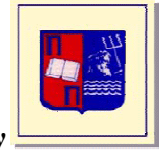


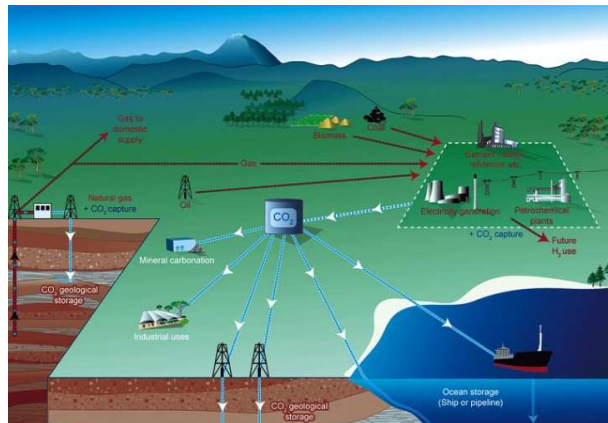


Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών  
Πανεπιστήμιο Πειραιώς, Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης & Τεχνολογίας



**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ»**

*Ειδίκευση: Συστήματα Διαχείρισης της Ενέργειας και Προστασίας Περιβάλλοντος*



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ CO<sub>2</sub> (CCS) ΚΑΙ  
ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ ΣΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΤΟΥ  
ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ (GHG): Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ**

**ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΟΡΔΑΡΗΣ**

**Επιβλέπων:**

**ΙΩΑΝΝΗΣ ΖΙΩΜΑΣ**  
**Καθ. Σχολής Χημ. Μηχ. Ε.Μ.Π.**

**ΑΘΗΝΑ 2012**

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ CO<sub>2</sub> (CCS) ΚΑΙ  
ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ ΣΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΤΟΥ  
ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ (GHG): Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ**

Η εργασία υποβάλλεται για την μερική κάλυψη των απαιτήσεων με στόχο  
την απόκτηση του διπλώματος

**Οργάνωση και Διοίκηση Βιομηχανικών Συστημάτων**

από

**ΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ ΚΑΙ ΤΟ ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΟΡΔΑΡΗΣ**

**Επιβλέπων :**

**ΙΩΑΝΝΗΣ ΖΙΩΜΑΣ**

Καθ. Σχολής Χημ. Μηχ. Ε.Μ.Π.

**Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας και Προστασίας Περιβάλλοντος**

**ΑΘΗΝΑ 2012**

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ CO<sub>2</sub> (CCS) ΚΑΙ  
ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ ΣΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΤΟΥ  
ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ (GHG): Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ**

Η εργασία υποβάλλεται για την μερική κάλυψη των απαιτήσεων με στόχο  
την απόκτηση του διπλώματος

**Οργάνωση και Διοίκηση Βιομηχανικών Συστημάτων**

από

**ΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ ΚΑΙ ΤΟ ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΟΡΔΑΡΗΣ**

**Τριμελής εξεταστική επιτροπή:**

**ΔΙΟΝΥΣΗΣ ΑΣΗΜΑΚΟΠΟΥΛΟΣ**

Καθηγητής Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

**ΕΛΕΝΗ ΓΡΗΓΟΡΟΠΟΥΛΟΥ**

Καθηγήτρια Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

**ΙΩΑΝΝΗΣ ΖΙΩΜΑΣ**

Καθηγητής Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

**Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας και Προστασίας Περιβάλλοντος**

**ΑΘΗΝΑ 2012**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της προοπτικής εφαρμογής των τεχνολογιών Δέσμευσης και Αποθήκευσης Διοξειδίου του Άνθρακα (CCS) στην ελληνική πραγματικότητα. Επίσης, διερευνώνται οι δυνατότητες συμβολής των τεχνολογιών CCS στις προσπάθειες μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου, παρουσιάζοντας και αναλύοντας τις σημαντικότερες ιδιαιτερότητες της χώρας.

Η συσχέτιση της κλιματικής αλλαγής με την ανθρωπογενή δραστηριότητα και τις αυξημένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) -κυρίως από την παραγωγή ενέργειας-, έχει οδηγήσει την παγκόσμια κοινότητα στην αναζήτηση τρόπων μείωσης τους.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται τα δεδομένα σχετικά με την κλιματική αλλαγή, τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και το παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι πολιτικές σε διεθνές, ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο οι οποίες στοχεύουν στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. Σε διεθνές επίπεδο γίνεται αναφορά στη Σύμβαση – Πλαίσιο του Ρίο, στο Πρωτόκολλο του Κιότο και στις διασκέψεις που ακολούθησαν και δεν είχαν μέχρι σήμερα το ζητούμενο αποτέλεσμα μιας δεσμευτικής συμφωνίας. Σχετικά με την ευρωπαϊκή πολιτική, αναπτύσσονται οι δεσμευτικοί στόχοι «20-20-20» για το 2020 και ο ευρωπαϊκός Ενεργειακός Χάρτης Πορείας για το 2050. Στο πλαίσιο της εθνικής πολιτικής παρουσιάζονται οι δεσμεύσεις της χώρας ως κράτος μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, καθώς και ο Οδικός Χάρτης του εθνικού ενεργειακού σχεδιασμού για το 2050.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διαθέσιμες τεχνικές αντιμετώπισης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα όπως, η επιλογή βελτίωσης της απόδοσης, η μείωση της περιεκτικότητας σε άνθρακα με εισαγωγή νέων πηγών ενέργειας ή με αντικατάσταση καυσίμου και η απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα με όλους τους δυνατούς τρόπους από τις μεγάλες πηγές εκπομπών του.

Όσον αφορά στην επιλογή της δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα, οι δυνατές προσεγγίσεις παρουσιάζονται στο τέταρτο κεφάλαιο και είναι οι εξής τρεις: η δέσμευση μετά από την πραγματοποίηση της καύσης από το παραγόμενο καυσαέριο, η δέσμευση πριν την καύση και η καύση σε αυξημένα επίπεδα οξυγόνου και ανακυκλοφορία μέρους του καυσαερίου. Από τις τρεις δυνατές προσεγγίσεις η σημαντικότερη είναι αυτή της δέσμευσης μετά την καύση. Στην κατηγορία αυτή συμπεριλαμβάνονται οι διεργασίες χημικής και

φυσικής απορρόφησης, οι διεργασίες προσρόφησης, η χρήση μεμβρανών, οι κρυογενικές διεργασίες και ο κύκλος  $\text{CaO}/\text{CaCO}_3$ .

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι επιλογές μεταφοράς και αποθήκευσης του δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα. Οι κυριότεροι μέθοδοι μεταφοράς είναι μέσω αγωγών και η μεταφορά με πλοία, με την πρώτη επιλογή να είναι οικονομικότερη. Οι σημαντικότερες επιλογές αποθήκευσης, αφορούν στη μακροχρόνια αποθήκευσή του σε γεωλογικούς σχηματισμούς. Σε αυτές συμπεριλαμβάνονται οι εξαντλημένες πηγές πετρελαίου και φυσικού αερίου, τα μη εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα άνθρακα και οι αλατούχοι υδροφόροι ορίζοντες. Οι ωκεανοί, αν και η χωρητικότητά τους είναι πολύ μεγάλη, δεν αποτελούν τη βέλτιστη επιλογή, τουλάχιστον προς το παρόν, αφού οι περιβαλλοντικές αβεβαιότητες είναι αρκετές.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται δεδομένα που αφορούν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην Ελλάδα, καθώς και την κατανομή τους μεταξύ της παραγωγής ενέργειας και της βιομηχανίας. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στην εξάρτηση της παραγωγής ενέργειας της χώρας από τα ορυκτά καύσιμα και ιδιαίτερα από το λιγνίτη. Επίσης, παρουσιάζονται πιθανοί χώροι αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα στην ελληνική επικράτεια και αναπτύσσονται σενάρια μελέτης του Ιδρύματος Οικονομικών και Βιομηχανικών Ερευνών (IOBE), σχετικά με τη δυνατότητα συνεισφοράς των τεχνολογιών CCS στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Στο έβδομο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα της εργασίας, καθώς και προτάσεις, ώστε η χώρα να πετύχει τους δεσμευτικούς στόχους που έχει αναλάβει μέχρι το 2020, αλλά και να βρεθεί καλύτερα προετοιμασμένη για την μετέπειτα εποχή.

## ABSTRACT

This master thesis aims to research the potential application of Carbon Capture and Storage (CCS) technology in Greece. The possible contribution of this novel technology is being investigated from the aspect of greenhouse gases emission reduction, presenting and analyzing the most important peculiarities of the country.

Climate change due to human activity and high greenhouse gases emissions-especially for energy production- leads the worldwide research community in alternative ways in an effort to reduce them.

In the first chapter of this thesis, all officially recorded data about climate change, gases emissions and worldwide energy issue are presented.

In the second chapter, the international, the european and the national policies that aim the mitigation of climate change problem are presented. Climate change convention in Rio, Kyoto protocol and other international conferences that followed -without having the asking result of a commitment-, are also reported. As far as it concerns the European policy, the binding targets «20-20-20» for the year 2020 and the European energy roadmap for the year 2050, are extensively referred. Finally in the level of a national policy, the commitments of Greece as a member of European Union and the national energy planning for the year 2050 are also presented.

