται δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα (CCS). Το σκεπτικό για τη δέσμευση και αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα είναι να καταστεί δυνατή η χρήση ορυκτών καυσίμων μειώνοντας ταυτόχρονα τις εκπομπές CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα και περιορίζοντας έτσι τις παγκόσμιες κλιματικές αλλαγές.

Παρόλο που πολλές χώρες καταβάλλουν μεγάλες προσπάθειες και επενδύσεις για την αύξηση του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας η οποία θα ικανοποιεί την ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας και για τη βελτίωση της διατήρησης και της αποδοτικότητας της χρήσης ορυκτών καυσίμων, η αντιμετώπιση των προβλημάτων της κλιματικής αλλαγής κατά τις προσεχείς δεκαετίες θα απαιτήσει την σημαντική αύξηση της συνεισφοράς της CCS.

### 3.2. Πηγές διοξειδίου του άνθρακα για μελλοντική δέσμευση του

Οι μεγαλύτερες δυναμικές πηγές CO<sub>2</sub> σήμερα, είναι τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα. Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εκπέμπουν πάνω από το ένα τρίτο των εκπομπών CO<sub>2</sub> παγκοσμίως. Ένας σταθμός ηλεκτροπαραγωγής με κονιορτοποιημένο γαιάνθρακα 1000 MW, εκπέμπει μεταξύ 6 και 8 Mt / έτος CO<sub>2</sub>. Ένας σταθμός παραγωγής ενέργειας με πετρέλαιο μονού κύκλου εκπέμπει περίπου τα δύο τρίτα, ενώ ένα συνδυασμένο εργοστάσιο κυκλικής παραγωγής φυσικού αερίου εκπέμπει περίπου το ήμισυ από αυτό.

Το παραγόμενο CO<sub>2</sub> προέρχεται και από άλλες δύο πηγές όπως φαίνεται στην εικόνα 40. Αρκετές βιομηχανικές διεργασίες παράγουν υψηλής συγκέντρωσης ρεύματα CO<sub>2</sub> ως παραπροϊόν. Παρά το γεγονός ότι είναι περιορισμένα σε ποσότητα, τα εν λόγω υποπροϊόντα αποτελούν καλό στόχο δέσμευσης, επειδή το CO<sub>2</sub> που συλλέγεται είναι αναπόσπαστο μέρος της συνολικής παραγωγικής διαδικασίας, με αποτέλεσμα να υπάρχει ένα σχετικά χαμηλό κόστος για την ολοκλήρωση της δέσμευσης. Άλλες βιομηχανικές διεργασίες που προσφέρονται για δέσμευση άνθρακα είναι η παρασκευή αμμωνίας, οι διεργασίες ζύμωσης και η παραγωγή υδρογόνου (π.χ., στη διύλιση πετρελαίου).



**Εικ. 40** Πηγές παραγόμενου CO<sub>2</sub>

Μελλοντικές ευκαιρίες για δέσμευση CO<sub>2</sub> μπορεί επίσης να προκύψουν από τη εξανθράκωση, δηλ. την παραγωγή καυσίμων υδρογόνου από πρώτες ύλες που είναι πλούσιες σε άνθρακα, όπως το φυσικό αέριο, οι γαιάνθρακες και η βιομάζα. Το υποπροϊόν του CO<sub>2</sub> θα είναι σχετικά καθαρό και το κόστος της δέσμευσης του άνθρακα θα είναι σχετικά χαμηλό. Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κυψέλες καυσίμου και σε άλλες τεχνολογίες με βάση το υδρογόνο ως καύσιμο, αλλά υπάρχει σημαντικό κόστος για την ανάπτυξη μιας μαζικής αγοράς και υποδομής για αυτά τα νέα καύσιμα.

### 3.3. Διαδικασίες δέσμευσης CO<sub>2</sub>

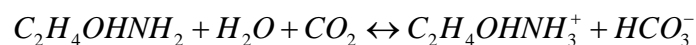
Οι διαδικασίες δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εμπίπτουν σε τρεις γενικές κατηγορίες: (1) διαχωρισμό των καυσαερίων (2) καύση με χρήση οxyfuel σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και (3) διαχωρισμός προ-καύσης. Κάθε μία από αυτές τις τεχνολογίες έχει το δικό της ενεργειακό και οικονομικό κόστος.

#### 3.3.1 Διαχωρισμός καυσαερίων – Δέσμευση μετά την καύση

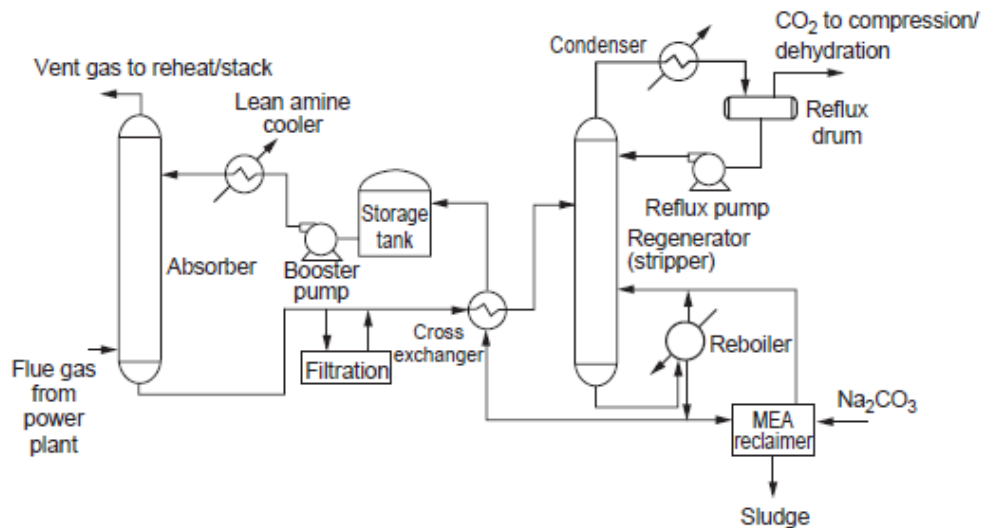
Σήμερα, ο διαχωρισμός καυσαερίων και η δέσμευση CO<sub>2</sub> πραγματοποιούνται σε περίπου δώδεκα εγκαταστάσεις παγκοσμίως. Η διαδικασία δέσμευσης βασίζεται στη χημική απορρόφηση. Το δεσμευμένο CO<sub>2</sub> χρησιμοποιείται για διάφορες βιομηχανικές και εμπορικές διεργασίες, π.χ. παραγωγή ουρίας, δημιουργία μονώσεων, ενανθράκωση ποτών και παραγωγή ξηρού πάγου. Επειδή το δεσμευμένο CO<sub>2</sub> χρησιμοποιείται ως εμπόρευμα, η διαδικασία απορρόφησης, αν και δαπανηρή, είναι κερδοφόρα λόγω της τιμής που επιτυγχάνεται για το CO<sub>2</sub> το οποίο πωλείται.

Η χημική απορρόφηση αναφέρεται σε μια διαδικασία κατά την οποία ένα αέριο (σε αυτή την περίπτωση το CO<sub>2</sub>) απορροφάται σε ένα υγρό διαλύτη με σχηματισμό μιας χημικά συνδεδεμένης ένωσης. Όταν χρησιμοποιείται σε μια μονάδα παραγωγής ενέργειας για τη δέσμευση CO<sub>2</sub>, τα καυσαέρια έρχονται σε επαφή με τον διαλύτη σε μία στήλη απορροφητή, όπου ο διαλύτης απομακρύνει το CO<sub>2</sub> από τα καυσαέρια.

Στη συνέχεια, ο διαλύτης περνά μέσα από μια μονάδα αναγέννησης, όπου το απορροφημένο CO<sub>2</sub> απογυμνώνεται από τον διαλύτη με αντίθετη ροή ατμού στους 100-120 °C. Ο υδρατμός συμπυκνώνεται, αφήνοντας ένα ρεύμα CO<sub>2</sub> υψηλά συμπυκνωμένο (πάνω από 99%), το οποίο μπορεί να συμπιεστεί για εμπορική χρήση ή αποθήκευση. Ο φτωχός διαλύτης ψύχεται στους 40-65 ° C και ανακυκλώνεται στη στήλη απορρόφησης. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο απορροφητικό για την απορρόφηση CO<sub>2</sub> είναι η μονοαιθανολαμίνη (MEA). Η θεμελιώδης αντίδραση αυτής της διαδικασίας είναι η:



Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας απορρόφησης, η αντίδραση προχωρά από αριστερά προς τα δεξιά. Κατά την αναγέννηση, η αντίδραση προχωρά από δεξιά προς αριστερά. Η ψύξη και η θέρμανση του διαλύτη, η άντληση και η συμπίεση απαιτούν ισχύ η οποία λαμβάνεται από τον θερμικό κύκλο της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνοντας έτσι τη θερμική της απόδοση. Ένα σχήμα μιας διαδικασίας χημικής απορρόφησης για τα καυσαέρια ενός εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας απεικονίζεται στην εικόνα 41.



**Εικ. 41** Διάγραμμα ροής διεργασίας για τη διαδικασία διαχωρισμού CO<sub>2</sub> με μονοαιθανολαμίνη

### 3.3.2 Καύση με χρήση oxy-fuel

Όταν ένα ορυκτό καύσιμο (γαιάνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο) καίγεται στον αέρα, το κλάσμα του διοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια κυμαίνεται από 3 έως 15%, ανάλογα με την περιεκτικότητα του καυσίμου σε άνθρακα και την ποσότητα της περίσσιας αέρα που απαιτείται για την διαδικασία καύσης. Ο διαχωρισμός του διοξειδίου του άνθρακα από τα υπόλοιπα καυσαέρια (κυρίως N<sub>2</sub>) με χημικά ή φυσικά μέσα έχει αρκετά μεγάλο κόστος και ενεργειακές ανάγκες.

Μια εναλλακτική λύση είναι το ορυκτό καύσιμο να αναφλεγεί σε περιβάλλον καθαρού ή εμπλουτισμένου οξυγόνου. Με αυτόν τον τρόπο, το καυσαέριο θα περιέχει κυρίως CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>O. Ένα μέρος των καυσαερίων πρέπει να ανακυκλωθεί στο θάλαμο καύσης για να υπάρχει έλεγχος της θερμοκρασίας της φλόγας. Από τα μη ανακυκλωμένα καυσαέρια, οι υδρατμοί μπορούν εύκολα να συμπυκνωθούν και έτσι το CO<sub>2</sub> μπορεί να συμπιεστεί και να διοχετευθεί κατευθείαν στον τόπο αποθήκευσης.

Φυσικά, η διαδικασία διαχωρισμού έχει πλέον μετατοπιστεί από τα καυσαέρια, στον αέρα εισαγωγής: το οξυγόνο πρέπει να διαχωριστεί από το άζωτο στον αέρα. Μόνο η μονάδα διαχωρισμού αέρα μπορεί να καταναλώνει περίπου το 15% της ηλεκτρικής ισχύος της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτώντας μια αντίστοιχη αύξηση του ορυκτού καυσίμου που καταναλώνεται για την επίτευξη της ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος της εγκατάστασης. Ο αέρας διαχωρίζεται σε υγρό οξυγόνο, αέριο άζωτο, αργό και άλλα δευτερεύοντα συστατικά του αέρα. Αυτά τα υποπροϊόντα είναι εμπορεύσιμα μειώνοντας πρακτικά το συνολικό κόστος της εγκατάστασης.

Οι μελέτες σε μεγάλη πειραματική κλίμακα δείχνουν ότι η ανωτέρω μέθοδος δέσμευσης CO<sub>2</sub> μπορεί να εγκατασταθεί εκ των υστέρων σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις κονιοποιημένου γαιάνθρακα.

### 3.3.3 Δέσμευση Προ-Καύσης

Η δέσμευση του CO<sub>2</sub> πριν από την καύση προσφέρει ορισμένα πλεονεκτήματα. Πρώτον, το CO<sub>2</sub> δεν αραιώνεται περαιτέρω από τον αέρα καύσης. Δεύτερον, το ρεύμα που περιέχει CO<sub>2</sub> είναι συνήθως σε αυξημένη πίεση. Συνεπώς, μπορούν να εφαρμοστούν αποτελεσματικότερες μέθοδοι διαχωρισμού, π.χ. με απορρόφηση πίεσης σε φυσικούς διαλύτες, όπως μεθανόλη ή πολυαιθυλενογλυκόλη). Αυτού του είδους η δέσμευση εφαρμόζεται συνήθως σε μονάδες αεριοποίησης γαιάνθρακα συνδυασμένου κύκλου.

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα αυτής της διαδικασίας είναι ότι σήμερα η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι φθηνότερη σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρισμού από κονιορτοποιημένο γαιάνθρακα από ό,τι στις εγκαταστάσεις αεριοποίησης γαιάνθρακα συνδυασμένου κύκλου.

Σε παγκόσμιο επίπεδο υπάρχουν αρκετές εγκαταστάσεις αεριοποίησης, οι περισσότερες εκ' των οποίων όμως δεν παράγουν απευθείας ηλεκτρική ενέργεια αλλά παράγουν αέριο σύνθεσης και διάφορα άλλα υποπροϊόντα αεριοποίησης γαιάνθρακα. Στις εγκαταστάσεις αυτές, μετά το στάδιο αεριοποίησης, το CO<sub>2</sub> διαχωρίζεται από τα άλλα αέρια, όπως το μεθάνιο, το υδρογόνο ή ένα μίγμα μονοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου. Το αέριο σύνθεσης ή το υδρογόνο που παράγονται από αυτές τις εγκαταστάσεις, χρησιμοποιούνται κυρίως ως καύσιμο ή για χημική πρώτη ύλη, π.χ., για την παρασκευή υγρών καυσίμων ή τη σύνθεση αμμωνίας. Το CO<sub>2</sub> μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως χημική πρώτη ύλη για την παραγωγή ξηρού πάγου, για ανθρακούχα ποτά και για ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου (EOR).

### 3.4. Αποθήκευση CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς

Μετά τη διαδικασία δέσμευσης, το CO<sub>2</sub> πρέπει να αποθηκευτεί, έτσι ώστε να μην απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα. Για τη μέθοδο αποθήκευσης πρέπει να εφαρμόζονται ορισμένα βασικά κριτήρια: α) η περίοδος αποθήκευσης πρέπει να παρατείνεται, κατά προτίμηση από εκατοντάδες έως χιλιάδες έτη, β) το κόστος αποθήκευσης, συμπεριλαμβανομένου του κόστους μεταφοράς από την πηγή στην τοποθεσία αποθήκευσης, πρέπει να ελαχιστοποιείται, γ) ο κίνδυνος ατυχημάτων πρέπει να εξαλειφθεί, δ) ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος πρέπει να είναι ελάχιστος, και ε) η μέθοδος αποθήκευσης να μην παραβιάζει τους εθνικούς ή διεθνείς νόμους και κανονισμούς.

Οι χώροι αποθήκευσης περιλαμβάνουν κυρίως τους γεωλογικούς ταμιευτήρες. Οι γεωλογικοί ταμιευτήρες είναι οι αλατούχοι σχηματισμοί σε βάθος, οι κοιλότητες που δημιουργήθηκαν από την εξάντληση των κοιτασμάτων πετρελαίου, φυσικού αερίου και γαιάνθρακα που βρίσκονταν εκεί, οι σχηματισμοί όπου έχει ολοκληρωθεί ένα έργο ενισχυμένης ανάκτησης πετρελαίου και τέλος κοιτάσματα γαιάνθρακα τα οποία είναι μη εκμεταλλεύσιμα. Μαζί, αυτά μπορούν να χωρέσουν εκατοντάδες έως χιλιάδες γιγα-τόνους γαιάνθρακα (Gt C), και η τεχνολογία για την έγχυση του CO<sub>2</sub> στο έδαφος είναι καλά εδραιωμένη. Το CO<sub>2</sub> αποθηκεύεται σε γεωλογικούς σχηματισμούς με διάφορους μηχανισμούς παγίδευσης. Κάθε φορά επιλέγεται ο κατάλληλος ανάλογα με τον τύπο του μέρους όπου θα γίνει η αποθήκευση.

### **3.4.1. Εξαντλημένα κοιτάσματα πετρελαίου και αερίου**

Παρόλο που η αποθήκευση του CO<sub>2</sub> σε εξαντλημένα πεδία πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι μια σχετικά νέα ιδέα, στο πλαίσιο του μετριασμού της κλιματικής αλλαγής, γίνεται εφαρμογή της εδώ και αρκετά χρόνια. Ο κύριος σκοπός αυτής της ενέργειας ήταν η απόρριψη και αποθήκευση του λεγόμενου «αερίου οξέος», ενός μείγματος CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S και άλλων υποπροϊόντων που προκύπτουν από την εκμετάλλευση του πετρελαίου και του φυσικού αερίου. Το 2001, σχεδόν 200 εκατομμύρια κυβικά μέτρα αερίου οξέος εγχύθηκαν σε σχηματισμούς σε όλη την Αλμπέρτα και τη Βρετανική Κολούμπια σε περισσότερες από 30 διαφορετικές τοποθεσίες.

Η έγχυση αερίου οξέος έχει γίνει μια δημοφιλής εναλλακτική λύση για την ανάκτηση θείου και την καύση όξινου αερίου, ιδιαίτερα στο Δυτικό Καναδά. Ουσιαστικά, με τα συστήματα έγχυσης αερίου οξέος απομακρύνονται το CO<sub>2</sub> και το H<sub>2</sub>S από το παραγόμενο ρεύμα πετρελαίου ή φυσικού αερίου, συμπιέζονται, μεταφέρονται μέσω αγωγού σε φρεάτιο έγχυσης και αναθέτονται στον γεωλογικό ταμιευτήρα που δημιουργήθηκε μετά την εξάντληση του κοιτάσματος για απόρριψη. Οι υποστηρικτές της έγχυσης όξινων αερίων υποστηρίζουν ότι τα συστήματα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τις εναλλακτικές λύσεις για την επεξεργασία και τη διάθεση ανεπιθύμητων αερίων. Στα περισσότερα από αυτά τα έργα, το CO<sub>2</sub> αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο συστατικό του όξινου αερίου, συνήθως μέχρι το 90% του συνολικού όγκου που εισάγεται για απόρριψη. Η επιτυχής έγχυση όξινου αερίου απαιτεί μια κοντινή γεωλογική πορώδη δεξαμενή, απομονωμένη από κοντινές ζώνες νερού.

Ιστορικά, οι ανωτέρω εξαντλημένες γεωλογικές δεξαμενές αποδείχθηκαν εξαιρετικά αξιόπιστοι ταμιευτήρες υδρογονανθράκων και όξινων αερίων με την πάροδο του χρόνου.

### **3.4.2 Ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου**

Η έγχυση διοξειδίου του άνθρακα σε γεωλογικούς σχηματισμούς όπου έχει εκτελεστεί ένα έργο ενισχυμένης ανάκτησης πετρελαίου (EOR) είναι μια ώριμη τεχνολογία. Το 2000, 84 εμπορικά ή ερευνητικά σχέδια CO<sub>2</sub> - EOR λειτουργούσαν παγκοσμίως. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, που αυτή την στιγμή είναι ο ηγέτης της τεχνολογίας, υπάρχουν 72 από τα 84 έργα. Συνδυασμένα, τα έργα αυτά το 2000 παρήγαγαν 200.772 βαρέλια (bbl) πετρελαίου ημερησίως, ένα μικρό αλλά σημαντικό ποσοστό (0,3%) των 67,2 εκατομμυρίων bbl ανά ημέρα συνολικής παγκόσμιας παραγωγής πετρελαίου εκείνου του έτους. Εκτός των Ηνωμένων Πολιτειών και του Καναδά, αντίστοιχα έργα έχουν εφαρμοστεί στην Ουγγαρία, την Τουρκία και το Τρινιτάντ.