In the third chapter the available technologies for carbon dioxide reduction are reported, specifically the following choices are reviewed: the increase of efficiency, the decrease of carbon content through the introduction of renewable energy sources or fuel substitution and the sequestration of carbon dioxide with all the currently available technologies from large point sources.

The current technologies for capturing carbon dioxide are reported in the fourth chapter and they are falling into three main categories: Post-combustion capture, Pre-combustion decarbonisation and firing the combustion process with oxygen and carbon dioxide recycle (Oxy-fuel combustion). From these options, the preferred one is the Post-combustion capture. There are a number of available technologies of Post-combustion capture processes, including physical and chemical absorption, adsorption processes, membrane separation, cryogenic separation and CaO/CaCO<sub>3</sub> cycle.

In the fifth chapter the choices of captured carbon dioxide transport and storage are reported. The main options of carbon dioxide transport are by pipelines and by ship. The first option is

more economically acceptable. The main option considered for the long term storage of carbon dioxide is underground geological formations, including depleted oil and gas reservoirs, unmineable coal formations and saline aquifers. Deep oceans represent large potential sink for carbon dioxide but environmental uncertainties are given.

In the sixth chapter, data which concern greenhouse gases emissions in Greece and their distribution from energy production and industry are presented. Special attention is paid in the dependence of energy production from fossil fuels and especially from lignite. Furthermore, potential sites of carbon dioxide storage in Greek territory, are presented and several scenarios of Foundation for Economic & Industrial Research (IOBE) about the potential of contribution of CCS technology in greenhouse gases emission reduction, are developed.

In the seventh chapter conclusions and prospects are referred in order Greece achieve the commitments until 2020 and to be better prepared for the future.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτήν την προσπάθεια συγγραφής επιστημονικού περιεχομένου μελέτης, στα πλαίσια των απαιτήσεων λήψης του μεταπτυχιακού διπλώματος «Οργάνωση και Διοίκηση Βιομηχανικών Συστημάτων», θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ιωάννη Ζιώμα που υπήρξε επιβλέπων, για την εμπιστοσύνη και την ευκαιρία που μου έδωσε αναθέτοντάς μου αυτή την εργασία.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη συνάδελφο Ρούλα Πολυδώρου για τη βοήθεια που μου προσέφερε.

Η Κάλια Βρέντζου συνέβαλλε ουσιαστικά με το παράδειγμά της και τις παραινέσεις της, στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας και την ευχαριστώ πολύ.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά τους γονείς μου Λάμπρο και Χριστίνα για την αμέριστη συμπαράσταση και στήριξή τους, στη μέχρι τώρα διαδρομή μου.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>III</b>
<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	<b>V</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....	<b>VI</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b> .....	<b>1</b>
<b>Εκπομπές GHG και Κλιματική Αλλαγή</b> .....	<b>1</b>
1.1 Εισαγωγή .....	1
1.2 Μεταβολές της θερμοκρασίας κατά το παρελθόν και η σημασία του CO <sub>2</sub> .....	2
1.3 Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.....	4
1.4 Ενεργειακό πρόβλημα.....	9
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b> .....	<b>13</b>
<b>Η πολιτική για την Κλιματική Αλλαγή</b> .....	<b>13</b>
2.1 Η Σύμβαση - Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών .....	13
2.2 Το Πρωτόκολλο του Κιότο .....	14
2.3 Η Συμφωνία της Κοπεγχάγης .....	16
2.4 Η Σύνοδος του Κανκούν.....	17
2.5 Η Σύνοδος Ντέρμπαν.....	18
2.6 Ευρωπαϊκή Πολιτική .....	18
2.6.1 Ευρωπαϊκός Ενεργειακός Χάρτης Πορείας για το 2050 .....	20
2.6.2 Οδηγία 2009/31/ΕΚ «αποθήκευση CO <sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς» .....	22
2.7 Εθνική Πολιτική .....	27
2.7.1 Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός: Οδικός Χάρτης για το 2050 .....	29
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b> .....	<b>32</b>
<b>Δυνατότητες Περιορισμού των Εκπομπών CO<sub>2</sub></b> .....	<b>32</b>
3.1 Εισαγωγή .....	32
3.2 Βελτίωση απόδοσης.....	34
3.3 Αντικατάσταση καυσίμου.....	36
3.4 Ενίσχυση των φυσικών δεξαμενών .....	38
3.5 Δέσμευση των εκπομπών CO <sub>2</sub> .....	39
3.6 Πηγές για δέσμευση CO <sub>2</sub> .....	41
3.6.1 Σταθμοί παραγωγής ενέργειας .....	42
3.6.2 Άλλες μεγάλες πηγές εκπομπών CO <sub>2</sub> .....	44
3.6.3 Διασπαρμένες εκπομπές CO <sub>2</sub> .....	46

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b> .....	<b>47</b>
<b>Τεχνολογίες Δέσμευσης CO<sub>2</sub></b> .....	<b>47</b>
4.1 Εισαγωγή .....	47
4.2 Διαχωρισμός CO <sub>2</sub> από το καυσαέριο (Post-Combustion) .....	49
4.2.1 Απορρόφηση CO <sub>2</sub> .....	51
4.2.2 Προσρόφηση CO <sub>2</sub> .....	56
4.2.3 Μembrάνες .....	58
4.2.4 Κρυγενικός διαχωρισμός .....	59
4.2.5 Κύκλος CaO/CaCO <sub>3</sub> .....	60
4.3 Δέσμευση του άνθρακα πριν από την καύση (Pre-Combustion) .....	60
4.3.1 Εφαρμογές για φυσικό αέριο .....	63
4.3.2 Εφαρμογές για άνθρακα .....	63
4.4 Καύση σε αυξημένα επίπεδα συγκέντρωσης οξυγόνου (Oxyfuel-combustion) .....	65
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</b> .....	<b>70</b>
<b>Μεταφορά και Αποθήκευση CO<sub>2</sub></b> .....	<b>70</b>
5.1 Εισαγωγή .....	70
5.2 Μεταφορά του CO <sub>2</sub> .....	71
5.2.1 Αγωγοί μεταφοράς CO <sub>2</sub> .....	74
5.2.2 Πλοία μεταφοράς CO <sub>2</sub> .....	76
5.3 Αποθήκευση CO <sub>2</sub> .....	79
5.3.1 Αποθήκευση σε ενεργούς ταμιευτήρες πετρελαίου (EOR) .....	81
5.3.2 Αποθήκευση σε εξαντλημένους ταμιευτήρες πετρελαίου/φυσικού αερίου .....	82
5.3.3 Αποθήκευση σε αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες .....	83
5.3.4 Αποθήκευση σε κοιτάσματα μη εξορυγμένου γαιάθρακα (ECBMR) .....	85
5.3.5 Αποθήκευση σε ωκεανούς .....	86
5.3.6 Αποθήκευση μέσω ορυκτοποίησης .....	89
5.4 Χρησιμοποίηση CO <sub>2</sub> .....	90
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6</b> .....	<b>93</b>
<b>Η περίπτωση της Ελλάδας</b> .....	<b>93</b>
6.1 Εισαγωγή .....	93
6.2 Εκπομπές Αερίων του Θερμοκηπίου .....	94
6.2.1 Εκπομπές CO <sub>2</sub> .....	97
6.2.2 Εκπομπές από την Παραγωγή Ενέργειας .....	98
6.2.3 Εκπομπές από την Βιομηχανία .....	102
6.3 Χώροι Αποθήκευσης .....	104
6.4 Εφαρμογή CCS στην Ελλάδα .....	109
6.4.1 Σενάριο Αναφοράς .....	110
6.4.2 Σενάριο ΑΠΕ και CCS .....	115
6.4.3 Σύγκριση των Σεναρίων .....	117

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7</b> .....	<b>123</b>
<b>Συμπεράσματα – Προτάσεις</b> .....	<b>123</b>
7.1 Συμπεράσματα .....	123
7.2 Προτάσεις .....	127
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>130</b>
<b>ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ</b> .....	<b>136</b>

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΝ

## **Κεφάλαιο 1**

### **Εκπομπές GHG και Κλιματική Αλλαγή**

#### **1.1 Εισαγωγή**

Στα τεσσεράμισι δισεκατομμύρια χρόνια της ιστορίας της γης, οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν το κλίμα του πλανήτη έχουν υποστεί σημαντικές διακυμάνσεις. Όταν η σύσταση της ατμόσφαιρας του πλανήτη άρχισε να πλησιάζει προς τα σημερινά χαρακτηριστικά της, πράγμα που συνέβη πριν από περίπου τρία δισεκατομμύρια χρόνια, άρχισαν να εμφανίζονται οι θερμές και οι ψυχρές παγετώδεις και μεσοπαγετώδεις κλιματικές περιόδους της γης. Η τελευταία γεωλογική περίοδος, η οποία συνεχίζεται μέχρι σήμερα, ονομάζεται “εποχή του Ολοκαίνου” και άρχισε πριν από 11.500 χρόνια, δηλ. μετά το τέλος της τελευταίας έξαρσης των παγετώνων (18.000 έτη πριν από σήμερα). Κατά τη μεσοπαγετώδη περίοδο που διανύουμε, ο αέρας άρχισε να θερμαίνεται, φθάνοντας σε θερμοκρασίες σχεδόν ίσες με τις σημερινές κατά τον 11ο μ.Χ. αιώνα (EMEKA, 2011).