Στα περισσότερα έργα CO<sub>2</sub> - EOR, μεγάλο μέρος του CO<sub>2</sub> που εγχέεται στη δεξαμενή του πετρελαίου αποθηκεύεται μόνο προσωρινά. Αυτό συμβαίνει επειδή ο τερματισμός ενός έργου EOR συνήθως συνεπάγεται την «εκτόνωση» της πίεσης της δεξαμενής για τη μεγιστοποίηση της ανάκτησης πετρελαίου. Αυτή η εκτόνωση έχει σαν αποτέλεσμα την απελευθέρωση του διοξειδίου του άνθρακα, ενώ μια μικρή αλλά σημαντική ποσότητα του εγχυμένου CO<sub>2</sub> παραμένει διαλυμένη στο ακίνητο πετρέλαιο.

### **3.4.3 Μη εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα γαιανθράκων**

Τα εγκαταλελειμμένα ή μη οικονομικά συμφέροντα προς εκμετάλλευση κοιτάσματα γαιάνθρακα είναι ένας άλλος δυνητικός χώρος αποθήκευσης. Το CO<sub>2</sub> διαχέεται μέσω της πορώδους δομής του γαιάνθρακα και απορροφάται φυσικά σε αυτόν. Αυτή η διαδικασία είναι παρόμοια με τον τρόπο με τον οποίο ο ενεργός άνθρακας απομακρύνει τις ακαθαρσίες από τον αέρα ή το νερό. Η εκτεθειμένη επιφάνεια άνθρακα έχει μια τάση να κάνει προσρόφηση του CO<sub>2</sub>.

### **3.4.4 Αλατούχοι σχηματισμοί σε μεγάλα βάθη**

Οι αλατούχοι σχηματισμοί οι οποίοι βρίσκονται σε μεγάλα βάθη, μπορεί να έχουν το μεγαλύτερο δυναμικό αποθήκευσης CO<sub>2</sub>. Αυτοί οι ταμιευτήρες, είναι πολύ διαφορετικοί από τους πιο γνωστούς οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την παροχή γλυκού νερού. Σε εξέλιξη βρίσκεται έρευνα ακόμα και σήμερα στην προσπάθεια να γίνει πλήρως κατανοητό το ποσοστό αυτών των βαθιών αλατούχων σχηματισμών οι οποίοι είναι κατάλληλοι για εκμετάλλευση ως χώροι αποθήκευσης CO<sub>2</sub>.

Η πυκνότητα του CO<sub>2</sub> εξαρτάται από το βάθος της έγχυσης, το οποίο καθορίζει τη θερμοκρασία και την πίεση του περιβάλλοντος. Το CO<sub>2</sub> πρέπει να εγχυθεί κάτω από τα 800 m, έτσι ώστε να βρίσκεται σε κάποια «πυκνή» φάση (είτε υγρή ή είτε υπερκρίσιμη). Όταν εγχέεται σε αυτά τα βάθη, το ειδικό βάρος του CO<sub>2</sub> κυμαίνεται από 0,5 έως 0,9, το οποίο είναι χαμηλότερο από αυτό της άλμης του υδροφόρου ορίζοντα. Ως εκ τούτου, το CO<sub>2</sub> ανέρχεται στην επιφάνεια του ταμιευτήρα, και είναι απαραίτητο ένα εμπόδιο για να εξασφαλιστεί η παραμονή του μέσα στον αλατούχο σχηματισμό. Οι αδιαπέραστοι γεωλογικοί σχηματισμοί που επικαλύπτουν τον υπόγειο ταμιευτήρα ακινητοποιούν το CO<sub>2</sub>.

Δύο άλλοι πολύ σημαντικοί μηχανισμοί παγίδευσης είναι η διαλυτότητα και η παγίδευση του CO<sub>2</sub> σε ορυκτά στοιχεία. Αυτοί περιλαμβάνουν τη διάλυση του CO<sub>2</sub> σε υγρό διαλύτη και την αντίδραση του με ανόργανα συστατικά που υπάρχουν στο σχηματισμό του ταμιευτήρα, σχηματίζοντας σταθερές στερεές ενώσεις όπως τα ανθρακικά άλατα. Εάν η διαδρομή της ροής είναι αρκετά μεγάλη, το CO<sub>2</sub> μπορεί να διαλυθεί ή να σταθεροποιηθεί λόγω των αντιδράσεων με τα ανόργανα στοιχεία πλήρως, πριν φτάσει στο περιθώριο της λεκάνης απορροής, γεγονός που ουσιαστικά το παγιδεύει μόνιμα στη δεξαμενή.

## **3.5 Αποθήκευση CO<sub>2</sub> σε κοιλάτητες της μεθόδου UCG**

### **3.5.1 Μοντελοποίηση της ανάπτυξης κοιλοτήτων**

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αεριοποίησης, ο αντιδρών γαιάνθρακας δίνει τη θέση του σε κοιλάτητες που αποτελούνται από ένα υπολειμματικό εξανθράκωμα, τέφρα, και κενό χώρο. Ως εκ τούτου, το σχήμα και το μέγεθος τους αλλάζουν καθώς προχωρά η διαδικασία αεριοποίησης. Το μέγεθος της κοιλότητας αφορά άμεσα τον ρυθμό κατανάλωσης του γαιάνθρακα και κατά συνέπεια συνδέεται με τον ρυθμό αντίδρασης που λαμβάνει χώρα στον αντιδραστήρα. Όσον αφορά το



σχήμα της κοιλότητας, αυτό εξαρτάται από τους ρυθμούς ανάπτυξης στις τέσσερις κατευθύνσεις που επηρεάζονται από το πεδίο ροής του αερίου μέσα στην κοιλότητα και από άλλα φαινόμενα όπως η θερμομηχανική καταστροφή του γαιάνθρακα, οι συνθήκες λειτουργίας και το πάχος των στρώσεων του γαιάνθρακα. Η ανάπτυξη καθώς και η τελική μορφή της κοιλότητας UCG έχει άμεση επίδραση στους οικονομικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες του έργου. Ο λόγος πλάτους / ύψους της κοιλότητας UCG καθορίζει την ανάκτηση πόρων και οι τελικές συνολικές διαστάσεις θα υπαγορεύσουν την υδρολογική και γεωμηχανική συμπεριφορά του υπερκείμενου υλικού.

Η πρόοδος των κοιλοτήτων UCG και το τελικό περίγραμμα και οι διαστάσεις του καναλιού αεριοποίησης έχουν μεγάλη σημασία για τα περιβαλλοντικά ζητήματα και τη γεωλογική σταθερότητα των γεωλογικών σχηματισμών που περιβάλλουν τις κοιλότητες (102). Έχει καταβληθεί μεγάλη προσπάθεια για την ανάπτυξη μαθηματικών και αριθμητικών μοντέλων, τα οποία ποικίλουν και περιλαμβάνουν από μονοδιάστατα μοντέλα μέχρι και πλήρως τρισδιάστατα τα οποία προσομοιάζουν πλήρως την ανάπτυξη της κοιλότητας κατά την UCG. Ο Perkins και ο Sahajwalla (51) ανέπτυξαν ένα θερμομηχανικό μονοδιάστατο μοντέλο για να ελέγξουν τις επιδράσεις των συνθηκών λειτουργίας (π.χ. θερμοκρασία, πίεση, εισροή νερού και σύνθεση του παραγόμενου αερίου) και των ιδιοτήτων του γαιάνθρακα (π.χ. θερμομηχανική συμπεριφορά, αντιδραστικότητα και σύνθεση) επί του ρυθμού της τοπικής ανάπτυξης κοιλοτήτων και της αποδοτικότητας της ενεργειακής χρήσης. Ο ρυθμός αύξησης της κοιλότητας στα έργα UCG επηρεάζεται ως επί το πλείστον από τη θερμομηχανική συμπεριφορά καταστροφής του γαιάνθρακα, την συμπεριφορά της τέφρας και τέλος την ποσότητα του ξηρού γαιάνθρακα στο κοίτασμα (103).

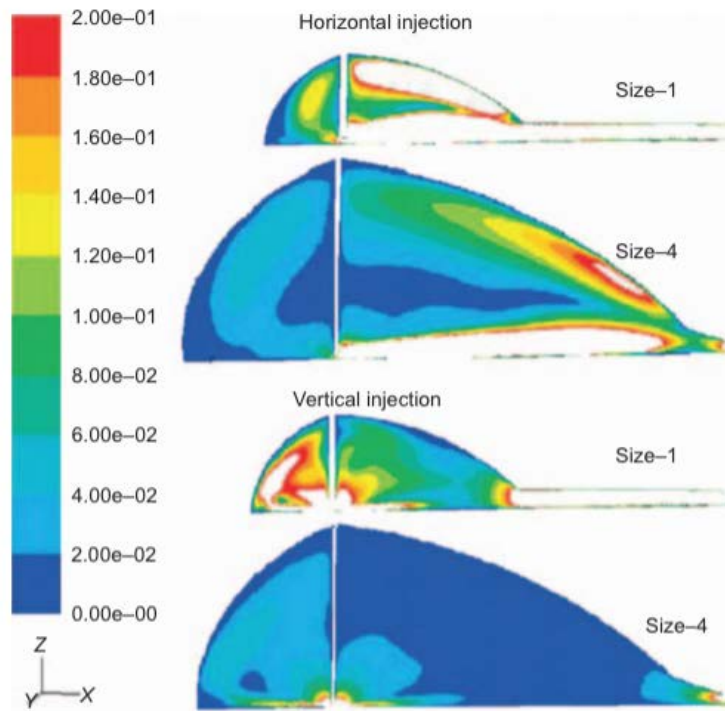
Ο Chen et al. (104) ανέπτυξε ένα δισδιάστατο θερμικό μοντέλο για τον υπολογισμό της κατανομής της θερμοκρασίας στην κατακόρυφη κατεύθυνση της κοιλότητας UCG και του όγκου καύσης με την παραδοχή ενός κυκλικού καναλιού αεριοποίησης. Ο Yang et al. (105) ανέπτυξε ένα τρισδιάστατο (3D) συζευγμένο θερμομηχανικό μοντέλο για να αναλύσει την ανάπτυξη της κοιλότητας, καθώς επίσης και την καθίζηση της οροφής και της επιφάνειας του εδάφους. Έχει υιοθετηθεί μια διαδικασία που συνδέει την θερμοκρασία με την μετατόπιση για τον ταυτόχρονο προσδιορισμό των τάσεων / της μετατόπισης και της θερμοκρασίας.

Όσον αφορά τη χημική αντίδραση, η κοιλότητα UCG θεωρείται συνήθως είτε ως συσσωρευμένη κλίνη είτε ως ελεύθερο κανάλι. Ο Yang et al. (106) υποθέτει ότι η κοιλότητα UCG ως συσσωρευμένη κλίνη είχε αντιδραστήρα και χρησιμοποίησε ένα σύνολο μερικών διαφορικών εξισώσεων για να μοντελοποιήσει τη κατανομή θερμοκρασίας. Επί πλέον ο Khadse et al (107) ανέπτυξε ένα μονοδιάστατο υπολογιστικό μοντέλο για την θεώρηση του θαλάμου της UCG ως συσσωρευμένη κλίνη. Ο αντιδραστήρας γεμίζει από υλικό γαιάνθρακα που διέρχεται από τις διαδικασίες οξείδωσης και αεριοποίησης σε πορώδες χώρο. Το σύστημα των εξισώσεων διαιρέθηκε σε δύο μέρη, προκειμένου να ξεπεραστούν οι μεγάλες διαφορές στις χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές των διαφόρων μεταβλητών στο μοντέλο: το ένα αποτελείται από σταθερή κατάσταση αερίου φάσης και ενεργειακό ισοζύγιο που λαμβάνεται μόνο συναρτήσει του μήκους και το άλλο μόνο συναρτήσει του χρόνου.

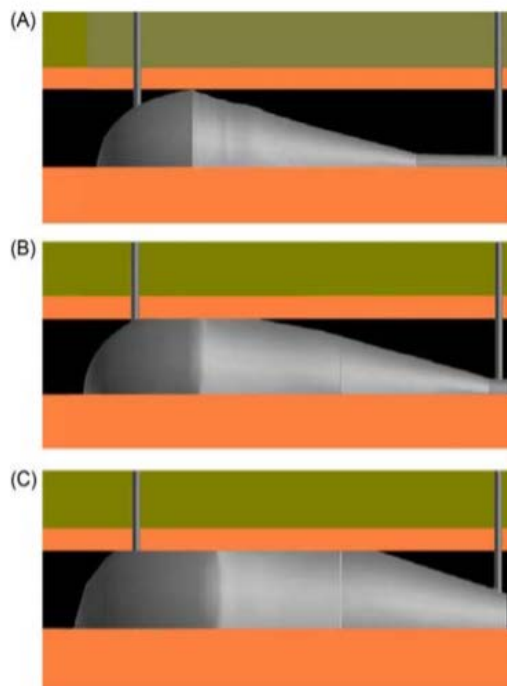
Οι εξισώσεις μάζας / μεταφοράς θερμότητας σε συνδυασμό με τις χημικές διεργασίες μπορούν να δώσουν καλύτερες εκτιμήσεις της κατανομής της θερμοκρασίας στην κοιλότητα UCG. Οι Perkins και ο Sahajwalla (108) ανέπτυξαν ένα μοντέλο δισδιάστατης (2D) υπολογιστικής δυναμικής ρευστού (Computational Fluid Dynamic-CFD) του UCG που εξομοιώνει τις συνολικές επιδράσεις της μεταφοράς θερμότητας και μαζών και της χημικής αντίδρασης κατά την πρόοδο της αεριοποίησης. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν τη σημασία της μεταφοράς και της αντίδρασης στις διεργασίες UCG. Ο Nourozieh et al. [109] χρησιμοποίησε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση ροής σε πορώδη μέσα για την κατασκευή ενός τρισδιάστατου (3D) μοντέλου χρησιμοποιώντας ένα σχετικά λεπτό και σε μεγάλο βάθος κοίτασμα γαιάνθρακα. Η ανάπτυξη της κοιλότητας προκαλείται από αντιδράσεις καύσης και αεριοποίησης και ο ρυθμός αυτής της ανάπτυξης εξαρτάται από τον ρυθμό αυτών των αντιδράσεων. Ο Seifi et al. (110) πραγματοποίησε επίσης μια τρισδιάστατη (3D) προσομοίωση χρησιμοποιώντας τη μονάδα STARS, η οποία είναι ένας προσομοιωτής διαδικασίας για τη μοντελοποίηση της ροής της τριφασικής, γεωμηχανικής διαδικασίας. Το μοντέλο αυτό στοχεύει στη διερεύνηση του σχήματος της κοιλότητας, της θερμοκρασιακής μεταβολής, της σύνθεσης του αερίου προϊόντος και των ρυθμών ροής, λαμβάνοντας υπόψη τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μαζικής μεταφοράς σε συνδυασμό με τις εκάστοτε χημικές αντιδράσεις. Τα ευρήματα αυτού του μοντέλου στην πρόβλεψη του ρυθμού ροής του αερίου σύνθεσης (syngas), του σχήματος κοιλότητας και των προφίλ θερμοκρασίας δείχνουν αξιοπιστία στην επιστημονική κοινότητα.

Κατά τη διάρκεια των διαδικασιών UCG, το σχηματισμένο σχήμα της κοιλότητας εκτιμάται ότι παρουσιάζει τρισδιάστατη (3D) ασυμμετρία. Καθώς η UCG προχωρά, το σχήμα της κοιλότητας σχετίζεται με τη ροή του αερίου. Οι δυνάμεις πλευστότητας δίνουν στην κοιλότητα ένα ακανόνιστο σχήμα και στις τρεις διαστάσεις και η γεωμετρία λειτουργεί ως όριο για τη ροή του αερίου. Ο χαρακτηρισμός των μη ιδανικών οδών ροής είναι μια σημαντική πτυχή, καθώς είναι πιθανό να επηρεάσει τη λειτουργία της διαδικασίας. Οι μελέτες CFD είναι απαραίτητες για να γίνουν κατανοητά τα πολύπλοκα μοτίβα ροής μέσα στην κοιλότητα. Ο Daggupati et al. πρότεινε ένα μοντέλο στο οποίο επικεντρώνεται στα σχήματα κοιλοτήτων και ροής. Η κοιλότητα σε αυτή την περίπτωση χωρίζεται σε ξεχωριστά διαμερίσματα που ανταλλάσσουν θερμότητα και μάζα με την οροφή της κοιλότητας και το μη ανθρακούχο βραχώδες δάπεδο (Εικ. 42), παρέχοντας σημαντική εξοικονόμηση υπολογισμών στην προγνωστική μοντελοποίηση για μοτίβα ροής των κοιλοτήτων UCG. Επιπροσθέτως, εξετάστηκε ο προσανατολισμός της έγχυσης (κάθετη ή οριζόντια) και η ακτινοβολία στη ροή του αντιδρώντος αερίου. Τα αριθμητικά (εικονικά) πειράματα ανιχνευτών έχουν διεξαχθεί χρησιμοποιώντας τεχνικές CFD που ορίζουν την κατανομή χρόνου διαμονής ή την ηλικία εξόδου της κατανομής.

Το 2009, ο Luo et al. έφτιαξε ένα μοντέλο συνδυάζοντας την CFD και το μαθηματικό μοντέλο ανάπτυξης των κοιλοτήτων, παρουσιάζοντας παραμέτρους όπως το σχήμα και οι διαστάσεις των κοιλοτήτων (Εικ. 43). Οι επιδράσεις των φυσικών και αναγκαστικών κινητήριων δυνάμεων της μεταφοράς στην κρούση και τη μεταφορά μάζας στην κοιλότητα εξετάζονται στο δισδιάστατο μοντέλο ανάπτυξης κοιλοτήτων, το οποίο στη συνέχεια επεκτείνεται σε τρισδιάστατο και στη συνέχεια ενσωματώνεται σε προσομοίωση CFD.