Από το τέλος του 19ου αιώνα αρχίζει η άνοδος της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας, η οποία με διακυμάνσεις συνεχίζεται μέχρι τις ημέρες μας. Ο μέσος ρυθμός θέρμανσης της ατμόσφαιρας του πλανήτη κατά τον 20<sup>ο</sup> αιώνα ήταν 0,7°C ανά 100 χρόνια (IPCC, 2007). Ένα σημαντικό μέρος αυτής της θέρμανσης, έχει αποδοθεί στην αλλαγή της σύστασης της ατμόσφαιρας λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας και έχει επικρατήσει να χαρακτηρίζεται ως «ανθρωπογενής υπερθέρμανση του πλανήτη». Η ανοδική τάση της θερμοκρασίας είναι στατιστικά σημαντική στο επίπεδο εμπιστοσύνης 95% σχεδόν σε όλες τις κατοικημένες περιοχές του πλανήτη και η δεκαετία 1995-2005 ήταν η θερμότερη των τελευταίων 500 ετών (WMO, 2006).

Οι προβλέψεις της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC), δείχνουν ότι η ανοδική τάση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας θα συνεχιστεί στις περισσότερες περιοχές του πλανήτη και κατά τον 21<sup>ο</sup> αιώνα. Ειδικότερα, βάσει του μέσου όρου ενός συνόλου κλιματικών προσομοιώσεων, η μέση θερμοκρασία της ατμόσφαιρας αναμένεται να αυξηθεί, ανάλογα με την εξέλιξη των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου (GHG-Greenhouse Gases), κατά 1,8-4°C κατά τον τρέχοντα αιώνα. Η άνοδος της θερμοκρασίας εκτιμάται ότι θα είναι σημαντικότερη στα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη και εντονότερη στις ηπειρωτικές περιοχές σε σύγκριση με τους ωκεανούς (IPCC, 2007).

Η θέρμανση του πλανήτη θα έχει ως συνέπεια τη μείωση των θαλάσσιων και των χερσαίων

εκτάσεων που καλύπτονται από πάγο, καθώς και την αύξηση της μέσης στάθμης της θάλασσας. Μάλιστα, η παρατηρούμενη και αναμενόμενη αύξηση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας συνοδεύεται σε πολλές περιοχές και από μια τάση αύξησης της συχνότητας εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων (ΕΜΕΚΑ, 2011).

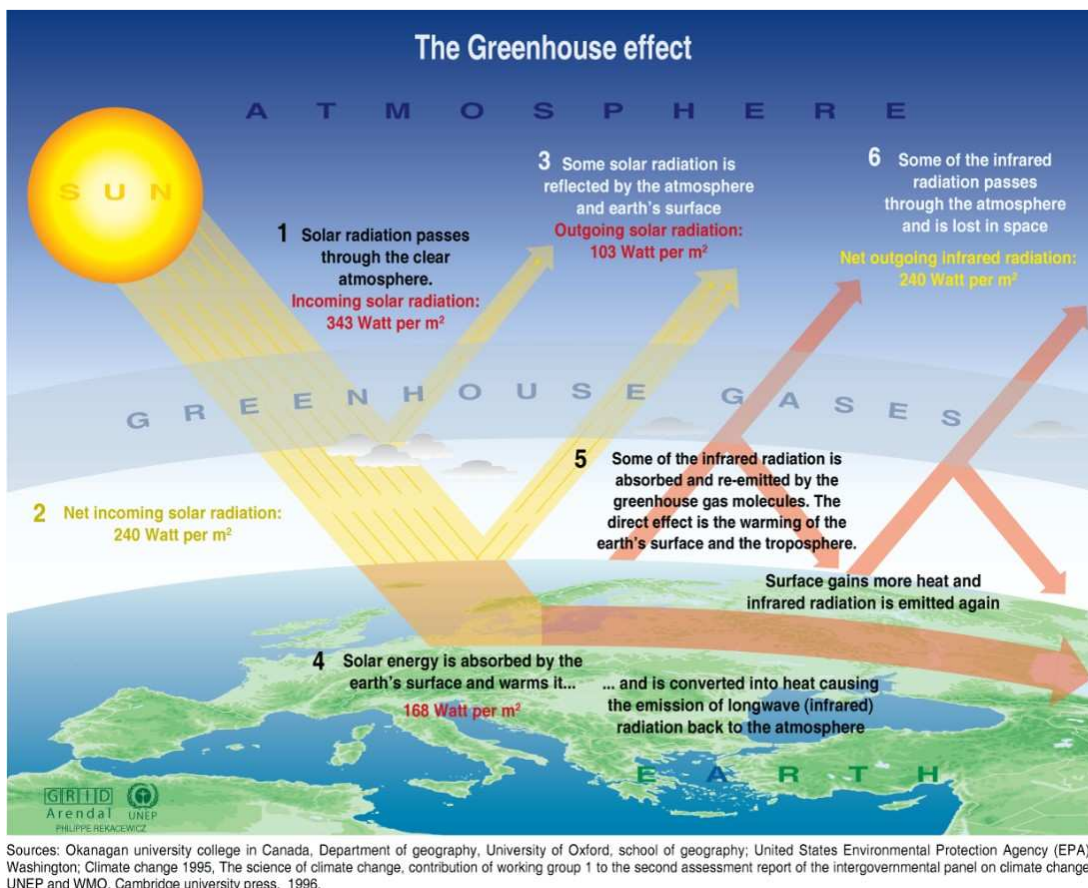
### **1.2 Μεταβολές της θερμοκρασίας κατά το παρελθόν και η σημασία του CO<sub>2</sub>**

Η σημερινή κλιματική αλλαγή εκτιμάται ότι ισοδυναμεί με αύξηση περίπου 1°C (θερμοκρασία εδάφους) τα τελευταία 500 χρόνια και 0,76°C τα τελευταία 100 χρόνια. Εκτιμάται μάλιστα ότι τα τελευταία 50 χρόνια εμφανίζονται πιθανότατα ως τα θερμότερα από οποιαδήποτε άλλη 50ετή περίοδο στα τελευταία 500 χρόνια, αλλά πιθανόν ακόμα και στα τελευταία 1300 χρόνια (IPCC, 2007). Ωστόσο, η ακρίβεια των δεδομένων που έχουν προκύψει από τη συλλογή έμμεσων εκτιμήσεων για το παλαιοκλίμα από ιστορικές καταγραφές και άλλους παλαιοκλιματικούς δείκτες 400 και 500 χρόνια πριν από σήμερα, καθώς και η συνεκτικότητα των εν λόγω δεδομένων με αυτά των ενόργανων μετρήσεων του τελευταίου ενάμισι αιώνα, δεν είναι επαρκείς ώστε να μας οδηγήσουν στην εκτίμηση ότι τα τελευταία 100 χρόνια εμφανίζουν πιο ακραίες κλιματικές αλλαγές από ό,τι τα προηγούμενα 400 χρόνια (ΕΜΕΚΑ, 2011).

Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή, υπολογίζεται ότι η ανθρωπογενής συνιστώσα στην τάση αύξησης της θερμοκρασίας για τα προσεχή 80 χρόνια κυμαίνεται μεταξύ 1,8 και 4,0°C (IPCC, 2007).

Η αύξηση της θερμοκρασίας των τελευταίων 150 χρόνων αποδίδεται κατά μεγάλο ποσοστό στην ανθρωπογενή αύξηση της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα (ΕΜΕΚΑ, 2011).

Η έκθεση του Geological Society of London (2010) αναφέρει χαρακτηριστικά ότι το γεωλογικό αρχείο προσφέρει αποδείξεις οι οποίες συμφωνούν με νόμους της φυσικής που δείχνουν ότι, όταν προστίθενται μεγάλες ποσότητες CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα, προκαλείται αύξηση της θερμοκρασία σύμφωνα με το μηχανισμό του φαινομένου του θερμοκηπίου (ΕΜΕΚΑ, 2011).



(Πηγή: UNEP/GRID-Arendal. Greenhouse effect. UNEP/GRID-Arendal Maps and Graphics Library. 2002.)