**Εικ 42** Υπολογιστικό μοντέλο το οποίο επικεντρώνεται στα σχήματα κοιλοτήτων και ροής [132]



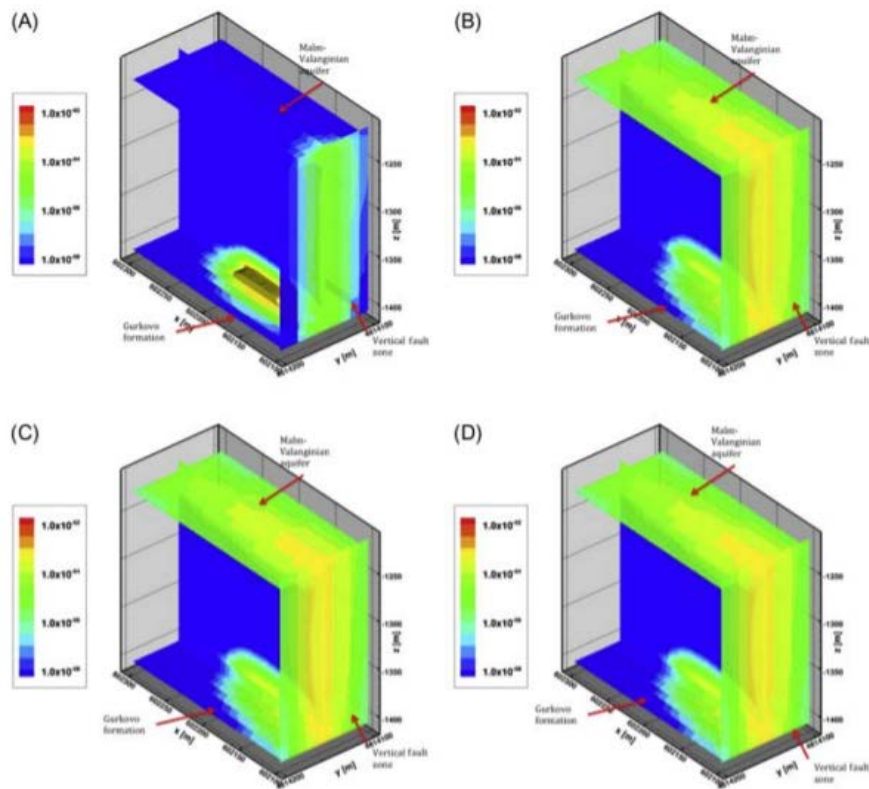
**Εικ 43** Υπολογιστικό μοντέλο στο οποίο παρουσιάζονται το σχήμα και οι διαστάσεις των κοιλοτήτων [132]

### 3.5.2 Σκοπιμότητα γεωμηχανικής και περιβαλλοντικής μοντελοποίησης

Παρά το γεγονός ότι η διαδικασία UCG λαμβάνει χώρα σε βαθιά υπόγεια κοιτάσματα γαιάνθρακα, ακόμη και κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, το παραγόμενο αέριο σύνθεσης μπορεί να ταξιδέψει μέσω των τεκτονικών ρηγμάτων και ρωγμών σε στρώματα στον ανώτερο υδροφόρο ορίζοντα, προκαλώντας μόλυνση. Επιπρόσθετα, η υπερκείμενη στρωματογραφία λόγω της αυξημένης υδροστατικής πίεσης των κοιλοτήτων της UCG παρουσιάζει αστάθειες και μερικές καταστροφές. Το γεγονός αυτό σχηματίζει διαδρομές ροής όπου το νερό του υδροφόρου ορίζοντα οδηγείτε στις κοιλότητες και συνεπώς αναμειγνύεται με τα παραμένοντα χημικά που παράγονται κατά τη διαδικασία UCG, γεγονός το οποίο τελικά προκαλεί τη μόλυνση των υδάτων. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η ανίχνευση βενζολίου στα υπόγεια ύδατα του έργου Kingaroy στο Queensland, η οποία οδήγησε αυτομάτως στη διακοπή του έργου το 2010(111).

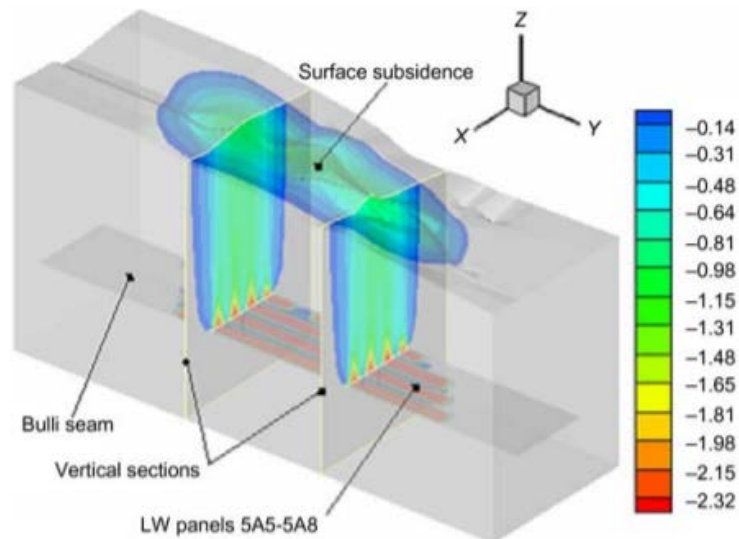
Ένα άλλο φαινόμενο που συμβαίνει κατά την διαδικασία της UCG είναι η αυξημένη θερμοκρασία και η εισροή του ρευστού μέσα στους πόρους του πετρώματος, η οποία μπορεί να αλλάξει τη μηχανική συμπεριφορά του, όπως την ακαμψία και την αντοχή του, συνεπώς μπορεί να προκαλέσει γεωλογική αστάθεια ακολουθούμενη από καθιζήσεις. Μια μελέτη των Vorobiev et al. (112) έχει επικεντρωθεί στις γεωμηχανικές διεργασίες στον γαιάνθρακα και τους παρακείμενους βράχους. Τα πρόσφατα έργα της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) για το RFCS (Research Fund for Coal and Steel) επικεντρώθηκαν στη γεωμηχανική αντίδραση των τεκτονικών ρηγμάτων σε μια ενδεχόμενη υπόγεια αεριοποίηση ενός κοιτάσματος γαιάνθρακα UCG. Επομένως, το μοντέλο περιελάμβανε δομική γεωλογία, συμπεριλαμβανομένης της γεωμετρίας των ρηγμάτων και των στρωματογραφικών δεδομένων όπως το πάχος και το βάθος των στρωμάτων του γαιάνθρακα. Πρόσθετη ανάλυση της ευαισθησίας της κοιλότητας μακριά από τα ρήγματα έχει διεξαχθεί για την τελική επιλογή περιοχής.

Η ανάπτυξη της κοιλότητας UCG και η ροή του αερίου καταλήγει σε φαινόμενα καθίζησης των γύρω πετρωμάτων καθώς και στην κίνηση υπόγειων υδάτων. Μετά το τέλος της διαδικασίας UCG επικεντρωνόμαστε στην επίδραση που έχουν οι κοιλότητες στο περιβάλλον και στο έδαφος. Η κοιλότητα που καθαρίζεται με καθαρή ροή νερού εμποδίζει τη διασπορά των προϊόντων αντίδρασης στο περιβάλλον κατά την προετοιμασία της επεξεργασίας καθαρισμού μετά την αντίδραση, η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν σχεδιάζεται η έγχυση CO<sub>2</sub>. Άλλες παράμετροι όπως η θερμοκρασία, η πίεση, το πορώδες των πετρωμάτων και η σύνθεση των υγρών φάσεων και των αερίων φάσεων στην υπόγεια επιφάνεια μετά την UCG πρέπει να εξεταστούν. Το τρισδιάστατο (3D) λογισμικό MODFLOW χρησιμοποιήθηκε για να αναπτυχθεί ένα υπολογιστικό μοντέλο υπογείων υδάτων για μη ισόθερμη ροή και ανίχνευση μολυσματικών παραγόντων κοντά σε τεκτονικά ρήγματα (το βενζόλιο θεωρήθηκε ότι έχει πρωταρχικό ενδιαφέρον). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το μοντέλο δείχνουν ότι οι συγκεντρώσεις ρύπων θα υπερέβαιναν το 1 ppb μετά από ένα χρόνο λειτουργίας UCG και σε περιορισμένη περιοχή. Με το πέρασμα των χρόνων οι συγκεντρώσεις μειώνονται περαιτέρω εξαιτίας της πρόσθετης χημικής αποικοδόμησης (Εικ. 44).



**Εικ 44**Μείωση των συγκεντρώσεων εξαιτίας της πρόσθετης χημικής αποικοδόμησης συναρτήσει του χρόνου [132]

Για την αντιμετώπιση προβλημάτων όπως οι ρωγμές των βράχων, οι παρεμβολές στον υδροφόρο ορίζοντα και η ροή επιφανειακών υδάτων στο περιβάλλον γαιάνθρακα, ο Οργανισμός Επιστημονικής και Βιομηχανικής Έρευνας της Κοινοπολιτείας στην Αυστραλία έχει αναπτύξει ένα μοντέλο ροής διπλής φάσης με βάση τη μέθοδο FE (Finite Element), το COSFLOW [113]. Σε αυτή τη μέθοδο, η θραύση υπολογίζεται από ένα μηχανικό υπομοντέλο και συνδυάζεται με τις μεταβολές της διαπερατότητας και του πορώδους που χρησιμοποιούνται στο υπομοντέλο ροής του ρευστού. Η ροή στο σύστημα θραύσης ελέγχεται από τον βαθμό της πίεσης και διέπεται από το νόμο του Darcy (Εικ. 45).



**Εικ 45** Υπολογιστικό μοντέλο για αντιμετώπιση προβλημάτων όπως οι ρωγμές των βράχων, οι παρεμβολές των υδάτων και η ροή εδάφους στο περιβάλλον γαιάνθρακα [132]

### 3.6 UCG και CCS

#### 3.6.1 Υδρογεωλογικό μοντέλο - Επιλογή των γεωλογικών θέσεων με αξιοποίηση των υδρογεωλογικών πληροφοριών

Οι αναλυθείσες αρχειακές και δημοσιευμένες πληροφορίες σχετικά με τις περιφερειακές και τοπικές υδρογεωλογικές και γεωθερμικές συνθήκες μπορούν να παρέχουν στοιχεία που σχετίζονται με τα lithολογικά και στρωματογραφικά δεδομένα από βαθιά φρεάτια. Η γεωλογία της περιοχής και οι υδρογεωλογικές συνθήκες μπορούν να διασαφηνιστούν για την περαιτέρω αξιοποίησή τους στην ανάπτυξη ενός υδρογεωλογικού μοντέλου. Τα τοπικά δεδομένα παρέχουν μια ευρέος φάσματος εικόνα για τις αναμενόμενες υδρογεωλογικές συνθήκες, αλλά όχι επαρκείς πληροφορίες σχετικά με τις τοπικές συνθήκες που πρόκειται να εκτελεστεί το έργο. Έτσι, τα τοπικά δεδομένα συμπληρώνονται με πρόσθετα δεδομένα και πληροφορίες ειδικά για το συγκεκριμένο υδρογεωλογικό μοντέλο της θέσης που θα εκτελεστεί το έργο.

Όλα αυτά τα στοιχεία μας δίνουν χωρικές πληροφορίες σχετικά με την τρισδιάστατη έκταση των υφιστάμενων υδροστρωματογραφικών μονάδων και τις πιθανές υδραυλικές διασυνδέσεις. Σε τέτοιες περιπτώσεις υπάρχουν επίσης εκτιμήσεις για τις υδραυλικές ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά (μέγεθος και κατεύθυνση) των υδραυλικών βαθμίδων.

Επίσης τα δείγματα νερού που λαμβάνονται από διαφορετικούς υδροφόρους ορίζοντες μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη χημική σύνθεση και την ταξινόμηση των διαφόρων υδατογενών συμπλεγμάτων. Αυτά επηρεάστηκαν κυρίως από τις υδρογεωλογικές συνθήκες των υδατογενών συμπλεγμάτων και λιγότερο από το βάθος σχηματισμού. Τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των ορυκτών των κοιλοτήτων και θα διαμορφωθούν από

τα στρώματα γαιάνθρακα για μελλοντικές θέσεις αποθήκευσης CO<sub>2</sub>. Επιπλέον, πρέπει να μελετηθούν τα κύρια χαρακτηριστικά του γεωθερμικού πεδίου της περιοχής-στόχου, όπως η θερμοκρασία, η γεωθερμική βαθμίδα, οι θερμικές ιδιότητες των πετρωμάτων και η ροή θερμότητας.

Η υδρογεωλογική και γεωθερμική ανάλυση των δεδομένων επιτρέπει τον καθορισμό του πεδίου εφαρμογής του τοπικού υδρογεωλογικού μοντέλου. Η διεξαχθείσα ανάλυση στοχεύει στις υπάρχουσες περιφερειακές και τοπικές υδρογεωλογικές συνθήκες και στη δημιουργία ενός βασικού μοντέλου για την περαιτέρω ανάπτυξη αριθμητικών μοντέλων στην εκάστοτε περιοχή που μελετάται.

### **3.6.2 Εκτίμηση της δυνατότητας να εφαρμοστεί η UCG σε συνδυασμό με την αποθήκευση CO<sub>2</sub>**

Η μη ισοθερμική ροή των υπογείων υδάτων και η μεταφορά ρύπων (κυρίως βενζόλιο) λαμβάνεται υπόψη στα έργα UCG σε τοπικό επίπεδο. Έχει παρατηρηθεί ότι ένας τόνος αεριοποιημένου γαιάνθρακα θα μπορούσε να παράγει περίπου 36 λίτρα λιθανθρακόπισσας και συνεπώς ένα σχετικά μικρό ποσοστό (0,1%) αυτού θα μπορούσε να είναι το βενζόλιο. Αυτός είναι και ο βασικός μολυσματικός παράγοντας της UCG, ο οποίος είναι πιθανό να μεταφερθεί στο υπόγειο περιβάλλον (λόγω της σχετικά υψηλής παραγωγής του κατά την αεριοποίηση και των σχετικά χαμηλών ορίων ανίχνευσης του). Σε τέτοιες περιπτώσεις, η αρχική συγκέντρωση βενζολίου θα μπορούσε να φθάσει τα 425 ppm, υποθέτοντας μια περιοχή παραγωγής με μέγεθος 20x20x5 m και πορώδες γύρω στο 1, αγνοώντας τον χρόνο αεριοποίησης.

Αυτό το μοντέλο περιλαμβάνει φυσικές διεργασίες όπως την ροή του ρευστού, της θερμότητας και την ροή μολυσματικών ουσιών ενώ η μετακίνηση των τελευταίων ελέγχεται από την οριζόντια μεταφορά και τη διασπορά.

Οι μολυσματικοί παράγοντες εκτιμάται ότι είναι μη αντιδραστικοί και δεν επηρεάζονται από την εξασθένηση και τη φθορά μέσω των γεωχημικών διαδικασιών. Κατά τη διαδικασία της μοντελοποίησης η ροή θερμότητας μπορεί να αυξηθεί. Ένα υδρογεωλογικό μοντέλο τοπικής κλίμακας και οι ολοκληρωμένες αναλύσεις μπορεί να υποδείξουν ότι οι δραστηριότητες αποθήκευσης μεταξύ UCG και CO<sub>2</sub> στην περιοχή μελέτης θα είχαν περιορισμένο αντίκτυπο στην ποιότητα των υπογείων υδάτων και δεν θα προκαλούσαν ιδιαίτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις στον κύριο υδροφόρο ορίζοντα στην παρακείμενη περιοχή. Η μάζα του CO<sub>2</sub> που εγχέεται διαλύεται κυρίως στα υπόγεια ύδατα. Επιπροσθέτως, ένας αριθμός παραμέτρων για την UCG με την ακόλουθη έγχυση CO<sub>2</sub> δείχνονται στον Πίνακα 15.

**Πίνακας 15** «Παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για διαδικασίες UCG-CCS»

Κατηγορία	Επιθυμητή τιμή	Σχόλια
Πάχος γαιάνθρακα (m) Αριθμός στρωμάτων που πρόκειται να αεριοποιηθούν	>2m	Δεν υπερβαίνει τα 30 m. Ιδανικά 5-10 m Αποφεύγονται τα στρώματα με υπερκείμενο κοιτάσμα γαιάνθρακα σε απόσταση 15 m
Διακύμανση πάχους (% πάχους στρώματος κοιτάσματος)	<25	Αποφεύγονται τα κοιτάσματα μεταβλητού πάχους
Βάθος (m)	>92	Κατά προτίμηση πάνω από 300 m και όχι πάνω από 2000 m.
Κλίση του στρώματος γαιάνθρακα (μοίρες)	0—70	Όλα είναι αποδεκτά εκτός από τα ιδιαίτερα επικλινή καθώς μπορεί να είναι τεχνικά δύσκολο να γίνει εκμετάλλευση τους με συμβατικές μεθόδους
Μεταβολή της κλίσης του στρώματος γαιάνθρακα (% της μέσης κλίσης)	<2	
Διακοπή συνεχόμενου πάχους (m)	1	Αποφεύγονται τα στρώματα με μεταβλητά μέρη / ασυνέχειες
Υπερκείμενο φορτίο (m)	100	Οι συνθήκες δαπέδου και οροφής πρέπει να εξεταστούν προσεκτικά
Βαθμός γαιάνθρακα	Χαμηλής τάξης σε βιτουμένια	Ο δείκτης ελεύθερης διόγκωσης πρέπει να είναι χαμηλός. Υποβιτουμενιούχοι και κατώτερης βαθμίδας, ιδανικά όχι οπτάνθρακας, και μη διογκούμενοι γαιάνθρακες
Περιεκτικότητα σε τέφρα (% κατά βάρος)	<50%	
Ανθρακούχο θείο (% κατά βάρος)	<1	Πτητικές ύλες μεγαλύτερες από 10%. Το θείο θα πρέπει να αφαιρείται μαζί με το syngas
Η υγρασία του γαιάνθρακα (% κατά βάρος)	<35	Προτιμώμενα 7% -35%. Ελεγχόμενες εισροές νερού είναι επιθυμητές ιδιαίτερα μετά την ανάφλεξη



Ακαθάριστη θερμογόνος δύναμη γαιάνθρακα	>12 MI/kg	
Πάχος υπερκείμενου φορτίου	>15	
Διαπερατότητα στρώματος (mD)	50-150	Περισσότερο διαπερατό σε ποσοστό μεγαλύτερο από το 20%. Η διόγκωση των γαιανθράκων μπορεί να διακόψει την ανακυκλοφορία του αερίου. Οι γαιάνθρακες υψηλής διαπερατότητας μπορούν να επιτρέψουν την επιπλέον διήθηση νερού προκαλώντας πιθανή διαρροή αερίου και μετακίνησης μολυσματικών ουσιών
Πορώδες του στρώματος γαιάνθρακα	>30%	
Απόσταση από την πλησιέστερη υπερκείμενη μονάδα νερού (m)	100	
Χαρακτηριστικά υδροφόρου γαιάνθρακα	Περιορισμένα	
Διαθέσιμοι πόροι γαιάνθρακα (106 m <sup>3</sup> )	>3,5 Mt	> 20 χρόνια λειτουργίας. Εξαρτάται από την χρήση του αερίου και την κεδοφορία.
Εγγύτητα σε ρήγματα	>150 m Εξαρτάται όμως από τις συνθήκες της θέσης που μελετάται	
Απόσταση από ενεργά ορυχεία (km)	>3.2	
Απόσταση από εγκαταλελειμμένα ορυχεία (km)	>1.6	
Γεωλογία - λιθολογία		Μη πορώδη και αδιάβροχα στρώματα
Υδρολογία	Προτιμώνται τα στρώματα χωρίς υδροφορέα.	Μη-πορώδη στρώματα <30%, αδιαπέραστα <5%, μέτρια εισροή ύδατος. Αποφεύγεται ο πόσιμος υδροφορέας και τα μεγάλα υδάτινα σώματα
Γεωτεχνικές ιδιότητες στρώσεων	Αντοχή των πετρωμάτων: Μονοαξονική δύναμη θλίψεως 50-250 MPa. Πυκνότητα μεγαλύτερη από 2000 kg / m <sup>3</sup>	Αποφύγετε υπερβολικά θρυματισμένα και ρηγματωμένα πετρώματα καθώς μπορεί να προκαλέσουν την εισροή ύδατος ή αερίου προϊόντος και τη διαρροή ρύπων

Διαθεσιμότητα υποδομής		Δρόμοι, ηλεκτρισμός και γραμμές μεταφοράς ενέργειας
------------------------	--	---

### 3.6.3 Μηχανικές διεργασίες UCG και αποθήκευσης CO<sub>2</sub>

#### 3.6.3.1 Τεχνικά θέματα των γεωτρήσεων για UCG και αποθήκευση CO<sub>2</sub>

Η αξιολόγηση προσβάσιμων δεδομένων από άλλα έργα UCG δίνει την ευκαιρία να προχωρήσουμε με τα πιο κατάλληλα σχέδια και να αξιολογήσουμε τις παραμέτρους που βασίζονται στα χαρακτηριστικά του άνθρακα και τον τύπο του οξειδωτικού. Η υπάρχουσα βιβλιογραφία μαζί με την ανάλυση της βάσης δεδομένων μπορούν να παράσχουν πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα του αερίου σύνθεσης, η οποία συχνά επηρεάζεται από παραμέτρους όπως η αρχική ποιότητα άνθρακα, η οξειδωτική σύνθεση, η πίεση έγχυσης και το βάθος του κοιτάσματος (πίεση δεξαμενής). Στον πίνακα 16, εμφανίζονται επιλεγμένες παράμετροι βάσης δεδομένων. Οι σχέσεις στο ενδιάμεσο σύστημα μεταξύ των προαναφερθέντων παραγόντων και των γεωλογικών δεδομένων που υπάρχουν μπορούν να συμβάλλουν στην εκτίμηση της σύνθεσης του αερίου σύνθεσης στην περιοχή στόχου.

**Πίνακας -16-«Παράμετροι βάσης δεδομένων από ολοκληρωμένα έργα UCG»**

Παράμετρος	Ελάχιστο	Μέγιστο
Μέσο βάθος στρώματος (m)	15	1200
Μέσο πάχος στρώματος (m)	0,75	18
Κλίση στρώματος (deg)	0	56
Απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων(m)	10	210
Γαιάνθρακας που αεριοποιήθηκε (t)	0,3	2.781.800
Έγχυση (kmole/h)	7	1223
Πίεση έγχυσης (kPa)	120	7500
Πίεση παραγωγής (kPa)	110	1000
Η πίεση του συστήματος (Kpa)	207	8000
Συνολική ποσότητα υγρού προϊόντος γαιάνθρακα (kmol / h)	22	4860
Θερμογόνος δύναμη του γαιάνθρακα επι ξηρού[Mj/m <sup>3</sup> (drySTP)]	2.57	12.17
Ανάκτηση αερίου (%)	43	110.30
Θερμογόνος δύναμη του αερίου σύνθεσης(Mj/m <sup>3</sup> )	2.8	14.60

Σήμερα μπορούν να πραγματοποιηθούν προσομοιώσεις που αφορούν δεξαμενές για αποθήκευση CO<sub>2</sub> σε κοιλάτητες μετά από χρήση UCG. Αυτές οι προσομοιώσεις θα πρέπει να εφαρμόζονται σε μη ισόθερμες ή σχεδόν ισόθερμες συνθήκες ή να επιτρέπουν ισοδύναμες προσαρμογές για την αντιμετώπιση των θερμικών επιδράσεων. Ένα άλλο χαρακτηριστικό αυτών των προσομοιώσεων είναι η δυνατότητα προσομοίωσης της προσρόφησης του άνθρακα CO<sub>2</sub> και της αεριοποίησης των υπολειμμάτων γαιάνθρακα λαμβάνοντας υπόψη και τα πετρώματα που περιβάλλονται.

Ορισμένα από τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται για την αποθήκευση CO<sub>2</sub>, σε μια πιθανή περιοχή UCG έχει να κάνει με το κατάλληλο βάθος, την ύπαρξη δεξαμενών και πετρωμάτων με επαρκές πορώδες και αναλογίες διαπερατότητας σε κάθε περίπτωση. Περαιτέρω δεδομένα σχετίζονται με την τεκτονική παραμόρφωση καθώς και με την ικανότητα παγίδευσης (114).

Στις στρώσεις γαιάνθρακα και τα παρακείμενα πετρώματα, οι κατευθυνόμενες γεωτρήσεις είναι μια τεχνολογία που ασχολείται με τις συγκεκριμένες τεχνικές προκλήσεις που συχνά εντοπίζονται στην ανάκτηση των συμβατικών υδρογονανθράκων. Αυτά είναι:

- Οι στρώσεις γαιάνθρακα είναι πιο αδύναμες σε σύγκριση με τους στρωματογραφικούς σχηματισμούς όπου υπάρχουν αποθέματα πετρελαίου και φυσικού αερίου. Έτσι, η μηχανική σταθερότητα των οπών μέσα στην στρώση γαιάνθρακα είναι μια ανησυχία. Λόγω του ότι ο γαιάνθρακας είναι ιδιαίτερα εύθρυπτος, έχει δυσκολίες κατά τη διάτρηση. Ωστόσο, είναι μια γρήγορη διαδικασία σε σύγκριση με την διάνοιξη γεωτρήσεων σε ιδιαίτερα συνεκτικά πετρώματα.
- Στις περισσότερες των περιπτώσεων, η λιθολογία του κοιτάσματος είναι παχύτερη από τους ορίζοντες του γαιάνθρακα. Λόγω της έντονα όλκιμης και εύθρυπτης παραμόρφωσης αυτές οι στρώσεις γαιάνθρακα είναι δύσκολο να ακολουθηθούν κατά πλάτος.
- Σε μια λεπτή στρώση, η ακρίβεια της διάτρησης πρέπει να είναι σε υψηλότερο επίπεδο από ό, τι στα περισσότερα έργα υδρογονανθράκων. Από την άλλη πλευρά όμως τα λειτουργικά βάθη και πιέσεις είναι συχνά πιο ρηχά.
- Οι ορίζοντες γαιάνθρακα εμφανίζουν δικτύου ρωγμών που τα καθιστά ευαίσθητα στην απόφραξη από το τσιμέντο ή την λάσπη που χρησιμοποιείται στην διάτρηση.
- Μετά την εφαρμογή της UCG, είναι πιθανό ότι ο εξοπλισμός του περιβλήματος της γεώτρησης εκτίθεται σε ένα έντονα χημικό και θερμικό περιβάλλον.

Σε ένα τέτοιο έργο, απαιτούνται τουλάχιστον δύο γεωτρήσεις –μια παραγωγής και μία έγχυσης για ένα τμήμα του κοιτάσματος γαιάνθρακα. Η ακριβής διάταξη αποτελείται από έναν αριθμό διακλαδισμένων γεωτρήσεων έγχυσης τα οποία διασταυρώνονται με μια πιο απομακρυσμένη γεώτρηση παραγωγής. Στην περίπτωση έγχυσης CO<sub>2</sub>, θα χρησιμοποιηθεί μόνο το κάθετο μέρος των γεωτρήσεων επειδή το οριζόντιο τμήμα δεν είναι απαραίτητο ενόψει της ανάπτυξης της κοιλότητας και η χαμηλή διαπερατότητα θα είναι ήσσονος σημασίας.

Η περίοδος λειτουργίας μιας γεώτρησης διπλής χρήσης κατά τη διάρκεια των εργασιών UCG-CCS είναι γενικά βραχεία (2-5 έτη). Ωστόσο, η απόδοση των υλικών πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για κάθε στάδιο. Ο σχεδιασμός των γεωτρήσεων πρέπει να βασίζεται σε παραμέτρους όπως οι

ρυθμοί έγχυσης και η πίεση, ο κορεσμός των υγρών στην κοιλότητα του UCG καθώς και η γεωχημεία, ο όγκος, το ιζώδες και το περιεχόμενο του CO<sub>2</sub>. Οι συγκεκριμένες παράμετροι που εμφανίζονται στον Πίνακα 17 πρέπει να μελετηθούν ως βάση για την εκτεταμένη προετοιμασία της φάσης αποθήκευσης CO<sub>2</sub>. Το τελικό κλείσιμο της γεώτρησης ακολουθεί τους γενικούς κανόνες που εφαρμόζονται σε όλες τις γεωλογικούς θέσεις αποθήκευσης CO<sub>2</sub>.

Η UCG και η αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα είναι δύο τεχνολογίες που έχουν περάσει από μακροχρόνιες έρευνες και εξαντλητικές δοκιμές, ακόμη και σε ορισμένες περιπτώσεις έχουν εφαρμοστεί για βιομηχανικούς σκοπούς. Ωστόσο, δεν υπάρχει κάποιο μέρος στο οποίο οι δύο αυτές τεχνολογίες να έχουν συνδυαστεί. Ανεξαρτήτως του γεγονότος ότι τα έργα UCG σε μεγάλο βάθος είναι ασυνήθιστα, οι σπάνιες αλλά πολύτιμες πληροφορίες από αυτά βοήθησαν στον εντοπισμό και την αξιολόγηση τεχνικών ανησυχιών σχετικά με τις διαδικασίες αποθήκευσης UCG και CO<sub>2</sub>.

Για την αποθήκευση του CO<sub>2</sub> απαιτείται ελάχιστο βάθος 1000 μέτρων, ώστε να καταστεί δυνατή η ασφαλής αποθήκευση σε μια πυκνή φάση. Έτσι, απαιτούνται βαθιές εγκαταστάσεις αεριοποίησης οι οποίες στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπάρχουν. Σε αυτά τα βάθη, ο κίνδυνος μόλυνσης των υπόγειων υδάτων είναι σχετικά υψηλός, ακολουθούμενος από αυξημένο κόστος ανάπτυξης και λειτουργίας.

**Πίνακας 17** «Παράμετροι σχεδιασμού γεωτρήσεων»

Παράμετρος	Τιμή	Σχόλια
Τύπος υγρού στην κοιλότητα UCG	Νερό, CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> σε υπερκρίσιμη κατάσταση
Σχεδιασμός διάρκειας ζωής της γεώτρησης	Σχεδόν 10 χρόνια	1-3 χρόνια UCG και έως 1 έτος έγχυση CO <sub>2</sub>
Σχεδιασμός ρυθμού έγχυσης	1 kg/s	Με βάση το γενικό σχεδιασμό του UCG
Θερμοκρασία στο κάτω μέρος της γεώτρησης	Περίπου 100 ° C μετά την ψύξη από την ολοκλήρωση της UCG	Ο χρόνος της διεργασίας ψύξης οδηγεί στη διάλυση των μολυσματικών ουσιών αυξάνοντας τον κίνδυνο της διάβρωσης της γεώτρησης
Ανώτερη πίεση στην γεώτρηση	Περίπου 170-220 bar στα βαθιά τμήματα του κοιτάσματος	Η απώλεια της σταθερότητας και συγκρότησης της γεώτρησης πρέπει να αποφευχθεί στη ζώνη έγχυσης με την μη υπέρβαση ενός συγκεκριμένου ορίου πίεσης
Καθαρότητα CO <sub>2</sub>	95-99.8 wt%	
Διάβρωση H <sub>2</sub> S και άλλες επιρροές	Να μην ξεπερνάει τα όρια NACE	

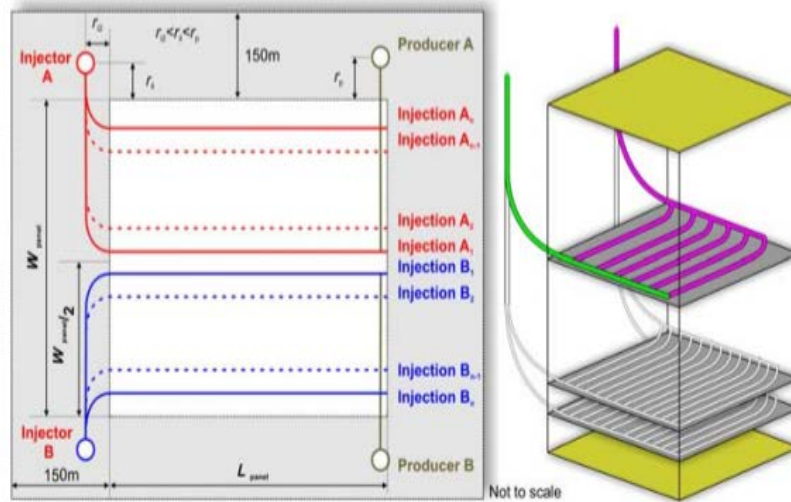
### 3.6.3.2 Σχεδιασμός γεωτρήσεων για UCG και η προσαρμογή για έγχυση και αποθήκευση CO<sub>2</sub>

Ο σχεδιασμός και η λειτουργία της γεωτρήσεως τόσο για την UCG όσο και για το έργο αποθήκευσης CO<sub>2</sub> περιλαμβάνει ένα πρόγραμμα συνεργασίας και ανάπτυξης για τον τρόπο έγχυσης του CO<sub>2</sub>. Οι γενικές και ειδικές παράμετροι αντιστοιχούν στις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής λαμβάνοντας υπόψη τις απαραίτητες ρυθμιστικές απαιτήσεις. Το πρόγραμμα συνεργασίας και ανάπτυξης πρέπει να εξετάζει τις εφαρμόσιμες τεχνολογίες παρακολούθησης, τις αντίστοιχες εμπειρίες που μπορούν να αντληθούν μέσω ενεργών έργων και την αναθεώρηση προηγούμενων έργων τόσο στις τεχνολογίες UCG όσο και στις τεχνολογίες CCS.

Η βασική διάταξη του τμήματος γεώτρησης περιλαμβάνει ένα κατακόρυφο τμήμα το οποίο καταλήγει μέχρι το αρχικό σημείο της οριζόντιας απόκλισης σε μια κάθετη και μια οριζόντια απόσταση από το προβλεπόμενο σημείο εισόδου στο κοιτάσμα. Η τελική διάμετρος της γεωτρήσεως έγχυσης εξαρτάται από τον αποδεκτό σχεδιασμό UCG, ακολουθούμενη από λεπτομερή εκτίμηση του κόστους των ιδιοτήτων του κοιτάσματος και των δαπανών για μεταβλητές διαμέτρους διάτρησης και των αντίστοιχων αντλιών .

Όσον αφορά την γεώτρηση έγχυσης, αυτή θα πρέπει να διανοιχθεί μέσα και κατά μήκος του στρώματος γαιάνθρακα, ενώ η γεώτρηση παραγωγής πρέπει να διανοιχθεί κάθετα, έτσι ώστε το φρεάτιο παραγωγής να ακολουθεί την πορεία της απομακρυσμένης γεώτρησης έγχυσης. Το προτεινόμενο κύκλωμα (Εικ 46) δείχνει τις γεωτρήσεις έγχυσης με κόκκινο και μοβ, με τις θέσεις των γεωτρήσεων του κατακόρυφου τμήματος να βρίσκονται στις δύο γωνίες των γαιανθρακικών πάνελ αεριοποίησης.

Λίγα τμήματα μέσα στο στρώμα γαιάνθρακα διανοίγονται από μια μόνο κατακόρυφη γεώτρηση, έτσι, απαιτείται μόνο ένας περιορισμένος αριθμός κατακόρυφων γεωτρήσεων. Αφού επιτευχθεί η κατακόρυφη διάτρηση, οι γεωτρήσεις έγχυσης θα πρέπει να φτάνουν από την επιφάνεια μέχρι την κορυφή του τμήματος που θα αρχίσει η εφαρμογή της αεριοποίησης. Η γεώτρηση παραγωγής αναμένεται να διανοιχθεί μετά τη διακλαδισμένη γεώτρηση έγχυσης και θα φτάσει μέχρι την κορυφή του τμήματος προς αεριοποίηση.



**Εικ 46** Σχεδιασμός γεωτρήσεων για UCG και η προσαρμογή για έγχυση και αποθήκευση CO<sub>2</sub> [132]

Όταν ο αντιδραστήρας UCG κλείνει, ξεκινούν οι διαδικασίες απενεργοποίησης. Στόχος είναι να εξασφαλιστεί ότι τα τοξικά παραπροϊόντα της UCG δεν θα διαρρεύσουν και, συνεπώς, οι υδροφόροι ορίζοντες γλυκού νερού θα προστατεύονται επαρκώς. Η διακοπή του αντιδραστήρα UCG πραγματοποιείται σε τρία βασικά στάδια (114). Η έγχυση του οξειδωτικού μειώνεται και τελικά διακόπτεται. Η διαδικασία ψύξης μπορεί να ενισχυθεί με έγχυση νερού στην κοιλότητα (μετατρέπεται και πάλι σε ατμό κάτω από το έδαφος). Στο δεύτερο στάδιο η αεριοποίηση αδρανοποιείται τελικά συγχρόνως στα αντίστοιχα φρεάτια. Στο τέλος, αντλείται το νερό από τον αδρανοποιημένο αντιδραστήρα UCG. Η επανάληψη αυτής της διαδικασίας μπορεί να λάβει χώρα μέχρις ότου η συγκέντρωση των διαλυτών στοιχείων να μειωθεί σε χαμηλά ποσοστά. Σε περίπτωση χαμηλής υδατο-διαπερατότητας της κοιλότητας UCG, η διαδικασία καθαρισμού μπορεί να επιτευχθεί με την ανακυκλοφορία του νερού διαμέσου του κλειστού αντιδραστήρα προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως διαλύτης για τοξίνες. Μετά το τέλος της διαδικασίας της UCG και τον καθαρισμό, η ποιότητα των υδάτων παρακολουθείται. Τα εθνικά πρότυπα της περιοχής που λαμβάνει χώρα η UCG είναι εκείνα που καθορίζουν περαιτέρω επεξεργασία στην επιφάνεια. Η ακολουθούμενη πλήρωση του χώρου με CO<sub>2</sub>, για αποθήκευση σε θέσεις UCG, απαιτεί την συνεχή παρακολούθηση της κοιλότητας, της γεώτρησης και του αποθηκευτικού χώρου, λαμβάνοντας πάντοτε υπόψη τις τοπικές γεωλογικές συνθήκες.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### 4.1 Προσδιορισμός των νομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών απαιτήσεων που συνδέονται με τις αρχές για τη βιώσιμη ανάπτυξη

Η υπόγεια αεριοποίηση γαιάνθρακα (UCG) όπως έχει αναφερθεί και σε παραπάνω κεφάλαια είναι μια διαδικασία βασισμένη στην εξόρυξη και μετατροπή του γαιάνθρακα σε *in situ* συνθήκες, με την οποία δημιουργείται το αέριο σύνθεσης (syngas), το οποίο μπορεί να μεταποιηθεί για να παράσχει πρώτες ύλες για την παραγωγή ηλεκτρισμού, υγρών καυσίμων για κινητήρες ντίζελ και αεριοθούμενα, υδρογόνο, λιπάσματα και χημικά προϊόντα [115,116].

Αυτή η τεχνολογία προσφέρει πολλά οικονομικά και κοινωνικά οφέλη σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους εξόρυξης. Τα τελευταία χρόνια, όλο και περισσότερα ενδιαφερόμενα μέρη έχουν αρχίσει να αντιλαμβάνονται την τεχνολογία UCG ως ασφαλή και οικονομική πηγή ενέργειας στις περισσότερες χώρες που παράγουν γαιάνθρακα. Οι χώρες αυτές διαθέτουν τώρα εκτεταμένα προγράμματα που καλύπτουν μελέτες για το κατά πόσο είναι δυνατό να εφαρμοστεί, τον σχεδιασμό και την υλοποίηση έργων εγκατάστασης και επίδειξης σε βιομηχανική κλίμακα [117].

Η υπόγεια αεριοποίηση γαιάνθρακα είναι μια διαδικασία που μπορεί να διεξαχθεί σύμφωνα με τις αρχές της αειφόρου ανάπτυξης (Principles of Sustainable Development - PSD). Το PSD περιλαμβάνει ανταγωνιστικότητα σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους ανάκτηση ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, η οποία συνίσταται σε αποδοτική χρήση των διαθέσιμων πόρων, μειωμένες αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον (μείωση του διοξειδίου του γαιάνθρακα, των σωματιδίων, των οξειδίων του θείου και των οξειδίων του αζώτου που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της αεριοποίησης γαιάνθρακα, έλλειψη αποβλήτων εξόρυξης στην επιφάνεια και μετασχηματισμός της επιφάνειας της γης). Όπως και στην περίπτωση κάθε διεργασίας που αφορά την γεωλογία, τις γεωλογικές και τις υδρογεωλογικές συνθήκες, η υφιστάμενη απειλή πρέπει να διαχειρίζεται αποτελεσματικά [118].