Σχήμα 1.2.1: Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου του θερμοκηπίου

Οι διακυμάνσεις της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα είναι γνωστές για τα τελευταία 800 χιλιάδες χρόνια, χάρη στην παρατήρηση των φυσαλίδων αέρα που είναι εγκλωβισμένες στους πάγους της Ανταρκτικής. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> βαίνουν παράλληλα κατά τη διάρκεια των παγετωδών-μεσοπαγετωδών εναλλαγών του Τεταρτογενούς, όπου το εύρος της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> βρίσκεται μεταξύ 180 και 280 ppm αντίστοιχα. Εντούτοις, από το τέλος της προηγούμενης παγετώδους περιόδου η αύξηση του CO<sub>2</sub> παρουσιάζει καθυστέρηση μερικών αιώνων σε σχέση με την άνοδο της θερμοκρασίας, πράγμα το οποίο υποδηλώνει ότι η κλιματική αλλαγή σ' αυτό το διάστημα δεν υποκινείται μόνον από το CO<sub>2</sub>. Οι επιστήμονες θεωρούν ότι η σταθερή τάση μείωσης της θερμοκρασίας από το τέλος του Ηωκαίνου (34 εκατομμύρια χρόνια πριν) μέχρι και τον Ολόκαινο πιθανόν να σχετίζεται με τη μείωση του CO<sub>2</sub> από τιμές της τάξεως των 1000 ppm σε τιμές των 180 ppm μέσα στον Τεταρτογενή. Η σημερινή τιμή του CO<sub>2</sub> βρίσκεται στα 390 ppm και έχει αυξηθεί περίπου κατά 30% τα τελευταία 200 χρόνια, ενώ το ήμισυ αυτής της αύξησης πραγματοποιήθηκε στα τελευταία 30 χρόνια. Παρόμοια υψηλά επίπεδα CO<sub>2</sub> στο παρελθόν εκτιμάται ότι υπήρξαν την περίοδο του

Πλειοκαίνου (5,2-2,6 εκατ. χρόνια πριν) με συγκεντρώσεις 330-400 ppm, θερμοκρασίες 2-3 °C υψηλότερες από σήμερα και μέση στάθμη της θάλασσας κατά 10-25 μέτρα υψηλότερη από σήμερα (ΕΜΕΚΑ, 2011).

Στο γεωλογικό παρελθόν έχει καταγραφεί πληθώρα περιόδων παγκόσμιας ανόδου της θερμοκρασίας. Σε κάθε περίπτωση όμως, η άνοδος αυτή μπορεί να ερμηνευθεί από ποικίλα γεωλογικά γεγονότα ή να συσχετιστεί με αυτά (π.χ. τροχιακές παράμετροι της Γης, κατάρρευση των υδριτών μεθανίου, μεταβολή της κυκλοφορίας των ωκεάνιων ρευμάτων, μεταβολές της ηφαιστειακής δραστηριότητας, μετακίνηση των ηπείρων και μεταβολές της ηλιακής δραστηριότητας). Η ανησυχία για τη σημερινή άνοδο της θερμοκρασίας, από το 1970 και μετά, οφείλεται στο ότι φαίνεται αδύνατη η αιτιολόγηση του φαινομένου και η συσχέτισή του με κάποια γεγονότα σαν αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω (ΕΜΕΚΑ, 2011).

Η πρόσφατη άνοδος της θερμοκρασίας συμπίπτει με την ανθρωπογενούς προέλευσης απότομη αύξηση του CO<sub>2</sub>, η οποία, σύμφωνα με τα γεωλογικά δεδομένα και τη θεωρία της φυσικής, αναμένεται να συμβάλει στην αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη. Έχει υπολογιστεί ότι ο διπλασιασμός της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> ισοδυναμεί με αύξηση της θερμοκρασίας της τάξεως των 2-4,5°C, με καλύτερη εκτίμηση αυτή των 3°C (climate sensitivity), (ΕΜΕΚΑ, 2011).

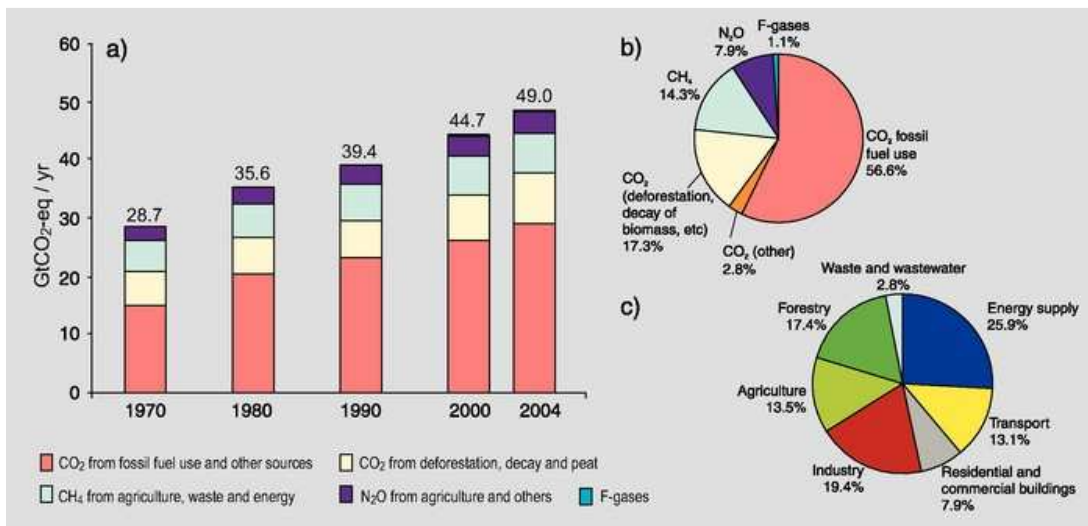
### **1.3 Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου**

Η αύξηση της θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα της γης, καθώς και η αυξητική της τάση, έστρεψε το ενδιαφέρον προς τις εκπομπές των αερίων θερμοκηπίου με κυριότερο σκοπό την εύρεση τρόπων αντιμετώπισής τους. Τα κυριότερα αέρια του θερμοκηπίου είναι τα εξής:

- CO<sub>2</sub>: διοξείδιο του άνθρακα (carbon dioxide) (1tn eq CO<sub>2</sub>)
- CH<sub>4</sub>: μεθάνιο (methane) (23tn eq CO<sub>2</sub>)
- N<sub>2</sub>O: υποξείδιο του αζώτου (nitrous oxide) (296tn eq CO<sub>2</sub>)
- HFCs: υδροφθοράνθρακες (hydrofluorocarbons) (12-12.000tn eq CO<sub>2</sub>)
- PFCs: υπερφθοράνθρακες (perfluorocarbons) (5.700-11.900tn eq CO<sub>2</sub>)
- SF<sub>6</sub>: εξαφθοριούχο θείο (sulphur hexafluoride) (22.200tn eq CO<sub>2</sub>)

Τα αέρια αυτά αναφέρονται στο Παράρτημα Α (Annex A) του Πρωτοκόλλου του Κιότο.

Η ποσοστιαία συνεισφορά των κυριότερων από τα αέρια θερμοκηπίου από ανθρωπογενείς δράσεις, παγκοσμίως, δίνεται στο σχήμα 1.3.1



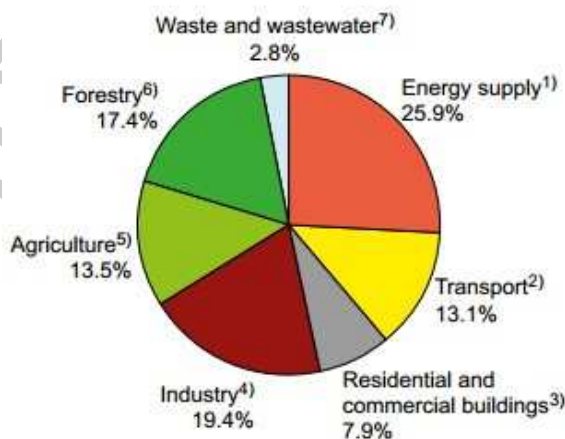
(Πηγή: (IPCC. AR4, 2007)

Σχήμα 1.3.1: (a) Παγκόσμιες ετήσιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από ανθρωπογενείς δραστηριότητες 1970-2004. (b) Μέρη των αερίων του θερμοκηπίου από ανθρωπογενείς δραστηριότητες στο σύνολο των εκπομπών το 2004, (CO<sub>2</sub>-eq). (c) Μέρη των διαφόρων τομέων στο σύνολο των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου το 2004, (CO<sub>2</sub>-eq).

Οι ανθρώπινες δραστηριότητες οι οποίες είναι κυρίως υπεύθυνες για τις αυξανόμενες εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα, είναι:

- Η καύση ορυκτών καυσίμων, όπως το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και οι άνθρακες.
- Οι μεγάλες καταστροφές δασών, κυρίως μέσω αποψιλώσεων.

Οι κυριότερες πηγές εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα ανά τομέα δραστηριότητας παρουσιάζονται στο σχήμα 1.3.2



(Πηγή: IPCC. Technical Summary, 2007)

Σχήμα 1.3.2: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά τομέα το 2004

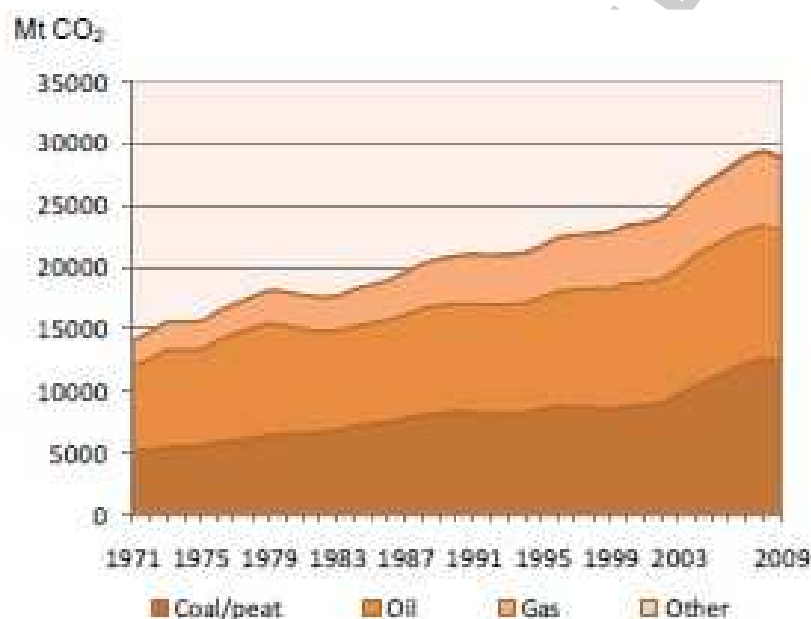
Το διοξείδιο του άνθρακα εκλύεται από τα καυσαέρια στην ατμόσφαιρα μαζί με μοριακό άζωτο, υδρατμούς, οξυγόνο, οξείδια του θείου, οξείδια του αζώτου και σωματίδια, σε πίεση περίπου ίση με την ατμοσφαιρική και σε αρκετά υψηλές τιμές θερμοκρασίας, συνήθως



υψηλότερες από τους 100°C (Meisen *and* Shuai 1997).