Οι ενέργειες αυτές πρέπει να οδηγήσουν στη βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης των εργαζομένων όσον αφορά την ασφάλεια και στην τοπική κοινότητα. Η επίδραση της τεχνολογίας της υπόγεια αεριοποίησης γαιάνθρακα στο περιβάλλον θα πρέπει να αναλυθεί αρχίζοντας από το στάδιο του σχεδιασμού, λαμβάνοντας υπόψη τις γεωλογικές και εξορυκτικές συνθήκες, δια μέσου των σταδίων της μεθόδου, και το σημαντικότερο, πρέπει να περατωθεί μέχρι την ολοκλήρωση της λειτουργίας και των δραστηριοτήτων αποκατάστασης του φυσικού γεω-αντιδραστηρίου που δημιουργείται [119].

Η πρόσβαση στα δεδομένα σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διαδικασίας UCG είναι περιορισμένη, ιδίως στην έρευνα του γαιάνθρακα που βρίσκεται σε σημαντικά βάθη. Τα πιο εκτεταμένα περιβαλλοντικά δεδομένα προέρχονται από τη δεκαετία του 1970 και του 1980 τα οποία διεξήχθησαν στις ΗΠΑ και σχετίζονται με την έρευνα για ρηγά στρώματα γαιάνθρακα (<200m). Η ευρωπαϊκή έρευνα για τους βαθιά εναποτιθέμενους άνθρακες (> 500 m), όσον αφορά τις επιπτώσεις του έργου στο περιβάλλον, είναι περιορισμένη.

Επί του παρόντος, τα έργα δοκιμών πραγματοποιούνται σε διάφορα μέρη του κόσμου, αλλά δεν υπάρχουν ακόμη εγκαταστάσεις σε εμπορική κλίμακα.

Στο πλαίσιο των ορυχείων υψηλότερου κινδύνου και της τρέχουσας τεχνολογίας, η παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα εξακολουθεί να είναι μια ελκυστική μέθοδος [120]. Η διαδικασία της αεριοποίησης γαιάνθρακα επί τόπου είναι κεφαλαιώδους σημασίας, ιδίως στις αναδυόμενες αγορές, οι οποίες βρίσκονται στη διαδικασία κατασκευής μονάδων παραγωγής ενέργειας από γαιάνθρακα μεγάλης κλίμακας και λόγω της ασφάλειας εφοδιασμού με αέριο τόσο για οικιακή όσο και για βιομηχανική χρήση [119].

## 4.2 SWOT Ανάλυση - Ελπίδες και δυνητικοί κίνδυνοι για την απόληψη του καυσίμου από την υπόγεια αεριοποίηση του γαιάνθρακα

Ένα βασικό στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση για την αξιολόγηση της δυνατότητας υλοποίησης της επένδυσης σε εμπορική κλίμακα είναι η ανάλυση SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Risks). Είναι ένα κοινώς γνωστό εργαλείο που επιτρέπει την ανάλυση και τον εντοπισμό των πλεονεκτημάτων και των αδυναμιών της τεχνολογίας UCG σε σχέση με την παραδοσιακή εξόρυξη γαιάνθρακα, καθώς και τις υπάρχουσες και πιθανές ευκαιρίες και τους κινδύνους που συνδέονται με το εξωτερικό περιβάλλον [118,121,122,123,124]. Παρακάτω στους ακόλουθους πίνακες φαίνονται τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα, οι δυνατότητες και οι κίνδυνοι της εφαρμογής της μεθόδου UCG.

**Πίνακας 18** Πλεονεκτήματα μεθόδου UCG

A/A	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΔΥΝΑΤΑ ΣΗΜΕΙΑ
1	Μεγάλοι γεωλογικοί πόροι, προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες γεωλογικές και εξορυκτικές συνθήκες, επιλεκτική εξόρυξη
2	Μηχανοποίηση τεχνικών λειτουργιών, αυτοματοποίηση και τηλεχειρισμός της διαδικασίας
3	Παροχή αερίου σύνθεσης στην επιφάνεια μετά την επεξεργασία
4	Αποτελεσματικές μεθόδους παρακολούθησης και περιορισμού των φυσικών κινδύνων
5	Ελάχιστο μερίδιο κόστους στο κόστος εξόρυξης για τις προπαρασκευαστικές εργασίες σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες γαιάνθρακα
6	Μειωμένο λειτουργικό κόστος και κεφαλαιουχικές δαπάνες
7	Μειωμένη αλλοίωση της επιφάνειας και υποβάθμιση
8	Απόβλητα που παράγονται κατά τη μετατροπή γαιάνθρακα που έχει εναποτεθεί κάτω από το έδαφος (τέφρα)
9	Χαμηλότερη κατανάλωση ακατέργαστου νερού
10	Ανάπτυξη της περιοχής, την αύξηση του αριθμού των νέων επενδύσεων και των συμπληρωματικών κονδυλίων που λαμβάνονται από τις τοπικές αρχές



11	Επέκταση των απαραίτητων γνώσεων, κατάρτιση, αύξηση της απασχόλησης, βελτίωση του πλούτου της τοπικής κοινότητας
12	Υψηλότερο επίπεδο προσόντων και βιοτικού επιπέδου των ανθρακωρύχων χάρη στην καινοτόμο τεχνολογία
13	Αυξημένη ασφάλεια των ανθρακωρύχων εξαιτίας της έλλειψης υπόγειων εργασιών
14	Μειωμένη ρύπανση του περιβάλλοντος, κυρίως λόγω της μείωσης των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και σκόνης, δηλ. SOx, NOx, υδράργυρος, θείο, CO <sub>2</sub>
15	Μειωμένο ποσοστό της συνολικής ρύπανσης που δημιουργείται, βελτίωση της υγείας των κατοίκων.

**Πίνακας 19** Μειονεκτήματα μεθόδου UCG

A/A	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΑΔΥΝΑΜΙΕΣ
1	Διαδικασία αεριοποίησης σε συγκεκριμένες γεωλογικές και εξορυκτικές συνθήκες
2	Περιορισμένος αριθμός στρωμάτων γαιάνθρακα που πληρούν τα γεωλογικά και υδρολογικά κριτήρια
3	Η διαδικασία δεν μπορεί να ελεγχθεί με τον ίδιο τρόπο όπως στην περίπτωση της επιφανειακής αεριοποίησης
4	Δεν είναι δυνατόν να ληφθεί αέριο με σταθερές παραμέτρους
5	Το λαμβανόμενο αέριο έχει χαμηλή θερμογόνο δύναμη
6	Πιθανή δημιουργία ανεξέλεγκτων κοιλοτήτων σε αεριοποιημένα κοιτάσματα
7	Πολυπλοκότητα της τεχνολογίας
8	Πιθανή αύξηση της τοπικής κυκλοφορίας, του θορύβου
9	Πιθανοί τοπικοί περιορισμοί της πρόσβασης στο νερό.

**Πίνακας 20** Δυνατότητες μεθόδου UCG

A/A	ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ-ΕΥΚΑΙΡΙΕΣ
1	Αυξημένη σταθερότητα και ενεργειακή ασφάλεια της χώρας
2	Υποσχόμενη μέθοδος παραγωγής ενέργειας
3	Χρήση τεχνολογίας σε εμπορική κλίμακα
4	Η έρευνα στον τομέα της τεχνολογίας θα ενισχύσει σημαντικά την ανάπτυξή της
5	Δοκιμές νέων τεχνολογικών λύσεων που αναπτύσσονται σε ερευνητικές μονάδες
6	Τα προϊόντα αεριοποίησης που λαμβάνονται ως εναλλακτική λύση στις τρέχουσες πηγές ενέργειας
7	Συνδυασμένη διαδικασία αεριοποίησης και παραγωγή χημικών προϊόντων κατά τη μετατροπή του γαιάνθρακα (υδρογόνο, μεθάνολη και υγρά καύσιμα)
8	Επέκταση της εξαγωγής του συνθετικού αερίου

**Πίνακας 21** Κίνδυνοι μεθόδου UCG

A/A	ΚΙΝΔΥΝΟΙ-ΡΙΣΚΟ
1	Θέματα με την ασφάλεια της όλης διαδικασίας
2	Αρνητικές επιπτώσεις στις Θέματα με την ασφάλεια της όλης διαδικασίας ιδιότητες και τη δομή των πετρωμάτων που περιβάλλουν την περιοχή του γεω-αντιδραστήρα
3	Τους κινδύνους για το περιβάλλον που δημιουργούνται από τις καταστάσεις έκτακτης ανάγκης
4	Πιθανές αέριες και υγρές μολύνσεις που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας
5	Ενδεχόμενη μόλυνση των υπόγειων υδάτων με ουσίες υψηλής τοξικότητας
6	Δυνατοί κραδασμοί και δονήσεις που οδηγούν στο σχηματισμό ρωγμών και παραμορφώσεων της επιφάνειας
7	Πιθανοί κίνδυνοι πυρκαγιάς και έκρηξης
8	Πιθανός κίνδυνος ρύπανσης του ατμοσφαιρικού αέρα
9	Έλλειψη χρηματοδότησης για την έρευνα και τα πιλοτικά σχέδια
10	Αλλαγές στους κανόνες της ΕΕ για την πολιτική αναφορικά με το κλίμα
11	Έλλειψη μακροπρόθεσμης, σταθερής ενεργειακής πολιτικής
12	Αυξημένη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας των παραδοσιακών μεθόδων εξόρυξης
13	Αλλαγές στην αγορά ενέργειας, ιδίως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Ο σωστός προσδιορισμός των ισχυρών και αδύναμων χαρακτηριστικών της διαδικασίας UCG και η αναγνώριση των απειλών και ευκαιριών για την τεχνολογία αυτή επιτρέπει τον ακριβή σχεδιασμό της αναπτυξιακής στρατηγικής της επένδυσης. Η ανάλυση SWOT οδηγεί δυναμικά στον εντοπισμό των αλλαγών στην περιοχή και στη χρήση όλων των διαθέσιμων πηγών πληροφοριών. Σε αυτή τη βάση, είναι δυνατόν να διατυπώσουμε προβλέψεις και σχέδια για μελλοντικές επενδύσεις.

### **4.3 Πλεονεκτήματα της τεχνολογίας UCG σε σύγκριση με την παραδοσιακή εξόρυξη γαιάνθρακα**

Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας UCG είναι ότι:

- περιλαμβάνει γεωλογικούς πόρους που εκτιμώνται ότι θα προσφέρουν περαιτέρω εκμετάλλευση για πάνω από εκατό χρόνια
- την πιθανή χρήση αποθεμάτων που δεν καλύπτονται σήμερα από τις συμβατικές μεθόδους
- την πρόσβαση σε λεπτές κοιλότητες γαιάνθρακα, σε μεγάλα βάθη με μεγάλο βαθμό κλίσης και που χαρακτηρίζονται από διαταραχές υψηλής πυκνότητας .

Από οικονομικής απόψεως, η αεριοποίηση του γαιάνθρακα σε in situ συνθήκες μειώνει το λειτουργικό κόστος και τις κεφαλαιουχικές δαπάνες εξαιτίας του γεγονότος ότι η διαδικασία

αεριοποίησης δεν εκτελείται στην επιφάνεια. Τα προκύπτοντα προϊόντα αεριοποίησης αποτελούν εναλλακτική λύση στις σημερινές πηγές ενέργειας.

Όσον αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διαδικασίας, επιτρέπει τη μείωση της επιφανειακής καθίζησης και του μετασχηματισμού της μορφολογίας του εδάφους σε σύγκριση με τα συμβατικά ορυχεία. Επίσης στις θετικές πτυχές περιλαμβάνονται το γεγονός ότι τα απόβλητα που παράγονται κατά τη μετατροπή του γαιάνθρακα εναποτίθεται υπό το έδαφος, η έλλειψη ανάγκης για την αποθήκευση αποβλήτων στην επιφάνεια, η μείωση της ποσότητας ρύπανσης που παράγεται, δηλαδή του SO<sub>x</sub>, του NO<sub>x</sub>, του υδραργύρου, του θείου και η μείωση του γαιάνθρακα σε περιπτώσεις αεριοποίησης σε συνδυασμό με τεχνολογίες δέσμευσης CO<sub>2</sub>. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η μικρότερη κατανάλωση ακατέργαστου νερού σε σύγκριση με την συμβατική εξόρυξη γαιάνθρακα καθώς ένα μέρος του νερού (ως συμπύκνωμα) μπορεί να απομονωθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί για ψύξη.

Από την άποψη των κοινωνικών πτυχών, η τεχνολογία UCG μειώνει τον κίνδυνο απειλών για την υγεία και την ασφάλεια του προσωπικού, ιδιαίτερα εξασφαλίζοντας άνεση λόγω της μηχανοποίησης των τεχνικών λειτουργιών, οδηγώντας σε αυτοματοποίηση και τηλεχειρισμό της διαδικασίας. Η διαδικασία επιτρέπει τη διεξαγωγή της αεριοποίησης χωρίς τη συμμετοχή εργαζομένων υπόγεια, γεγονός που ευνοεί την εξάλειψη των ατυχημάτων εξορύξεως που οδηγούν σε θανάτους και αναπηρίες, τη μείωση της σκληρής υπόγειας εργασίας, το χαμηλότερο ποσοστό ασθενειών που οδηγούν σε συντομότερη ζωή των ανθρακωρύχων και την έλλειψη της απαίτησης να εργάζονται σε δυνητικά επικίνδυνες περιοχές σε σύγκριση με τη συμβατική παραγωγή. Επιπλέον, η ανάπτυξη αυτής της νέας τεχνολογίας μπορεί να αυξήσει τα προσόντα και το βιοτικό επίπεδο των ανθρακωρύχων χάρη στους υψηλούς μισθούς και τα επιδόματα, να δημιουργήσει μια ελίτ ομάδα εργαζομένων, τεχνικών και χειριστών που εργάζονται για εξόρυξη και μαζική επεξεργασία γαιάνθρακα σε υδρογόνο ή άλλα προϊόντα.

#### **4.4 Μειονεκτήματα της τεχνολογίας UCG σε σύγκριση με την παραδοσιακή εξόρυξη γαιάνθρακα**

Η διαδικασία μπορεί να είναι τεχνικά εφικτή για πολλά αποθέματα γαιάνθρακα, αλλά ο πραγματικός αριθμός στρωμάτων γαιάνθρακα που πληρούν τα γεωλογικά και υδρολογικά κριτήρια μπορεί να είναι πολύ πιο περιορισμένος. Η διαδικασία δεν μπορεί να ελεγχθεί με τον ίδιο τρόπο όπως και στην περίπτωση της επιφανειακής αεριοποίησης. Οι μεταβλητές της διεργασίας, δηλαδή η ταχύτητα εισροής νερού, η κατανομή των αντιδραστηρίων στη ζώνη αεριοποίησης και η ανάπτυξη κοιλοτήτων, μπορούν να εκτιμηθούν μόνο με τη μέτρηση της θερμοκρασίας, της ποσότητας και της ποιότητας του παραγόμενου αερίου. Η διαδικασία είναι εγγενώς ασταθής, καθώς είναι αδύνατο να ληφθεί αέριο με σταθερές παραμέτρους με αποτέλεσμα τόσο η ροή όσο και η θερμογόνος δύναμη να αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου.

## **4.5 Δυνατότητες της τεχνολογίας UCG σε σύγκριση με την παραδοσιακή εξόρυξη γαιάνθρακα**

Από οικονομικής άποψης, η διαδικασία θα αυξήσει την ενεργειακή ασφάλεια της εκάστοτε χώρας, θα μειώσει τις εισαγωγές ενέργειας και θα εξασφαλίσει ανεξαρτησία σε περίπτωση διακοπής της παροχής ενέργειας. Η συνδυασμένη διαδικασία αεριοποίησης και η παραγωγή χημικών προϊόντων κατά τη μετατροπή του γαιάνθρακα (υδρογόνο, μεθάνολη και υγρά καύσιμα) μπορεί να προσφέρει ευεργετικά αποτελέσματα χάρη στις τελικές τιμές των προϊόντων που παράγονται.

Μια άλλη θετική πτυχή θα είναι το χαμηλότερο ενεργειακό κόστος λόγω της διαφοροποίησης των πηγών ενέργειας και της υπονόμησης της θέσης των μεγάλων προμηθευτών, της ανεξαρτησίας του κόστους απόκτησης και της επεξεργασίας ενέργειας σε σύγκριση με τους συμβατικούς προμηθευτές ενέργειας, της χρήσης της ενέργειας που περιέχεται στον γαιάνθρακα και των μειωμένων οικονομικών δαπανών με την εξόρυξη και μεταφορά γαιάνθρακα.

## **4.6 Κίνδυνοι της τεχνολογίας UCG σε σύγκριση με την παραδοσιακή εξόρυξη γαιάνθρακα**

Η μεγαλύτερη απειλή στην τεχνολογία UCG συνδέεται με την ασφάλεια της όλης διαδικασίας. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχηματίζονται αέριοι και υγροί ρύποι οι οποίοι είναι προϊόντα της διαδικασίας αεριοποίησης και πυρόλυσης στην κοιλότητα που σχηματίζεται. Επίσης προκαλείται μεταβολή, κατά τη διάρκεια αλλά και κατόπιν της διαδικασίας της αεριοποίησης, στις παραμέτρους της χημείας, του pH, της δομής και των ιδιοτήτων της περιβάλλουσας γεωλογικής τοποθεσίας καθώς η θερμοκρασία στην περιοχή του αεριοποιητή υπερβαίνει τους 1200 ° C.

Επιπλέον, οι απειλές για το περιβάλλον περιλαμβάνουν τις καταστάσεις έκτακτης ανάγκης και τις ανεξέλεγκτες καταστάσεις, δηλαδή διαρροή αερίων στο περιβάλλον, απειλή με μόλυνση από υδρόθειο και μεθάνιο, πυρκαγιές, εκρήξεις αερίων και πετρωμάτων, εκρήξεις σκόνης γαιάνθρακα (υπόγεια και επιφανειακά), κίνδυνοι από την ακτινοβολία, κίνδυνος δονήσεων και επιβάρυνσης των πετρωμάτων που προκαλούν ρωγμές και παραμορφώσεις στην επιφάνεια.

Άλλα πιθανά ζητήματα είναι η μόλυνση των υπόγειων υδάτων με ουσίες υψηλής τοξικότητας, ο σχηματισμός οργανικών ακαθαρσιών (π.χ. φαινόλες, PAH, BTEX) και ανόργανων (π.χ. αμμωνία, άζωτο, κυανίδια, βαρέα μέταλλα) και η ανάμιξη και διάλυση αερίων στο νερό π.χ. υδρόθειο, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα. Μια άλλη απειλή είναι η πιθανότητα ατμοσφαιρικής ρύπανσης (NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, CO, σωματίδια ιπτάμενης τέφρας και βαρέα μέταλλα) και η εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου (CO<sub>2</sub> και CH<sub>4</sub>). Ο κίνδυνος καθίζησης του υπερκείμενου στρώματος γης μπορεί να δημιουργήσει νέα οδό για τη μετακίνηση ρύπων.

Από οικονομική και κοινωνική άποψη, η έλλειψη μακροπρόθεσμης και σταθερής ενεργειακής πολιτικής, η κλιματική πολιτική της ΕΕ, η έλλειψη χρηματοδότησης για την έρευνα και τα πιλοτικά έργα και η έλλειψη αποδοχής από την κοινωνία μπορούν να εμποδίσουν γενικά την περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας.

## **4.7 Αποτελέσματα ανάλυσης SWOT**

### **4.7.1 Σχέσεις μεταξύ των πλεονεκτημάτων και των δυνατοτήτων**

Οι κινητήριες δυνάμεις που εντοπίζονται στην βάση της ανάλυσης της σχέσης μεταξύ των πλεονεκτημάτων και των δυνατοτήτων, και που επηρεάζουν την πιθανή χρήση των δυνατοτήτων περιλαμβάνουν :

- τη χρήση αποθεμάτων εκτός ισολογισμού που μπορούν να αυξήσουν την ενεργειακή ασφάλεια της χώρας
- τη συνδυασμένη διαδικασία αεριοποίησης και την παραγωγή χημικών προϊόντων κατά τη μετατροπή γαιάνθρακα (υδρογόνο, μεθανόλη και υγρά καύσιμα)
- Την μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου για την τήρηση των σημερινών και μελλοντικών ευρωπαϊκών κανονισμών.

### **4.7.2 Σχέσεις μεταξύ των πλεονεκτημάτων και των κινδύνων**

Η μελέτη της σχέσης μεταξύ των πλεονεκτημάτων και των κινδύνων έχει βοηθήσει στον εντοπισμό των κινητήριων δυνάμεων που επιτρέπουν τη μείωση των επιπτώσεων των κινδύνων της μεθόδου. Περιλαμβάνουν τη μηχανοποίηση των τεχνικών λειτουργιών, την αυτοματοποίηση και τον απομακρυσμένο έλεγχο της διαδικασίας, καθώς και την αποτελεσματική παρακολούθηση και τον περιορισμό των φυσικών κινδύνων που συμβαίνουν.

### **4.7.3 Σχέσεις μεταξύ των μειονεκτημάτων και των ευκαιριών**

Η μελέτη της σχέσης μεταξύ των μειονεκτημάτων και των ευκαιριών η οποία αποτελεί σοβαρό λόγο για τον οποίο δεν υπάρχει ανάπτυξη της μεθόδου UCG, περιλαμβάνει:

- Τον περιορισμένο αριθμό κοιτασμάτων γαιάνθρακα που πληρούν τα κριτήρια των γεωλογικών και των υδρολογικών συνθηκών και
- Την έλλειψη πλήρους ελέγχου της μεθόδου στην ίδια έκταση όπως στην περίπτωση της επιφανειακής αεριοποίησης.

### **4.7.4 Σχέσεις μεταξύ των αδυναμιών και των κινδύνων**

Η μελέτη της σχέσης αδυναμιών και κινδύνων επιτρέπει τον εντοπισμό των μέσων που οδηγούν τις αδυναμίες στην εμφάνιση της αρνητικής επίδραση των κινδύνων. Αυτές περιλαμβάνουν την περιβαλλοντική απειλή που δημιουργείται από τις καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, οι οποίες δυνητικά μπορούν να προκαλέσουν μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα και του περιβάλλοντος γενικότερα, και επίσης την ενδεχόμενη καθίζηση της επιφανείας.

Οι περισσότεροι από τους παραπάνω κινδύνους μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με κατάλληλη επιλογή τοποθεσίας, ακριβή μοντελοποίηση της διαδικασίας, συνεχή παρακολούθηση και έλεγχο κατά τη διάρκεια και μετά τη διαδικασία αεριοποίησης, ακολουθώντας τις συστάσεις και τις διαδικασίες σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης (π.χ. με τη χρήση αντιδραστικών φραγμάτων). Επιπλέον, η χρήση κατάλληλων μεθόδων καθαρισμού των καυσαερίων, η άντληση του νερού της επεξεργασίας και ο καθαρισμός του στην επιφάνεια θα επιτρέψουν την επίτευξη υψηλού επιπέδου ασφάλειας της εργασίας και τη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον. Επίσης η εφαρμογή των μεθόδων CCS θα επιτρέψει τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα.

Τα απόβλητα και τα λύματα που παράγονται κατά τη διαδικασία πρέπει να συλλέγονται προσεκτικά, να μεταφέρονται, να αποθηκεύονται, να υποβάλλονται σε επεξεργασία και να απορρίπτονται, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι επιπτώσεις στην υγεία και το περιβάλλον. Το ακατέργαστο αέριο σύνθεσης από την αεριοποίηση του γαιάνθρακα περιέχει μια σειρά από τοξικές ουσίες όπως θείο, υδροχλώριο, κυανιούχο υδρογόνο, αμμωνία, τέφρα και ιχνοστοιχεία όπως ο υδράργυρος, το αρσενικό και το σελήνιο. Πριν από τη μετατροπή του αερίου σύνθεσης σε υγρό καύσιμο, το συνθετικό υπόγειο αέριο θα πρέπει υποβληθεί σε περαιτέρω χημική επεξεργασία προκειμένου να απομακρυνθούν οι τοξικές ουσίες.

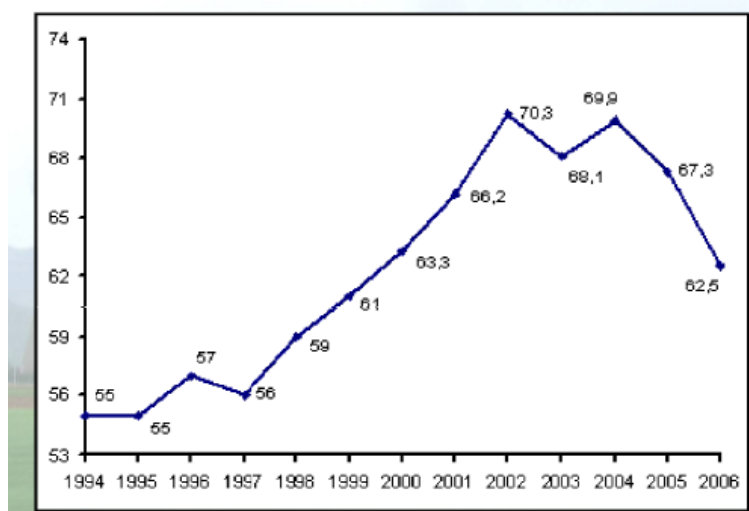
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### 5.1 Λιγνιτικά αποθέματα στην Ελλάδα

Η πρώτη σοβαρή προσπάθεια για την εκμετάλλευση λιγνιτικών κοιτασμάτων στη χώρα μας άρχισε στο Αλιβέρι (Εύβοια) το 1873. Δυστυχώς μια φοβερή πλημμύρα το 1897 κατέστρεψε όλες τις επιφανειακές και υπόγειες εγκαταστάσεις εξόρυξης. Η εκμετάλλευση ξανάρχισε μετά τον πρώτο Παγκόσμιο πόλεμο. Το 1922 η ετήσια παραγωγή έφθασε τους 23.000 τόνους και διατηρήθηκε μέχρι το 1927. Το επόμενο έτος η εκμετάλλευση σταμάτησε για οικονομικούς λόγους. Μετά το δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο η ανάγκη εξηλεκτισμού της χώρας οδήγησε στην απόφαση κατασκευής ατμοηλεκτρικού σταθμού στο Αλιβέρι, που θα λειτουργούσε αποκλειστικά με λιγνίτη.

Το 1951 ανέλαβε η ΔΕΗ την υπόγεια εκμετάλλευση των Ορυχείων στο Αλιβέρι, κατορθώνοντας να αυξήσει την παραγωγή σε 750 χιλιάδες τόνους το χρόνο και να τροφοδοτήσει μονάδες συνολικής ισχύος 230 MW. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 σταμάτησε η λειτουργία του λιγνιτωρυχείου Αλιβερίου.

Οι πρώτες συστηματικές έρευνες για την εντόπιση και αξιολόγηση των λιγνιτών της ευρύτερης περιοχής Πτολεμαΐδας άρχισαν μετά το 1938. Το 1955 συστάθηκε η εταιρία ΛΙΠΤΟΛ που είχε ως αντικείμενο την εκμετάλλευση του λιγνίτη και την χρησιμοποίησή του για παραγωγή μπρικετών, αζωτούχων λιπασμάτων, ημικώκ και ηλεκτρικής ενέργειας. Το 1959 το 90% των μετοχών της ΛΙΠΤΟΛ περιήλθαν στη ΔΕΗ. Το 1975 συγχωνεύθηκε η ΛΙΠΤΟΛ στη ΔΕΗ. Η παραγωγή λιγνίτη που ήταν το 1959 1,3 εκ. τόνους, αυξήθηκε το 1975 σε 11,7 εκ. τόνους, το 1985 σε 27,3 εκ. τόνους και το 2006 σε 49 εκ. τόνους (συμπεριλαμβανομένου και του ορυχείου στη Φλώρινα). Το λιγνιτικό κοιτάσμα Μεγαλόπολης μελετήθηκε επιστημονικά για πρώτη φορά το 1957 και τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά. Το 1969 άρχισε από τη ΔΕΗ η εκμετάλλευση του λιγνίτη. Το γεγονός αυτό ήταν μία ιδιαίτερη περίπτωση σε παγκόσμιο επίπεδο, επειδή για πρώτη φορά τόσο φτωχός λιγνίτης εξορύσσεται και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το λιγνιτωρυχείο Μεγαλόπολης ξεκίνησε με μία ετήσια παραγωγή 1 εκ. τόνους και έφθασε το 2006 τους 13,5 εκ. τόνους. Σήμερα η ΔΕΗ παράγει συνολικά περίπου 63 εκ. τόνους λιγνίτη σε ετήσια βάση. Η εντυπωσιακή ανάπτυξη των Λιγνιτωρυχείων της ΔΕΗ επιτρέπει στη χώρα μας να κατέχει τη δεύτερη θέση στην παραγωγή λιγνίτη στην Ευρωπαϊκή Ένωση, και την πέμπτη στον Κόσμο.



**Εικ 47** Παραγωγή λιγνίτη στην Ελλάδα (σε εκατομμύρια τόνους) μέχρι το 2006 [133]

Τα συνολικά βεβαιωμένα γεωλογικά αποθέματα λιγνίτη στη χώρα ανέρχονται σε περίπου 5 δις. τόνους. Τα κοιτάσματα αυτά παρουσιάζουν αξιοσημείωτη γεωγραφική εξάπλωση στον ελληνικό χώρο. Με τα σημερινά τεχνικο-οικονομικά δεδομένα τα κοιτάσματα που είναι κατάλληλα για ενεργειακή εκμετάλλευση, ανέρχονται σε περίπου 3,2 δις τόνους και ισοδυναμούν με 450 εκ. τόνους πετρελαίου. Τα κυριότερα εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα λιγνίτη βρίσκονται στις περιοχές Πτολεμαΐδας, Αμυνταίου και Φλώρινας με υπολογισμένο απόθεμα 1,8 δις τόνους, στην περιοχή της Δράμας με απόθεμα 900 εκ. τόνους και στην περιοχή Ελασσόνας με 169 εκ. τόνους. Επίσης στην Πελοπόννησο, περιοχή Μεγαλόπολης, υπάρχει λιγνιτικό κοιτάσμα με απόθεμα περίπου 223 εκ. τόνους.



**Εικ. 48** Εξορυχθέντα και εναπομείναντα αποθέματα γαιάνθρακα στην Ελλάδα [133]



Με βάση τα συνολικά εκμεταλλεύσιμα αποθέματα λιγνίτη της χώρας και τον προγραμματιζόμενο ρυθμό κατανάλωσης στο μέλλον, υπολογίζεται ότι τα αποθέματα αυτά επαρκούν για περισσότερο από 45 χρόνια. Μέχρι σήμερα οι εξορυχθείσες ποσότητες λιγνίτη φτάνουν περίπου στο 29% των συνολικών αποθεμάτων. Εκτός από λιγνίτη η Ελλάδα διαθέτει και ένα μεγάλο κοιτάσμα Τύρφης στην περιοχή των Φιλίππων (Ανατολική Μακεδονία). Τα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα στο κοιτάσμα αυτό εκτιμώνται σε 4 δις κυβικά μέτρα και ισοδυναμούν περίπου με 125 εκατ. τόνους πετρελαίου. Γενικά, η ποιότητα των Ελληνικών λιγνιτών είναι χαμηλή. Η θερμογόνο δύναμη κυμαίνεται από 975 - 1380 kcal/kg στις περιοχές Μεγαλόπολης, Αμυνταίου και Δράμας, από 1261 - 1615 kcal/kg στην περιοχή Πτολεμαΐδας και 1927 - 2257 kcal/kg στις περιοχές Φλώρινας και Ελασσόνας. Σημαντικό συγκριτικό πλεονέκτημα των λιγνιτών της χώρας μας είναι η χαμηλή περιεκτικότητα σε καύσιμο θείο.

## **5.2 Προοπτικές για την εφαρμογή των μεθόδων UCG και CCS στα λιγνιτικά κοιτάσματα της Ελλάδας**

Το ΕΚΕΤΑ - Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης ήταν μέλος ενός έργου πολλών εταιρών που χρηματοδοτήθηκε από το RFCS (Research Fund for Coal and Steel) και διήρκεσε μεταξύ του 2010 και του 2012 (διάρκεια 30 μηνών). Το έργο συντονίστηκε από τη βουλγαρική εταιρεία Overgas Inc. σε συνεργασία με εννέα ευρωπαίους εταίρους. Περιείχε μελέτη για τη βαθιά υπόγεια αεριοποίηση γαιάνθρακα σε συνδυασμό με τη μόνιμη αποθήκευση του CO<sub>2</sub>. Ο κύριος στόχος ήταν να αξιολογηθεί το δυναμικό των βαθέων σχηματισμών γαιάνθρακα / λιγνίτη (βάθος > 1200 m) για την ανάπτυξη του UCG και να επιβεβαιωθεί ότι οι γεωτρήσεις UCG θα μπορούσαν, με τεχνικές τροποποιήσεις, να χρησιμοποιηθούν για την έγχυση και τη μόνιμη αποθήκευση CO<sub>2</sub>. Υπολογίστηκε ότι σε βάθος 1600 μέτρων, όλο το CO<sub>2</sub> που δημιουργείται κατά τη διάρκεια της αεριοποίησης θα μπορούσε να επανεμφανιστεί και να αποθηκευτεί σε υγρή μορφή. Οι εργασίες έγιναν μέσω οκτώ πακέτων εργασίας. Οι κύριοι στόχοι περιλάμβαναν:

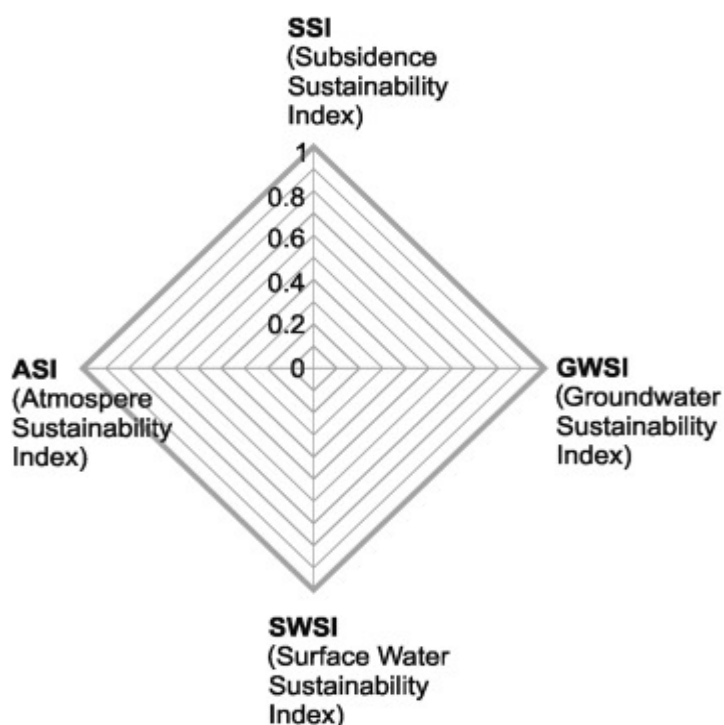
- Αξιολόγηση των δυνατοτήτων των καλυμμένων σχηματισμών γαιάνθρακα για UCG και αποθήκευση CO<sub>2</sub> μέσω της διερεύνησης παραγόντων που επηρέασαν την τεχνική και οικονομική βιωσιμότητα.
- Χρήση υπολογιστικών μοντέλων (γεωλογικά, γεωμηχανικά, υδρογεωλογικά και ανάπτυξη UCG κοιλοτήτων) για την αξιολόγηση του βαθμού σχηματισμού γαιάνθρακα / λιγνίτη ως πιθανών τρόπων
- Εκτίμηση των περιβαλλοντικών οφελών της αποθήκευσης UCG και CO<sub>2</sub> ως μέσου για την επίτευξη σχεδόν μηδενικών εκπομπών CO<sub>2</sub>.

Κύριος στόχος του έργου ήταν η εκμετάλλευση των κοιτασμάτων γαιάνθρακα της Βουλγαρίας στην περιοχή Dobrudza. Επίσης ήταν αποδεκτό ότι τα ληφθέντα στοιχεία θα μπορούσαν επίσης να εφαρμοστούν, για παράδειγμα, σε κατάλληλα αποθέματα λιγνίτη στην Ελλάδα. Η μεθοδολογία του Δείκτη Περιβαλλοντικής Σταθερότητας (ESI-Environmental Sustainability Index) εφαρμόστηκε στα βουλγαρικά κοιτάσματα γαιάνθρακα και στα αποθέματα λιγνίτη της Φλώρινας.

Το μοντέλο του Δείκτη Περιβαλλοντικής Σταθερότητας ESI είναι συνάρτηση τεσσάρων δεικτών:

- Δείκτης σταθερότητας για πιθανή Καθίζηση SSI (Subsidence Sustainability Index )
- Δείκτης σταθερότητας του Υπόγειου νερού GWSI (Groundwater Sustainability index)
- Δείκτης σταθερότητας των Επιφανειακών υδάτων SWSI ( Surface Water Sustainability Index)
- Δείκτης σταθερότητας για την Ατμόσφαιρα ASI ( Atmosphere Sustainability Index)

Ο υπολογισμός του μοντέλου ESI για την UCG/CCG πραγματοποιείται μέσω της ακόλουθης εξίσωσης:  $ESI=1/4(SSI+GWSI+SWSI+ASI)$  ενώ η γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων φαίνεται στην εικόνα 49



**Εικ.49** Γραφική αναπαράσταση του Δείκτη Περιβαλλοντικής Σταθερότητας ESI της UCG

Αποδεκτά ελάχιστα επίπεδα του ESI για την UCG και την αποθήκευση του CO<sub>2</sub> προτείνονται στον πίνακα 22. Οι τέσσερις περιβαλλοντικοί δείκτες (Καθίζηση, Υπόγειο νερό, Επιφανειακά ύδατα και Ατμόσφαιρα) ίσως παρουσιάζουν διακύμανση σε σχέση με τον χρόνο επομένως ο ESI θα παρουσιάζει επίσης διακύμανση στην UCG.