Ο τομέας της ηλεκτροπαραγωγής, ο οποίος αποτελεί και τον τομέα με τις υψηλότερες εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα, έχει ως χαρακτηριστικό του ότι τα καυσάερια είναι μεγάλου όγκου, ενώ σε άλλους τομείς (όπως είναι ο τομέας θέρμανσης και ο τομέας μεταφορών) οι πηγές εκπομπών του είναι μικρές και διεσπαρμένες.

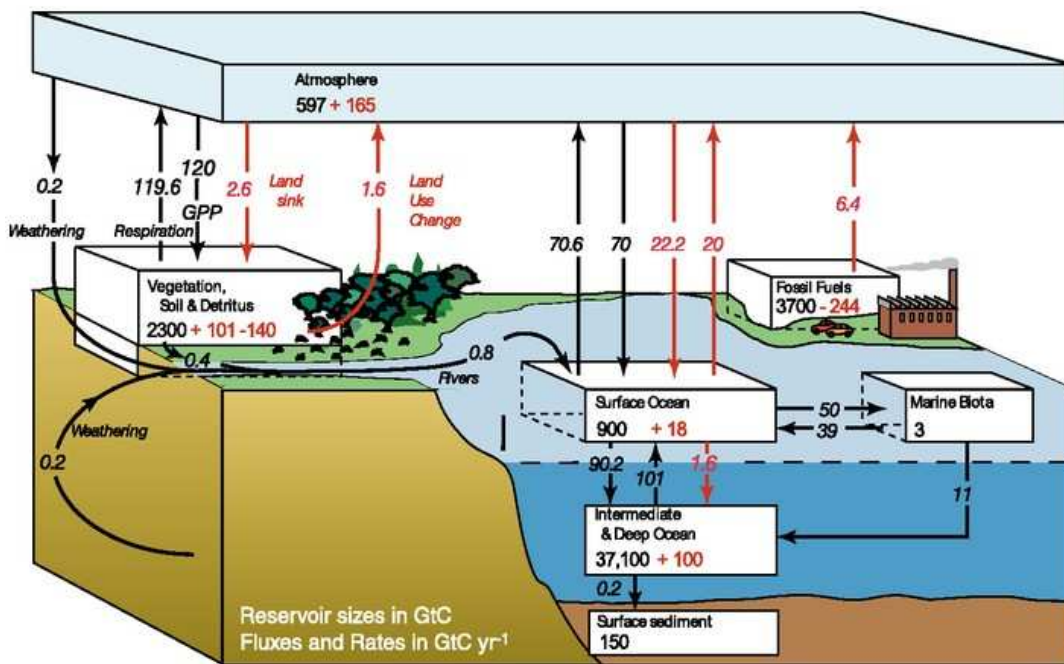
Στο σχήμα 1.3.3 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη των παρατηρούμενων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα ανά χρησιμοποιούμενο καύσιμο, για κάθε έτος από το 1971 έως και το 2009.



(Πηγή: IEA. Highlights 2011)

Σχήμα 1.3.3: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά τύπο καυσίμου

Η μισή σχεδόν ποσότητα από τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα παραμένει στην ατμόσφαιρα, ενώ το υπόλοιπο απομακρύνεται από αυτή μέσω φυσικών διεργασιών. Οι ποσότητες του διοξειδίου του άνθρακα οι οποίες οφείλονται στην ανθρώπινη δραστηριότητα, εισέρχονται και αυτές στο φυσικό κύκλο ζωής του άνθρακα. Ο φυσικός κύκλος επηρεάζει το ρυθμό της συσσώρευσης του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Ουσιαστικά πραγματοποιείται μια ανταλλαγή σημαντικών ποσοτήτων του άνθρακα, σε χρονική περίοδο αρκετών ετών, μεταξύ της ατμόσφαιρας, των ωκεανών και της γήινης βιόσφαιρας. Με την πάροδο του χρόνου ο άνθρακας εγκαθίσταται σε μορφή ιλύος ώσπου τελικά αποκτά τη μορφή ιζηματογενούς πετρώματος.



(Πηγή: IPCC. The Physical Science Basis, 2007)

Σχήμα 1.3.4: Ο παγκόσμιος κύκλος του άνθρακα το 1990 με τις κύριες ετήσιες ροές σε GtC yr<sup>-1</sup>

Οι βασικές διεργασίες του κύκλου του άνθρακα είναι τρεις.:

1. Μηχανισμός της ανταλλαγής του άνθρακα που απορροφάται από τα φυτά μέσω της της φωτοσύνθεσης και με την αποσύνθεσή τους και την ανταλλαγή του άνθρακα μεταξύ της επιφάνειας των θαλασσών και της ατμόσφαιρας.
2. Μεταφορά του άνθρακα από την επιφάνεια των ωκεανών στα βαθύτερα στρώματά του.
3. Ο γεωχημικός κύκλος του άνθρακα ο οποίος ελέγχει τη μεταφορά του άνθρακα που πραγματοποιείται μεταξύ της γης, των ωκεανών και της ατμόσφαιρας.

Το διοξείδιο του άνθρακα έχει σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής στην ατμόσφαιρα, από 50 έτη έως και 200 έτη περίπου. Η ανθρώπινη δραστηριότητα είναι υπεύθυνη μόνο για ένα μέρος της ποσότητας του διοξειδίου του άνθρακα που εμφανίζεται στον κύκλο ζωής του άνθρακα, αλλά είναι αρκετή για να προκαλέσει σημαντική αλλαγή της τιμής της συγκέντρωσής του στην ατμόσφαιρα. Αν και το ακριβές μέγεθος των κλιματικών αλλαγών που παρατηρούνται ως συνέπεια της αύξησης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, εμπεριέχουν βαθμό αβεβαιότητας, θα πρέπει απαραίτητα να τεθούν κάποια όρια στις εκπομπές των αερίων θερμοκηπίου που πραγματοποιούνται.

Η παγκόσμια κοινότητα μέσω της Σύμβασης-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για τις Κλιματικές Αλλαγές (UNFCCC-United Nations Framework Convention on Climate Change),

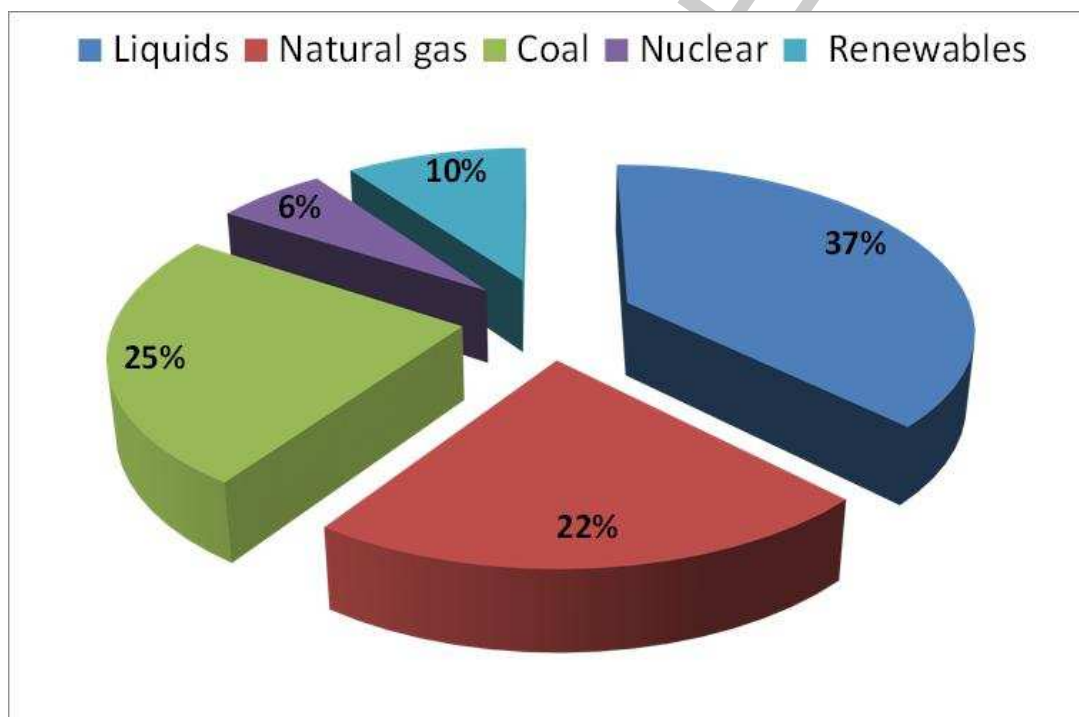
έχει αναγνωρίσει τη συσχέτιση των ανθρωπογενών εκπομπών των αερίων θερμοκηπίου και της παρατηρούμενης κλιματικής αλλαγής και συντονίζει ενέργειες ώστε να τεθούν κάποια περιοριστικά όρια στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου με σκοπό να επιτευχθούν σημαντικές μειώσεις τους. (IPCC, 2001).

Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) έχει πραγματοποιήσει αρκετές μελέτες με σκοπό την πρόβλεψη, με διάφορα σενάρια, των μελλοντικών τιμών των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Ένα από τα σενάρια που μελετήθηκαν είναι το σενάριο αναμενόμενης εξέλιξης (business as usual- BAU). Το συγκεκριμένο σενάριο, προσομοιώνει την εξέλιξη των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα υπό τις παρούσες πολιτικές και πρακτικές συμπεριφοράς των καταναλωτών, καθώς και τις διαφαινόμενες μελλοντικές τάσεις. Έτσι, στο συγκεκριμένο σενάριο λαμβάνονται υπόψη όλες οι ήδη δρομολογημένες πολιτικές στους διάφορους τομείς οικονομικής δραστηριότητας (μεταφορές, βιομηχανία κλπ.) και διαμορφώνονται εκτιμήσεις για την εξέλιξη των εκπομπών. Προβλέπεται η πραγματοποίηση βελτιώσεων, όσον αφορά στην τιμή της απόδοσης, καθώς και η εισαγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Από το σενάριο προκύπτει ότι το επίπεδο των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα θα αυξηθεί κατά περίπου 70% ως το έτος 2100, σε σχέση με τα σημερινά επίπεδα και αναμένεται να φτάσει τα 700ppm και να συνεχίσει με αυξητικό ρυθμό.

Προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή σταθεροποίηση του επιπέδου του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, στο διπλάσιο του αντίστοιχου επιπέδου της προβιομηχανικής περιόδου (δηλαδή σταθεροποίηση στο επίπεδο των 550 ppm), προς αποφυγή των επιπτώσεων που θα έχει η συνεχιζόμενη αύξησή του, απαιτείται η πραγματοποίηση σημαντικών μειώσεων (της τάξης του 50% ή και του 60%), πριν από το έτος 2100. Η απαιτούμενη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα διαφέρει, στα αναπτυσσόμενα και στα ανεπτυγμένα κράτη. Για να επιτευχθούν οι μεγάλες μειώσεις, θα πρέπει η μείωση που θα πραγματοποιηθεί στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής να αντιστοιχεί στο 90% των σημερινών επιπέδων εκπομπών (IEA, 2009).

#### **1.4 Ενεργειακό πρόβλημα**

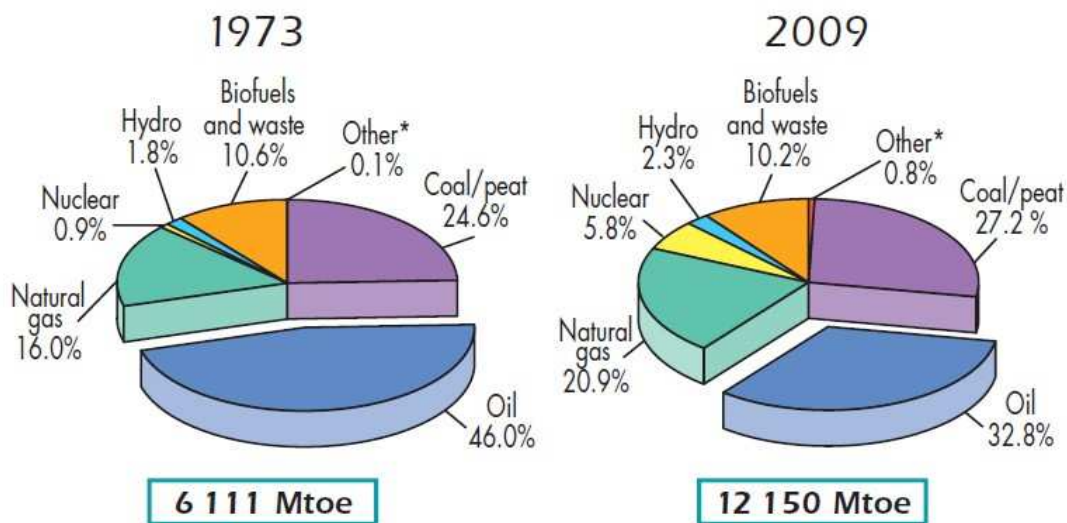
Τα ορυκτά καύσιμα (άνθρακες, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) αποτελούν μέχρι και σήμερα την κυρίαρχη πηγή παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας, παρέχοντας περίπου το 85% αυτής. Μόνο ο άνθρακας (γαιάνθρακας, λιγνίτης, λιθάνθρακας κλπ.) καλύπτει το 25% αυτής, ενώ καλύπτει το 50% της ηλεκτροπαραγωγής των ΗΠΑ και το 30% της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ). Στο σχήμα 1.4.1, παρουσιάζονται τα ποσοστά συμμετοχής κάθε τύπου καυσίμου στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας για την περίοδο 1990-2008 σύμφωνα με τα στοιχεία της έκθεσης International Energy Outlook 2011 του U.S. Energy Information Administration (EIA).



(Πηγή: Ίδια επεξεργασία στοιχείων EIA. IEO2011)

*Σχήμα 1.4.1: Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά τύπο καυσίμου για την περίοδο 1990-2008*

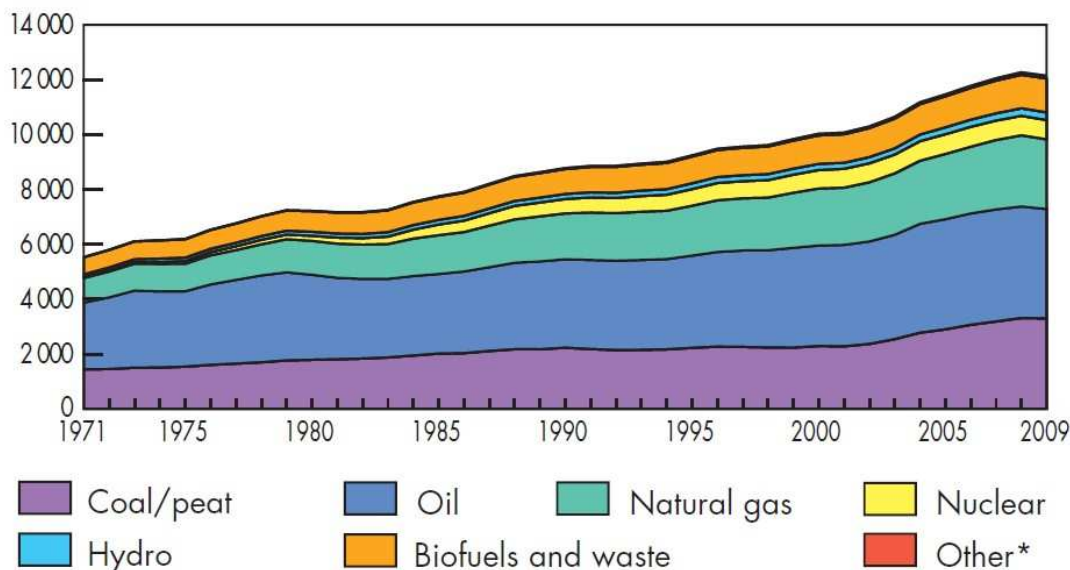
Η ποσοστιαία συνεισφορά του κάθε καυσίμου στην παγκόσμια παραγωγή ενέργειας, καθώς και η διαφοροποίηση των μεριδίων από το 1973 ως το 2009 παρουσιάζεται στο σχήμα 1.4.2. Το 0,8% αναφέρεται στην ηλιακή ενέργεια, την αιολική ενέργεια και τη γεωθερμική ενέργεια, που αποτελούν τις "άλλες πηγές ενέργειας".