**Πίνακας 22** Αποδεκτά ελάχιστα επίπεδα του ESI για την UCG και την αποθήκευση του CO<sub>2</sub>

Επίπεδο Σταθερότητας	Χρώμα	Παράμετροι βασισμένες στο ESI <sub>UCG</sub>
Πολύ καλό	Πράσινο	ESI <sub>UCG</sub> = 1.00
Καλό	Λευκό-πράσινο	0.75 < ESI <sub>UCG</sub> ≤ 1.00
Μέτριο	Κίτρινο	0.50 < ESI <sub>UCG</sub> ≤ 0.75
Χαμηλό	Κόκκινο-πορτοκαλί	0.25 < ESI <sub>UCG</sub> ≤ 0.50
Πολύ χαμηλό	Κόκκινο	0.00 < ESI <sub>UCG</sub> ≤ 0.25

Επιβεβαιώθηκε ότι η ιδέα του ESI ήταν μια πρακτική επιλογή για εφαρμογή σε τέτοια αποθέματα και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της περιβαλλοντικής σκοπιμότητας της αποθήκευσης UCG και CO<sub>2</sub>

Άλλες μελέτες εξέτασαν τις δυνατότητες για UCG στις κοιτάσματα λιγνίτη Κοζάνης. Το ενδιαφέρον για την UCG συνεχίζεται μέσω ενός έργου με τίτλο Ενισχυμένη αξιοποίηση γαιάνθρακα μέσω αεριοποίησης υπόγειου γαιάνθρακα στα ευρωπαϊκά ορυχεία λιγνίτη (COAL2GAS). Αυτό συγχρηματοδοτείται από το RFCS. Η ΕΕ παρέχει 1,32 εκατ. Ευρώ από τον συνολικό προϋπολογισμό του έργου ύψους 2,21 εκατ. Ευρώ. Το έργο ξεκίνησε τον Ιούλιο του 2014 και θα ολοκληρωθεί μέχρι τον Ιούνιο του 2019. Η κοινοπραξία αποτελείται από μέλη της Ρουμανίας, της Πολωνίας, της Γερμανίας, του Βελγίου, των Κάτω Χωρών, της Σλοβενίας και της Ελλάδας. Το ΕΚΕΤΑ αντιπροσωπεύει την Ελλάδα. Ο γενικός στόχος είναι να αξιολογηθούν η δυνατότητες της UCG στα ρηγά λιγνιτικά στρώματα (από άποψη γεωλογίας, τεχνολογίας και περιβαλλοντικών επιπτώσεων) και να παρουσιαστεί αυτό για ένα επιλεγμένο ορυχείο στη Ρουμανία. Παρόλο που έχει αποδειχθεί η γενική σκοπιμότητα της αεριοποίησης αυτών των πόρων, δεν έχει ακόμη επιβεβαιωθεί εάν η τεχνολογία θα μπορούσε να εφαρμοστεί σύμφωνα με τα πρότυπα της ΕΕ (COAL2GAS, 2014). Ένα θετικό αποτέλεσμα θα μπορούσε να έχει σημαντικό ενδιαφέρον για πιθανή εφαρμογή στα ελληνικά λιγνιτικά αποθέματα.

### **5.3 Νόμοι και κανονισμοί σχετικά με την εξόρυξη γαιάνθρακα στην Ελλάδα γενικά**

Το 2010, περίπου 3900 Mt αποθέματα γαιάνθρακα ήταν διαθέσιμα στην Ελλάδα που αντιπροσωπεύει σχεδόν το 0,47% των συνολικών αποθεμάτων του κόσμου. Η Ελλάδα είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος παραγωγός στην ΕΕ και ο πέμπτος μεγαλύτερος παγκοσμίως σε λιγνίτη (καφέ γαιάνθρακας). Η εγχώρια παραγωγή λιγνίτη ήταν το 2010 55,96 εκατομμύρια τόνοι.

Το 2011, η συμβολή του λιγνίτη στο ενεργειακό μείγμα του διασυνδεδεμένου συστήματος της χώρας υπερέβη το 55%, ενώ η αντίστοιχη συμμετοχή σε ολόκληρη τη χώρα (συμπεριλαμβανομένων και των μη διασυνδεδεμένων νησιών) ήταν 49,5%, αποδεικνύοντας την κυριαρχία των αποθεμάτων λιγνίτη στην ενεργειακή σκηνή της χώρας .

Τα έργα πολλών εταιρών έχουν εξετάσει τη βαθιά υπόγεια αεριοποίηση γαιάνθρακα (UCG) σε συνδυασμό με τη μόνιμη αποθήκευση CO<sub>2</sub>. Ο κύριος στόχος ήταν να αξιολογηθεί το δυναμικό των στρωμάτων γαιάνθρακα / λιγνίτη σε μεγάλο βάθος (βάθος > 1200 m) για την ανάπτυξη του UCG και να επιβεβαιωθεί ότι οι γεωτρήσεις UCG θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την έγχυση και την αποθήκευση CO<sub>2</sub>. Η αξιολόγηση επικεντρώθηκε στα έργα αποθήκευσης γαιάνθρακα στο εξωτερικό, μολονότι θεωρήθηκε ότι τα δεδομένα που λαμβάνονται θα ισχύουν και για τα κατάλληλα αποθέματα λιγνίτη στην Ελλάδα. Άλλες μελέτες εξέτασαν τις δυνατότητες για UCG στα κοιτάσματα λιγνίτη της Κοζάνης.

Λόγω του ότι δεν υπάρχουν κατάλληλες συνθήκες και ορυχεία για την ανάπτυξη τεχνολογίας UCG στην Ελλάδα, δεν έχει αναπτυχθεί αυτή η μέθοδος σε αυτή τη χώρα. Συνεπώς, δεν υπάρχει τέτοια νομοθεσία που να διέπει τις δραστηριότητες της UCG στην Ελλάδα. Σε περίπτωση μελλοντικής ανάπτυξης του τομέα, θα πρέπει να ενσωματωθεί στον Κώδικα Μεταλλείων της χώρας η κατάλληλη νομοθεσία.

Η μεταλλευτική βιομηχανία της Ελλάδας ρυθμίζεται από τον Κώδικα Εξόρυξης, ο οποίος περιγράφει ορισμένους νόμους και κανονισμούς για την εκμετάλλευση βιομηχανικών ορυκτών και διακοσμητικών πετρωμάτων. Αυτός ο κώδικας τονίζει επίσης τον παράγοντα υγείας και ασφάλειας για διάφορες δραστηριότητες εξόρυξης και λατομείων. Τα ορυκτά δικαιώματα ανήκουν στο κράτος, πράγμα που σημαίνει ότι το δικαίωμα εκμετάλλευσης των ακόλουθων ορυκτών πόρων προορίζεται για το Ελληνικό Δημόσιο: υδρογονάνθρακες σε υγρή ή αέρια μορφή, στερεά ορυκτά καύσιμα (λιγνίτης, χλοοτάπητα κλπ.), Ραδιενεργά ορυκτά, γεωθερμικές πηγές, ορυκτών αλάτων, φυσικών οργανικών λιπασμάτων, ορυκτών πόρων κάτω από τα ελληνικά ύδατα (θάλασσα ή λίμνες) κλπ. (άρθρο 143 Κώδικας Μεταλλείων).

Η εξόρυξη της εξορυκτικής δραστηριότητας στην Ελλάδα ελέγχεται από τον «Κώδικα Μεταλλείων» (Νομοθετικό Διάταγμα 210/1973 όπως τροποποιήθηκε από το Ν. 274/1976) και από σειρά Νόμων και Διατάξεων για τεχνικά και διαδικαστικά ζητήματα, όπως:

(α) Νόμος 669/1977, για την εκμετάλλευση διακοσμητικών πετρωμάτων και βιομηχανικών ορυκτών,

(β) Νόμος 1428/84, όπως τροποποιήθηκε από τον νόμο 2115/93, για την εκμετάλλευση των αδρανών υλικών,

(γ) Ο Κανονισμός για τις Δραστηριότητες Ορυχείων και Λατομείων (Κανονισμός Υγιεινής και Ασφάλειας Ορυχείων και Λατομείων) κλπ.

Τα παραπάνω έχουν θεσπίσει τις σημαντικότερες νομοθετικές διατάξεις για όλους τους σημαντικούς ορυκτούς πόρους και καλύπτουν όλες τις πτυχές της εξόρυξης, συμπεριλαμβανομένης της υγείας και της ασφάλειας, της διαχείρισης του νερού, των περιβαλλοντικών θεμάτων και των προκλήσεων της αειφόρου ανάπτυξης.

Το ολοκληρωμένο αυτό σύστημα ενισχύθηκε επανειλημμένα τα τελευταία 20 χρόνια με τη μεταφορά στην ελληνική εθνική νομοθεσία της νέας ευρωπαϊκής νομοθεσίας που σχετίζεται με θέματα περιβάλλοντος και υγείας και ασφάλειας των εξορυκτικών βιομηχανιών,

συμπεριλαμβανομένης της μεταφοράς της εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων της ΕΕ ) Οδηγίες 85/337 / ΕΚ και 97/11 / ΕΚ, οδηγία 92/43 / ΕΚ για τους οικοτόπους, οδηγία 2000/60 / ΕΚ για την οδηγία για τα ύδατα, οδηγία 2006/21 / ΕΚ για τα απόβλητα.

Τον Απρίλιο του 2015, ανακοινώθηκε από τον Γενικό Γραμματέα Ενεργειακών και Ορυκτών Πόρων του Υπουργείου Ανασυγκρότησης Παραγωγής, Περιβάλλοντος και Ενέργειας, η έλευση ενός νέου και ενημερωμένου Κώδικα Μεταλλείων, ο οποίος θα απλοποιήσει τις διαδικασίες.

Εκτός από τους Μεταλλευτικούς Κώδικες, υπάρχει και ο Κανονισμός Έργων Ορυχείων και Λατομείων που δημοσιεύθηκε το 2011 και καλύπτει τους κανονισμούς που αφορούν την ασφάλεια και την υγεία των εργαζομένων και των κατοίκων της περιοχής, την προστασία του περιβάλλοντος και τον σωστό τρόπο διεξαγωγής εξορυκτικών δραστηριοτήτων .

## 5.4 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία έγινε εκτεταμένη ανάπτυξη για την μέθοδο της υπόγειας αεριοποίησης του γαιάνθρακα και την θέση της σήμερα στην παγκόσμια βιομηχανία εξόρυξης γαιάνθρακα. Οι κύριες τεχνικές προκλήσεις που θέτει η διαδικασία προκύπτουν από τις συνθήκες υπό τις οποίες πραγματοποιείται η αεριοποίηση. Η διαδικασία, λόγω του μεταβλητού και δυσνόητου χαρακτήρα της, απαιτεί πλήρη έλεγχο. Επί του παρόντος, υπάρχουν κανόνες και μέθοδοι για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών κινδύνων.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία υποδηλώνουν την ανάγκη περαιτέρω ανάπτυξης της τεχνολογίας UCG. Το μέλλον της τεχνολογίας θα πρέπει να επικεντρώνεται στην αύξηση της κλίμακας των επενδύσεων και στη διεξαγωγή νέων ερευνητικών τομέων, τη δημιουργία ειδικευμένου εκπαιδευτικού προσωπικού για τη διεξαγωγή του ελέγχου της διαδικασίας και την κατάλληλη αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης. Η κατάλληλη χρήση του τεχνολογικού δυναμικού, η κατάλληλη επιλογή τοποθεσίας για επενδύσεις και η προστασία των ευαίσθητων χώρων από τυχόν αποτυχίες εγκατάστασης θα συμβάλουν στη μείωση των κινδύνων.

Η υπόγεια αεριοποίηση γαιάνθρακα μπορεί να είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος απόκτησης πρώτης ύλης για διάφορες εφαρμογές χάρη στο χαμηλότερο κόστος σε σύγκριση με την επιφανειακή αεριοποίηση. Επιπλέον, η ασφάλεια των εργαζομένων θα είναι υψηλότερη σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνικές εξόρυξης γαιάνθρακα, πρώτον επειδή ο αριθμός των εργαζομένων στο εργοστάσιο είναι ασύγκριτα μικρότερος και, δεύτερον επειδή οι εργαζόμενοι δεν μεταφέρονται στις περιοχές εξόρυξης όπως στις παραδοσιακές τεχνικές εξόρυξης. Ένα σημαντικό σημείο είναι η οικολογική πτυχή που συνδέεται επίσης με την απόθεση των αποβλήτων που παράγονται στη διαδικασία αεριοποίησης κάτω από το έδαφος, έναν τρόπο μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (δέσμευση CO<sub>2</sub>) και τη δυνατότητα αποθήκευσης άλλων αποβλήτων στις κοιλότητες.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Blinderman, M.S.; Anderson, B. Underground coal gasification for power generation: Efficiency and CO<sub>2</sub>-emissions. Proc. 12th International Conference on Coal Science, Cairns, Australia, November 2–6, 2003; Paper No. 13C1.
- [2] Friedmann, S.J. Carbon sequestration. Proc. 2006 Energy Symposium, Madison, WI, USA, 2006.
- [3] Case study B20 - Electricity production using underground coal gasification; Technical report, BHP Billiton: Newcastle, Australia, 2002.
- [4] Lindblom, S.R.; Smith, V.E. Rocky Mountain 1 Underground Coal Gasification Test, Hanna, Wyoming, Groundwater Evaluation; Technical Report DOE/MC/25038-36523, Western Research Institute, Laramie, WY, USA, 1993.
- [5] Siemens, C.W. On the regenerative gas furnace as applied to the manufacture of cast steel. J. Chem. Soc. 1868, 21, 279–310,
- [6] Walker L. Underground coal gasification: a clean coal technology ready for development. Australian Coal Rev. 1999;October.
- [7] Khadse A, Qayyumi M, Mahajani S, Aghalayam P. Underground coal gasification: a new clean coal utilization technique for india. Energy 2007;32:2061–71. doi: 10.1016/j.energy.2007.04.012.
- [8] Friedmann SJ, Upadhye R, Kong F-M. Prospects for underground coal gasification in carbon-constrained world. Energy Procedia 2009;1:4551–7. doi: 10.1016/j.egypro.2009.02.274.
- [9] Perkins G, Love G. Commercialisation of underground coal gasification. In "Chemeca 2010: engineering at the edge", 26-29 September 2010, Hilton Adelaide, South Australia, Australia 2010: 399–410.
- [10] Khadse AN. Resources and economic analyses of underground coal gasification in India. Fuel 2015;142:121–8. doi: 10.1016/j.fuel.2014.10.057.
- [11] Sajjad M, Rasul MG. Prospect of underground coal gasification in Bangladesh Procedia Eng 2015;105:537–48. doi: 10.1016/j.proeng.2015.05.087.
- [12] Shafirovich E, Varma A. Underground coal gasification: a brief review of current status. Ind Eng Chem Res 2009;48:7865–75. doi: 10.1021/ie801569r.
- [13] Khan MM, P J, Mmbaga, Shirazi AS, Trivedi J, Liu Q, et al. Modelling underground coal gasification - a review. Energies 2015;8:12603–68. doi: 10.3390/en8112331.
- [14] Couch RG. Underground coal gasification. Technical Report, CCC/151. London, UK: IEA Clean Coal Centre; 2009.
- [15] Yang L, Zhang X, Liu S, Yu L, Zhang W. Field test of large-scale hydrogen manufacturing from underground coal gasification (UCG). Int J Hydrogen Energy 2008;33:1275–85. doi: 10.1016/j.ijhydene.2007.12.055.

- [16] Bicer Y, Dincer I. Energy and exergy analyses of an integrated underground coal gasification with SOFC fuel cell system for multigeneration including hydrogen production. *Int J Hydrogen Energy* 2015;40(39):13323–37. doi: 10.1016/j.ijhy-dene.2015.08.023.
- [17] Prabu V, Jayanti S. Integration of underground coal gasification with a solid oxide fuel cell system for clean coal utilization. *Int J Hydrogen Energy* 2012;37:1677–88. doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.09.132.
- [18] Olness D, Gregg DW. The historical development of underground coal gasification. Technical Report, UCRL-52283. Berkeley, CA, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, University of California; 1977.
- [19] Kirichenko IP. First results of work in the field of underground gasification. *Ugol* 1934;101:90–101.
- [20] Klimenko AY. Early ideas in underground coal gasification and their evolution. *Energies* 2009;2:456–76. doi: 10.3390/en20200456.
- [21] Gregg DW, Hill RW, Olness DU. An overview of the Soviet Effort in underground coal gasification. Technical Report, UCRL-52004. Berkeley, CA, USA: Lawrence Livermore Laboratory, University of California; 1976.
- [22] Dossey JL. Underground coal gasification technology in the USSR. Technical Report, SAND 76-0380. CA: Sandia National Laboratories; 1976.
- [23] Gregg DW, Edgar TF. Underground coal gasification. *AIChE J* 1978;24(5): 753–81.
- [24] Report, UCID-19169. Berkeley, CA, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, University of California; 1981. Gregg DW. Relative merits of alternate linking techniques for underground coal gasification and their system design implications. Technical Report, UCRL-82112. Berkeley, CA, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, University of California; 1980.
- [25] Efremenko IV, Talyzin NN. Underground gasification of coal - new branch of socialist industry. Technical Report, UCRL-Trans-10873. Berkeley, CA: Lawrence Livermore Laboratory, University of California; 1940. Translated 1975 from *Podzemnaya gasifikatsiya uglei - novaya otrasl' sotsialisticheskoi promyshlennosti, v tret'em Pyatiletii*, 1940, pp 94–122.
- [26] Olness D. The Shatskaya underground coal gasification station. Technical Report, UCRL-53229. Berkeley, CA, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, University of California; 1981.
- [27] Blinderman M, Klimenko A. Theory of reverse combustion linking. *Combust Flame* 2007;150:232–45. doi: 10.1016/j.combustflame.2006.12.021.
- [28] Davis BE, Avasthi JM, Chane PY, Duerring NT, LaBerge GL. Underground coal gasification cavity definition study for Rawlins test 1. *In Situ* 1983;7(1):1–26.
- [29] Singleton AH, Noll WL, Allen JM. Summary report of the Rawlins Test 1 for gasification of steeply dipping coal beds. In: *Proceedings 6th annual underground coal gasification symposium*. U.S. Department of Energy, Morgantown, WV; 1980.

- [30] Cena RJ, Thorsness CB. Underground coal gasification database. Technical Report, UCID-19169. Berkeley, CA, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, University of California; 1981.
- [31] Hill RW, Shannon MJ. The controlled retracting injection point (CRIP) system: a modified stream method for in situ coal gasification. In: Proceedings seventh underground coal gasification symposium. U.S. Department of Energy, Morgantown, WV, USA; 1981.
- [32] Li Y, Liang X, Liang J. An overview of the Chinese UCG program. *Data Sci* 2007;6:460–6.
- [33] Beath A. Review of underground coal gasification. Technical Report, ET/IR-1087. Newcastle, Australia: CSIRO Energy Technology; 2009. Prepared for ACARP, project number C18007.
- [34] Liang J, Liu S, Yu L. Trial study on underground coal gasification of abandoned coal resource. *Mining Sci Technol* 1999: 271–4.
- [35] Wang GX, Wang ZT, Feng B, Rudolph V, Jiao JL. Semi-industrial tests on enhanced underground coal gasification at Zhong-Liang-Shan coal mine. *Asia-Pac J Chem Eng* 2009;4:771–9. doi: 10.1002/apj.337.
- [36] Olness D. The Angrenskaya underground coal gasification station. Technical Report, UCRL-53300. Berkeley, CA, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, University of California; 1982.
- [37] Oliver RL, Mason GM, Spackman LK. Field and laboratory results from the TONO i (CRIP) UCG cavity excavation project, WIDCO mine site, Centralia, Washington. *Fuel Sci Technol Int* 1989;7(8):1059–120.
- [38] Boysen JE, Canfield MT, Covell JR, Schmit CR. Detailed evaluation of process and environmental data from the Rocky Mountain I underground coal gasification field test. Technical Report, Report No. GRI-97/0331. Chicago, IL: Gas Research Institute; 1998.
- [39] Gibb A. The underground gasification of coal. London, UK: Sir Isaac Pitman & Sons Ltd; 1964.
- [40] Underground Gasification Europe. Underground coal gasification - first trial in the framework of a community collaboration: final summary report. Technical Report. Alcorisa, Teruel, Spain: Underground Gasification Europe (UGE); 1999.
- [41] Mocek P, Pieszczyk M, Swiadrowski J, Kapusta K, Wiatowski M, Stanczyk K. Pilot-scale underground coal gasification (UCG) experiment in an operating mine "Wieczorek" in Poland. *Energy* 2016;111:313–21. doi: 10.1016/j.energy.2016.05.087.
- [42] Walker LK, Blinderman MS, Brun K. An IGCC Project at Chinchilla, Australia Based on Underground Coal Gasification (UCG). 2001 gasification technologies conference, San Francisco, October 8-10; 2001.
- [43] Perkins G, du Toit E, Cochrane G, Bollaert G. Overview of underground coal gasification operations at Chinchilla, Australia. *Energy Sources Part A* 2016;38 (24):3639–46. doi: 10.1080/15567036.2016.1188184.