(Πηγή: IEA, 2011b)

Σχήμα 1.4.2: Μέρη παγκόσμια παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας ανά τύπο καυσίμου

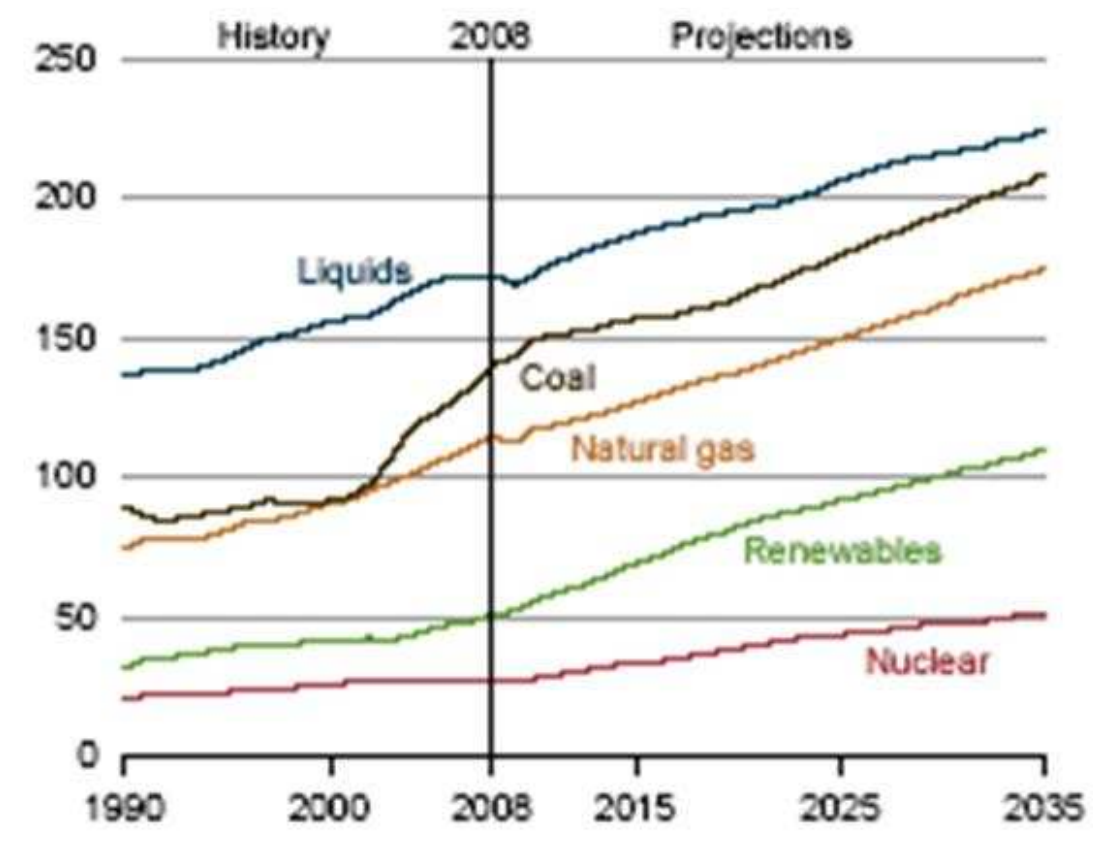
Η Παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά τύπο καυσίμου από το 1973 ως το 2009 παρουσιάζεται στο σχήμα 1.4.3.



(Πηγή: IEA, 2011b)

Σχήμα 1.4.3: Παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά τύπο καυσίμου σε Mtoe

Στη συνέχεια και στο σχήμα 1.4.4 που ακολουθεί παρουσιάζεται η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας από το 1990 ανά τύπο καυσίμου με προβολή μέχρι το 2035. Όπως παρατηρείται, η ζήτηση ενέργειας εμφανίζει αυξητική τάση. Επίσης, παρά την αύξηση της συνεισφοράς των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μίγμα, τα ορυκτά καύσιμα συνεχίζουν να αποτελούν την κύρια πηγή πρωτογενούς ενέργειας μέχρι το 2035.



(Πηγή: EIA, IEO2011)

Σχήμα 1.4.4: Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά τύπο καυσίμου για την περίοδο 1990-2035 (10<sup>15</sup>Btu)

Η αύξηση στην χρήση των ορυκτών καυσίμων που αποτελούν την κυριότερη πηγή ανθρωπογενούς διοξειδίου του άνθρακα θα έχει ως συνέπεια την αύξηση των εκπομπών του (κατά το μεγαλύτερο ποσοστό στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής).

Η αύξηση της χρήσης τόσο της υδροηλεκτρικής όσο και της πυρηνικής ενέργειας είναι πιθανή μελλοντικά, αλλά περιορίζεται από εμπόδια κυρίως πολιτικού και οικολογικού χαρακτήρα.

Η χρήση βιοκαυσίμων στην ηλεκτροπαραγωγή μπορεί επίσης να αυξηθεί, κυρίως σε χώρες της τροπικής ζώνης, αλλά σε αρκετές περιοχές είναι πιθανό να ανταγωνίζεται τελικά την παραγωγή τροφίμων. Η ηλιακή ενέργεια, παρουσιάζει σημαντικές προοπτικές, αλλά χρησιμοποιείται λόγω του υψηλού κόστους της, σε μικρή μόνο κλίμακα.

Ακόμα και με εντατική έρευνα σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα θα είναι δύσκολη και ακόμη περισσότερο λαμβάνοντας υπόψη τη διαρκή αύξηση της ζήτησης ενέργειας.

Επίσης η αναμενόμενη αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης θα εντοπίζεται κυρίως στις αναπτυσσόμενες χώρες (Κίνα, Ινδία), όπου η ενεργειακή κατανάλωση στηρίζεται κυρίως στις

φυσικές πηγές άνθρακα.

Απ' την άλλη η μακροχρόνια καθιέρωση ενός συστήματος παραγωγής ενέργειας που βασίζεται σχεδόν αποκλειστικά στη χρήση των ορυκτών καυσίμων αποτελεί βασική αιτία που δεν είναι δυνατή η γρήγορη μετάβαση σε κάποιο άλλο ενεργειακό σύστημα. Ο περιορισμός αυτός προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη το υψηλό κόστος των επενδύσεων που έχουν πραγματοποιηθεί στο υφιστάμενο σύστημα (δυλιστήρια, δίκτυο μεταφοράς, δίκτυο παραγωγής - διανομής ενέργειας, εγκαταστάσεις φορτώσεων και εκφορτώσεων), (Walsh, 1999).

Σύμφωνα λοιπόν με τις παραπάνω εκτιμήσεις, αλλά και της απαίτησης για ενεργειακή ασφάλεια, η στήριξη του συστήματος ενέργειας στα ορυκτά καύσιμα θα συνεχιστεί και στο μέλλον. Υπό οποιοδήποτε σενάριο ανάπτυξης είναι γεγονός ότι θα υπάρχουν διαθέσιμες ποσότητες ανθράκων και τον επόμενο αιώνα. Ο άνθρακας συναντάται σε διάφορες περιοχές στον κόσμο και η τιμή του αναμένεται να συνεχίσει να είναι και μελλοντικά, ανταγωνιστική. Τα γνωστά αποθέματα του πετρελαίου και του φυσικού αερίου είναι περισσότερο περιορισμένα, αλλά είναι πιθανή και η εύρεση και εκμετάλλευση νέων. Επιπλέον, υπάρχουν και σημαντικές ποσότητες ορυκτών καυσίμων σε μορφή που με την πρόοδο της τεχνολογίας, έχει καταστεί οικονομικά συμφέρουσα η εκμετάλλευσή τους (φυσικό αέριο από σχιστολιθικά πετρώματα-fracking), ή θα καταστεί στο μέλλον (υπόγεια αεριοποίηση του άνθρακα-Underground coal gasification).

Για να είναι δυνατή η χρήση των ορυκτών καυσίμων για την κάλυψη των αυξανόμενων αναγκών ενέργειας αλλά με ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτουν, είναι αναγκαία η ανάπτυξη και υλοποίηση αποτελεσματικών οικονομικά μέσων δέσμευσης και απομάκρυνσης των παραγόμενων ποσοτήτων του διοξειδίου του άνθρακα. Οι επιλογές μείωσης θα πρέπει να είναι τεχνικά και οικονομικά αποδεκτές, ώστε να είναι τελικά συμφέρουσα η εφαρμογή τους.

## **Κεφάλαιο 2**

### **Η πολιτική για την Κλιματική Αλλαγή**

#### **2.1 Η Σύμβαση - Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών**

Η Σύμβαση - Πλαίσιο των Η.Ε. για τις κλιματικές αλλαγές υπεγράφη από 154 χώρες και την Ευρωπαϊκή Ένωση τον Ιούνιο του 1992 στο Ρίο, κατά τη διάρκεια της Συνόδου Κορυφής για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη. Η σύμβαση δεν έθεσε νομικά δεσμευτικές υποχρεώσεις αλλά τις βάσεις για περαιτέρω δράση στο μέλλον. Την εποχή που επικρατούσαν πολλές αμφισβητήσεις για την επιστημονική στήριξη της ανάγκης υιοθέτησης μέτρων, η σύμβαση έθεσε τις γενικές αρχές και τη διαδικασία για τη μετέπειτα υιοθέτηση δεσμεύσεων, κυρίως μέσω των τακτικών συνόδων των Κρατών Μερών της.

Η Σύμβαση προβλέπει για όλα τα Κράτη, αναγνωρίζοντας κοινές αλλά διαφοροποιημένες υποχρεώσεις και την ύπαρξη εθνικών αναπτυξιακών προτεραιοτήτων, τα εξής:

1. Την ανάπτυξη, τακτική ενημέρωση και δημοσιοποίηση εθνικών απογραφών των ανθρωπογενών εκπομπών βάσει συγκρίσιμων μεθοδολογιών.
2. Τη δημοσίευση, αναθεώρηση και εφαρμογή εθνικών προγραμμάτων για την αντιμετώπιση των κλιματικών αλλαγών.
3. Την υιοθέτηση πολιτικών και μέτρων με στόχο την επαναφορά των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου στα επίπεδα του έτους 1990 μέχρι το 2000 για τα Κράτη που περιλαμβάνονται στο Παράρτημα I της Σύμβασης (ανεπτυγμένα κράτη). Η σύμβαση δίνει τη δυνατότητα ο στόχος αυτός να επιτευχθεί από κάθε κράτος ξεχωριστά ή από κοινού με άλλα.