- [44] Mallett C. Carbon energy UCG projects update. In: Proceedings of the underground coal gasification association annual conference, London, UK; 2011.
- [45] Haines J, Mallett C. Carbon energy's bloodwood UCG pilot - panel 2 2011-2013. Underground coal gasification association conference, London, UK; 2013.
- [46] Swan Hills Synfuels. Swan hills in-situ coal gasification technology development. Technical Report, Calgary, AB, Canada; 2012. Prepared for Alberta Innovates - Energy and Environment Solutions.
- [47] Lan SS, Floyd FM. Analysis of Rocky Mountain I underground coal gasification test. Technical Report, GRI-90/0081. Chicago, IL, USA: Gas Research Institute;
- [48] Handbook of synfuels technology. In: Meyers RA, editor. New York: McGraw-Hill; 1984.
- [49] Cena RJ, Thorsness CB, Britten JA. Assessment of the CRIP process for underground coal gasification: the Rocky Mountain I test. In: Proceedings of AIChE summer national meeting, 22-24 August 1988, Denver, CO, USA; 1988. Technical Report UCRL-98929.
- [50] Britten JA, Thorsness CB. Modeling thermal and material interactions between a reacting char bed and a gasifying/spalling coal roof. In: Proceedings of eleventh annual underground coal gasification symposium. U.S. Department of Energy, Morgantown, WV, USA; 1985. p. 365-79. DOE/METC-85/6028.
- [51] Perkins G, Sahajwalla V. A numerical study of the effects of operating conditions and coal properties on cavity growth in underground coal gasification. *Energy Fuels* 2006;20(2):596-608. doi: 10.1021/ef050242q.
- [52] Agarwal AK, Zielinski RE, Seabaugh PW. Pricetown I data analysis. Thirteenth annual underground coal gasification symposium. U.S. Department of Energy; 1980.
- [53] Chandelle V, Letolle CJR, Mostade M, Pirard J-P, Somers Y. Underground coal gasification on the Thulin site: results of analysis from post-burn drillings. *Fuel* 1993;72(7):949-63.
- [54] Mallett CW. Environmental controls for underground coal gasification. *Proc IMechE Part A: J Power & Energy* 2017. doi: 10.1177/0957650917723733.
- [55] Thorsness CB, Hill RW, Britten JA. Execution and performance of the CRIP process during the Rocky Mountain I UCG field test. In: Bartke TC, Hill VL, editors. Fourteenth annual underground coal gasification symposium. Chicago, IL, USA: U.S. Dept. of Energy; 1988. DOE/METC-88/6097.
- [56] Green M. The European Trial of UCG in Deeper Coal. In: Proceedings underground coal gasification conference. London, UK: Underground Coal Gasification Partnership; 2008.
- [57] Dafaux A, Gaveau B, Letolle R, Mostade M, Noel M, Pirard J-P. Modelling of the underground coal gasification process at Thulin on the basis of thermodynamic equilibrium and isotopic measurements. *Fuel* 1990;69:625-38.

- [58] Beath A, Craig S, Littleboy A, Mark R, Mallett C. Underground coal gasification: evaluating environmental barriers. Technical Report, P2004/5. Brisbane, Australia: CSIRO Division of Exploration and Mining; 2004.
- [59] Creighton JR, Thorsness CB. Laboratory scale simulation of underground coal gasification: experiment and theory. Technical Report, UCRL-86473. Berkeley, CA, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, University of California; 1981.
- [60] Hill RW, Thorsness CB. Summary report on large block experiments in underground coal gasification, Tono Basin, Washington: Vol. 1. Experimental description and data analysis. Technical Report, UCRL-53305. Berkeley, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, University of California; 1982.
- [61] Hill SW, Thorsness CB. Large block experiments in underground coal gasification. Technical Report, UCRL-87611. Berkeley, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, University of California; 1983.
- [62] Hill RW, Thorsness CB, Cena RJ, Stephens DR. Results of the centralia underground coal gasification field test. In: Proceedings tenth annual underground coal gasification symposium. U.S. Department of Energy, Morgantown, WV; 1984.
- [63] Britten JA, Thorsness CB. A model for cavity growth and resource recovery during underground coal gasification. *In Situ* 1989;13(1):1–53.
- [64] Cena RJ, Britten JA, Thorsness CB. Resource recovery and cavity growth during the Rocky Mountain I field test. In: Proceedings fourteenth annual underground coal gasification symposium, DOE/METC-88/6097. U.S. Department of Energy, Morgantown, WV, USA; 1988. p. 200–12.
- [65] Perkins G, du Toit E, Koning B, Ulbrich A. Unconventional oil production from underground coal gasification and gas to liquids technologies. SPE unconventional resources conference and exhibition, Asia-Pacific, 11-13 November 2013, Brisbane, Australia; 2013. SPE Paper 167025.
- [66] Perkins G. Mathematical modelling of in situ combustion and gasification. *Proc IMechE Part A: J Power & Energy* 2017. doi: 10.1177/0957650917721595.
- [67] Brandl A., Doherty D.R.. Method of producing synthesis gas by the underground gasification of coal from a coal seam. 2013. US Patent 8,596,356 B2.
- [68] Drilling, Committee C. In situ heavy oil operations: an industry recommended practice (IRP) for the Canadian oil and gas industry IRP03. Technical Report. Calgary, Canada: Enform; 2012. Vol. 3.
- [69] Alberta Energy Regulator. Swan Hills synfuels ltd well blowout October 10, 2011. Technical Report, IR-2014225. Calgary, AB, Canada: Alberta Energy Regulator; 2014.
- [70] Derbin Y, Walker J, Wanatowski D, Marshall A. Soviet experience of underground coal gasification focusing on surface subsidence. *J Zhejiang Univ* 2015;16:839–50. doi: 10.1631/jzus.A1500013.

- [71] Advani SH, Lin YT, Shuck LZ. Thermal and structural response evaluation for underground coal gasification. SPE-AIME 51st annual fall technical conference and exhibition, 3-6 October 1977, New Orleans, LA, USA; 1977413–22. SPE Paper 6152.
- [72] Avasthi JM, Harloff GJ. Subsidence associated with single and multicavities for underground coal gasification. *J Energy Res Technol* 1982;104:99–104.
- [73] Aiman WR, Thorsness CB, Hill RW, Rozsa RB. The Hoe Creek II field experiment on underground coal gasification, preliminary results. Technical Report, UCRL- 80592. Berkeley, CA, USA: Lawrence Livermore Laboratory, University of California; 1978.
- [74] Hill RW, Cena RJ, Aiman WR, Stephens DR, Thorsness CB. Results from the Hoe Creek No. 3 underground coal gasification experiment. Technical Report, UCRL- 83757. Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, Berkeley, CA; 1980.
- [75] Chappell R, Mostade M. The El tremedal underground coal gasification field test in Spain - first trial at great depth and high pressure. In: Proceedings 15th annual Pittsburgh coal conference, Pittsburgh, PA, USA; 1998.
- [76] Liu S, Li J, Mei M, Dong D. Groundwater pollution from underground coal gasification. *China Univ Mining Tech* 2007;17(4):467–72.
- [77] Younger PL. Hydrogeological and geomechanical aspects of underground coal gasification and its direct coupling to carbon capture and storage. *Mine Water Environ* 2011;30:127–40. doi: 10.1007/s10230-011-0145-5.
- [78] Mead SW, Wang FT, Ganow HC, Stuermer DH, Stone R. Ground-water effects of underground coal gasification experiments in northeastern Wyoming. *SPE Jnl* 1979: 1–10. SPE Paper 8449.
- [79] Campbell JH, Wang FT, Mead SW, Busby JF. Groundwater quality near an underground coal gasification experiment. *J Hydrol* 1979;44:241–66.
- [80] Barbour FA, Covell JR. Rocky Mountain I underground coal gasification test Hanna, Wyoming: trace gas, product water, and particulate characterization for Rocky Mountain I UCG Project. Technical Report, WRI-89-R018. University Station, Laramie, WY, USA: Western Research Institute; 1988.
- [81] Boysen JE, Covell JR, Sullivan S. Rocky Mountain I underground coal gasification test Hanna, Wyoming: results from venting, flushing, and cooling of the Rocky Mountain I UCG cavities. Technical Report, WRI-90-R026. University Station, Laramie, WY, USA: Western Research Institute; 1990.
- [82] Lindblom SR, Covell JR. Rocky Mountain I underground coal gasification project: annual technical progress report. Technical Report, WRI-91-R010. University Station, Laramie, WY, USA: Western Research Institute; 1991.
- [83] Lindblom SR. Rocky Mountain I monitoring: FY 1991 summary report. Technical Report, WRI-91-R066. University Station, Laramie, WY, USA: Western Research Institute; 1991.

- [84] Lindblom SR. Rocky Mountain I underground coal gasification project: annual technical progress report. Technical Report, WRI-92-R014. University Station, Laramie, WY, USA: Western Research Institute; 1992.
- [85] Covell JR, Lindblom SR, Dennis DS, Boysen JE. Rocky Mountain I underground coal gasification test Hanna, Wyoming: Groundwater Restoration. Technical Report, WRI-91-R039. University Station, Laramie, WY, USA: Western Research Institute; 1992.
- [86] Mallett C. Gas and water interactions around the UCG reactor during operations at carbon energy's bloodwood UCG pilot, Australia. IEA clean coal centre 3rd UCG workshop, Brisbane, Australia; 2013.
- [87] Covell JR, Boysen JE, Evans JM, Schmit CR. Underground coal gasification: groundwater contamination can be prevented. International conference on pollution prevention: clean technologies and clean products, Washington DC, June 10-13, 1990. Washington, DC: Environmental Protection Agency; 1990. p. 73–85. EPA/600/9-90/039.
- [88] Kapusta K, Stanczyk K. Pollution of water during underground coal gasification of hard coal and lignite. *Fuel* 2011;90:1927–34. doi: 10.1016/j.fuel.2010.11.025.
- [89] Pankiewicz-Sperka M, Stanczyk K, A.Plaza G, Kwasniewska J, Nalecz-Jawecki G. Assessment of the chemical, microbiological and toxicological aspects of post-processing water from underground coal gasification. *Ecotoxicol Environ Saf* 2014;108:294–301. doi: 10.1016/j.ecoenv.2014.06.036.
- [90] Soukup K, Hejtmanek VA, Capek P, Stanczyk K, Solcova O. Modeling of contaminant migration through porous media after underground coal gasification in shallow coal seam. *Fuel Process Technol* 2015;140:188–97 [https://doi.org/ 10.1016/j.fuproc.2015.08.033](https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.08.033).
- [91] Strugala-Wilczek A, Stanczyk K. Comparison of metal elution from cavern residue after underground coal gasification and from ash obtained during coal combustion. *Fuel* 2015;158:733–43. doi: 10.1016/j.fuel.2015.06.009.
- [92] Strugala-Wilczek A, Stanczyk K. Leaching behaviour of metals from post-underground coal gasification cavity residues in water differing in mineralization. *Fuel* 2016;173:106–14. doi: 10.1016/j.fuel.2016.01.046.
- [93] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press; 2013.
- [94] Hyder Z, Ripepi NS, Karmis ME. A life cycle comparison of greenhouse emissions for power generation from coal mining and underground coal gasification. *Mitigat Adaption Strat Global Change* 2016;21:515–46. doi: 10.1007/s11027-014-9561-8.
- [95] Wibberly L, Cottrell A. Case study B20 - electricity production using underground coal gasification. Technical Report. Newcastle, Australia: BHP Billiton; 2002.
- [96] Doucet D, Perkins G, Ulbrich A, du Toit E. Power production from underground coal gasification. *Ener Sour Part A* 2016;38(24):3653–60. doi: 10.1080/15567036.2016.1188183.

- [97] Global CCS Institute. Boundary Dam Carbon Capture and Storage Project, 2017; [www.globalccsinstitute.com/projects/boundary-dam-carbon-capture-and-storage-project](http://www.globalccsinstitute.com/projects/boundary-dam-carbon-capture-and-storage-project).
- [98] Global CCS Institute. Petra Nova Carbon Capture Project, 2017; [www.globalccsinstitute.com/projects/petra-nova-carbon-capture-project](http://www.globalccsinstitute.com/projects/petra-nova-carbon-capture-project).
- [99] Global CCS Institute. Kemper County Energy Facility, 2017; [www.globalccsinstitute.com/projects/kemper-county-energy-facility](http://www.globalccsinstitute.com/projects/kemper-county-energy-facility).
- [100] Schiffrin DJ. The feasibility of in situ geological sequestration of supercritical carbon dioxide coupled to underground coal gasification. *Energy Environ Sci* 2015;8:2330–40. doi: 10.1039/c5ee01094b.
- [101] Self SJ, Reddy BV, Rosen MA. Review of underground coal gasification technologies and carbon capture. *Int J Energy Environ Eng* 2012;3. doi: 10.1186/2251-6832-3-16.
- [102] A.W Bhutto A.A Bazmi, G Zahedi, Underground coal gasification from fundamentals to applications, *Prog. Energy Combust. Sci* 39(1) (2013) 189-214.
- [103] D. Yang, N Koukouzas, M Green, Y. Sheng, Recent development on underground coal gasification and subsequent CO<sub>2</sub> storage *J. Energy Inst* 89 (4) (2016) 469-484
- [104] L. Chen, J. Hou, C. Chen, J. Xu. A back analysis of the temperature field in the combustion volume space during underground coal gasification. *Min Sci Technol. (China)* 21 (4) (2011) 581-585
- [105] D. Yang, V Sarhosis, Y. Sheng. Thermal – mechanical modelling around the cavities of underground coal gasification. *J energy Inst.* 87 (4) (2014) 321-329
- [106] L Chen, I. Hon, C. Chen, I. Ku. A back analysis of the temperature field in the combustion volume space during underground coal gasification, *Min. Sci. Technol. (China)* 21 (4)(2010) 381-583.
- [107] A. Khadce, M. Qayyumi, S.M. Mahajani, R Aghalayam Reactor model for Me underground coal gasification (UCG) channel, *Int. J. Chem. Rea., Eng.* 4 (2006) 437.
- [108] G. Perkins. V. Sahajwalla, Modelling of heat and mass transport phenomena and chemical reaction in underground coal gasification, *Chem. Eng. Des* 85 (2007) 329-343.
- [109] H. Nourozieh, M. Kariznovi, Z. Chen, I. Abedi, Simulation study of underground coal gasification in Athena reservoirs. geological structure and process model, *Energy Fuels* 24 (2010) 3540-359) Available from. [dx.doi.org/10.1021.13013020](http://dx.doi.org/10.1021.13013020).
- [110] M. Scifi Z. On. 01,;a Numerical simulation of underground coal gasification using the CRI method. *Chem. Eng. IN* (61(2011) 1528-1535.
- [111] M. Ioran, D. Kumar, N. Kum., A. Cjayymn, A. Sneed, M.S. 1..2 Environmental concerns of underground coal gasification, *Renew. Sustain. Energy Rev* 2014;1 31600-31610.
- [112] Vorobiev, O., Marie, I., Antoun, T., Friedman. 51. (2008). Geomechanical simulations related to UCG activities, in) Twenty-Fifth Annual International Pittsburgh Coal Conference, Paper 32-3, Pittsburgh, PA, USA.

- [113] Mallet, C. (2006). Managing Ground Deformation M UCG, Underground Coal Gasification Workshop, November 12-15, Kolkata,
- [114] Y. Sheng, A.D. Benderev, Bukolska, K. Imo-Imo Eshiet, C. Dinh: da Gama, T. Gorka, et al., Interdisciplinary studied on the technical and economic feasibility of deep underground coalgasification with CO<sub>2</sub> storage in Bulgaria, Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change 21 (4) (2016) 595-627.
- [115] Kapusta K. et al. Environmental aspects of a field-scale underground coal gasification trial in a shallow coal seam at the Experimental Mine Barbara in Poland. Fuel, vol. 113, November 2013, p. 202.
- [116] Kapusta K. and K. Stanczyk, Pollution of water during underground coal gasification of hard coal and lignite. Fuel, vol. 90, no. 5, 2011, p. 1933.
- [117] Wstępne studium wykonalności dla instalacji demonstracyjnej podziemnego zgazowania węgla. Opracowane w ramach Strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”, Zadanie 3 „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokosprawnej produkcji paliw i energii elektrycznej”. 2015 r.
- [118] Narodowy Program Foresight 2020. Część 3, Scenariusze rozwoju Polski do 2020 roku w Polu Badawczym „Zrównoważony Rozwój Polski” 2008
- [119] Tokarz A., Grabowski J., Nowak D., Podziemne zgazowanie węgla kamiennego - aspekty środowiskowe, zdrowotne, społeczne i ekonomiczne. Underground Coal Gasification - environmental, health, social and economic aspects. Przegląd Górniczy Nr 6 2016
- [120] Ziębik A., Liszka M., Technologie energetyczne dla województwa śląskiego - wyniki foresightu regionalnego, Energetyka – listopad 2008
- [121] Baron R., Ocena Zasadności Wdrożenia Procesu Podziemnego Zgazowania Węgla Przy Wykorzystaniu Analizy SWOT. Moderní matematické metody v in enýrství. Sborník z 20. Semináře, 2011
- [122] Czaplicka-Kolarz K., Scenariusze rozwoju technologicznego kompleksu paliwowo-energetycznego dla zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego kraju. Część 2 Scenariusze opracowane na podstawie foresightu energetycznego dla Polski na lata 2005-2030, GIG 2007
- [123] Program Rozwoju Technologii Województwa Śląskiego na lata 2010-2020. Program systemowego wspierania rozwoju technologii województwa śląskiego na lata 2010 – 2020. Załącznik nr 1 do Uchwały Nr 729/35/IV/2011 Zarządu Województwa Śląskiego z dnia 29 marca 2011 roku
- [124] Ziętera A. M., A SWOT Analysis of New Investments in Brown Coal Deposits in Poland. Finanse i Prawo Finansowe 2014, vol 3, s 93-104
- [125] BP statistical review 2018 <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-coal.pdf>
- [126] Coal Mining, Design and Methods of” ANDREW P. SCHISSLER The Pennsylvania State University University Park, Pennsylvania United States Encyclopedia of Energy, Volume 1. r 2004

- [127] Techniques in Underground Mining, Hamrin, Hans 2011  
([http://www.iloencyclopaedia.org/part-xi/mining-and-quarrying/item/597-techniques-in-underground-mining#MIN\\_fig13](http://www.iloencyclopaedia.org/part-xi/mining-and-quarrying/item/597-techniques-in-underground-mining#MIN_fig13))
- [128] Dr. Mark K. Larson  
<https://www.originlab.com/index.aspx?go=SOLUTIONS/CaseStudies&PID=2118>
- [129] Peabody Energy, Inc
- [130] Early Ideas in Underground Coal Gasification and Their Evolution Alexander Y. Klimenko  
School of Engineering, The University of Queensland, St. Lucia, QLD 4172, Australia
- [131] Underground coal gasification - Part I: Field demonstrations and process performance Greg Perkins Martin Parry Technology, Brisbane, 4001 Queensland, Australia (2017)
- [132] Low-rank Coals for Power Generation, Fuel and Chemical Production, (2017) Woodhead Publishing ISBN : 9780081009291
- [133] Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ, Στερεά καύσιμα και ο Ελληνικός λιγνίτης,[http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo874e/shmeiwseis/KOITASMATOLOGIA\\_AN8RAKWN.pdf](http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo874e/shmeiwseis/KOITASMATOLOGIA_AN8RAKWN.pdf)
- [134] World nuclear association, World Energy Needs and Nuclear Power (2018)