Η Διάσκεψη των Συμβαλλομένων Μερών (Conference of the Parties-COP) είναι το «ανώτατο σώμα» (supreme body) της Σύμβασης, δηλαδή η υψηλότερη αρχή της λήψης αποφάσεων. Στη Διάσκεψη μετέχουν όλες οι χώρες που είναι συμβαλλόμενα μέρη της σύμβασης.

Η COP είναι υπεύθυνη για την υιοθέτηση αποφάσεων σχετικά με την εφαρμογή και την περαιτέρω εξέλιξη της Σύμβασης. Καταγράφει την πορεία εφαρμογής της σύμβασης και εξετάζει τις δεσμεύσεις των μερών υπό το πρίσμα του στόχου της Σύμβασης, τα νέα επιστημονικά δεδομένα και την εμπειρία που αποκτήθηκε κατά την εφαρμογή πολιτικών για την αλλαγή του κλίματος. Ένα βασικό καθήκον για την COP είναι η αναθεώρηση των εθνικών εκθέσεων και των απογραφών των εκπομπών που υποβάλλονται από τα Μέρη. Βάσει των πληροφοριών αυτών, η COP αξιολογεί τα αποτελέσματα των μέτρων που



λαμβάνονται από τα μέρη και την πρόοδο που σημειώθηκε στην επίτευξη του απώτερου στόχου της Σύμβασης. Η COP συνεδριάζει κάθε χρόνο, εφόσον τα μέρη δεν αποφασίσουν διαφορετικά, στην έδρα της Γραμματείας της Σύμβασης στη Βόννη ή σε κάποιο κράτος – μέρος που προσφέρεται να φιλοξενήσει τη σύνοδο.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση με δήλωσή της, που κατετέθη ταυτόχρονα με το έγγραφο επικύρωσης της Σύμβασης, έθεσε σαν συνολικό στόχο της (για όλα τα κράτη-μέλη από κοινού) τη σταθεροποίηση των εκπομπών της διοξειδίου του άνθρακα μέχρι το έτος 2000 στα επίπεδα του 1990.

Η Ελλάδα επικύρωσε την Σύμβαση με τον Νόμο 2205/1994 (ΦΕΚ 60/Α/15-4-1994), (ΥΠΕΚΑ, 2009).

## **2.2 Το Πρωτόκολλο του Κιότο**

Με βάση τις διαδικασίες που προβλέπονταν από τη Σύμβαση, στην Τρίτη Σύνοδο των Συμβαλλομένων Μερών (Κιότο, Δεκέμβριος 1997) υιοθετήθηκε Πρωτόκολλο στη Σύμβαση, γνωστό ως Πρωτόκολλο του Κιότο. Το Πρωτόκολλο στοχεύει σε συνολική μείωση των εκπομπών τουλάχιστον κατά 5% την πενταετία 2008-2012 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990. Για την επίτευξή του, τα ανεπτυγμένα Κράτη - Μέρη του Πρωτοκόλλου καλούνται να εξασφαλίσουν ότι οι εκπομπές τους, για 6 συνολικά αέρια, δεν θα υπερβούν τα όρια που τους τίθενται με το Πρωτόκολλο αυτό. Το Πρωτόκολλο τέθηκε σε ισχύ το 2005. Σύμφωνα με το Πρωτόκολλο, η ΕΕ και τα Κ-Μ της έχουν υποχρέωση μείωσης των εκπομπών κατά 8% κατά τη περίοδο 2008-2012 σε σύγκριση με τις εκπομπές του έτους βάσης (1990). Βάσει του άρθρου 4 του Πρωτοκόλλου που επιτρέπει την από κοινού ανταπόκριση στις υποχρεώσεις που αναλαμβάνονται από το Πρωτόκολλο, στο Συμβούλιο Υπουργών Περιβάλλοντος της Ε.Ε. της 4ης Μαρτίου 2002, επετεύχθη συμφωνία σε απόφαση του Συμβουλίου για την "έγκριση εξ ονόματος της Ευρωπαϊκής Κοινότητας του Πρωτοκόλλου του Κιότο της Σύμβασης Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την αλλαγή του κλίματος και την από κοινού ανταπόκριση στις αντιστοίχως αναλαμβανόμενες υποχρεώσεις". Η απόφαση αυτή κοινοποιήθηκε στη Γραμματεία της Σύμβασης στη Βόννη, την ίδια μέρα που έγινε η κατάθεση των πράξεων κύρωσης του Πρωτοκόλλου στο θεματοφύλακα (Νέα Υόρκη).

Η Διάσκεψη των Συμβαλλομένων Μερών (COP) ενεργεί και ως Σύνοδος των Μερών του Πρωτοκόλλου του Κιότο (CMP). Όταν η COP ενεργεί CMP, τα κράτη της Σύμβασης που δεν

είναι συμβαλλόμενα μέρη του πρωτοκόλλου είναι σε θέση να συμμετάσχουν στην CMP ως παρατηρητές, αλλά δεν έχουν το δικαίωμα να λαμβάνουν αποφάσεις. Τα καθήκοντα της CMP σχετικά με το Πρωτόκολλο είναι παρόμοια με εκείνα που πραγματοποιούνται από την COP για τη σύμβαση. Η CMP συνεδριάζει ετησίως την ίδια περίοδο με το COP. Η πρώτη σύνοδος των Μερών του Πρωτοκόλλου του Κιότο, πραγματοποιήθηκε στο Μόντρεαλ του Καναδά τον Δεκέμβριο του 2005, σε συνδυασμό με την ενδέκατη σύνοδο της Διάσκεψης των Μερών (COP 11).

Τα κύρια σημεία του Πρωτοκόλλου συνοψίζονται ως εξής:

- Τα ανεπτυγμένα κράτη δεσμεύονται να μειώσουν τις συνολικές τους εκπομπές κατά τουλάχιστον 5%. Ο στόχος αυτός αναφέρεται σε έξι αέρια (διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, υποξείδιο του αζώτου, υδροφθοράνθρακες, πλήρως φθοριομένοι υδρογονάνθρακες και εξαφθοριούχο θείο).
- Ο στόχος κάθε κράτους πρέπει να επιτευχθεί την περίοδο 2008-2012.
- Δυνατότητα εκπλήρωσης των υποχρεώσεων από κοινού. Τα Κράτη δύνανται να δηλώσουν κοινή εκπλήρωση των υποχρεώσεών τους, μέσω μιας συμφωνίας που θα συνάψουν, όπου θα καταγράφεται η υποχρέωση κάθε κράτους ως προς το επίπεδο των εκπομπών και η οποία πρέπει να κατατεθεί μαζί με το κείμενο επικύρωσης.
- Δυνατότητα εκπλήρωσης μέρους των υποχρεώσεων μέσω τριών ευέλικτων μηχανισμών. Το Πρωτόκολλο του Κιότο παρέχει τη δυνατότητα να επιτυγχάνεται η εκπλήρωση μέρους των υποχρεώσεων μέσω τριών μηχανισμών: από κοινού εφαρμογή, μηχανισμός "καθαρής" ανάπτυξης και εμπόριο εκπομπών. Η γενική προϋπόθεση είναι η εκπλήρωση των υποχρεώσεων μέσω των μηχανισμών αυτών να είναι συμπληρωματική των εθνικών δράσεων για την επίτευξη του στόχου.
- Υιοθέτηση πολιτικών και μέτρων. Το Πρωτόκολλο δεσμεύει τα Κράτη-Μέρη του σε εφαρμογή ή υιοθέτηση πολιτικών και μέτρων για την επίτευξη του στόχου του Πρωτοκόλλου, σύμφωνα με τις εθνικές συνθήκες κάθε κράτους. Περιλαμβάνει και ενδεικτικό κατάλογο συγκεκριμένων μέτρων που μπορούν να εφαρμοσθούν από τα Κράτη-Μέρη.
- Συνεκτίμηση αποδεκτών (καταβόθρες). Το Πρωτόκολλο περιλαμβάνει διατάξεις για την συνεκτίμηση των αποδεκτών (καταβόθρες), οι οποίες αν και χρειάζονται περαιτέρω μελέτη και διευκρινήσεις, παρέχουν κατ' αρχήν τη δυνατότητα συνυπολογισμού της πρόσληψης διοξειδίου του άνθρακα από τα δάση και τις καλλιεργούμενες γαίες στη μείωση των εκπομπών.

- Αυστηρό καθεστώς συμμόρφωσης. Το Πρωτόκολλο προβλέπει την εγκαθίδρυση ενός αυστηρού καθεστώτος συμμόρφωσης.
- Δεν υπάρχουν ποσοτικοί στόχοι για αναπτυσσόμενες χώρες.

Ενενήντα μέρες μετά την επικύρωση του Πρωτοκόλλου και από τη Ρωσία ικανοποιήθηκαν πλέον και οι δύο απαραίτητοι όροι προκειμένου να τεθεί σε ισχύ το Πρωτόκολλο του Κιότο, δηλ. να έχει κυρωθεί τουλάχιστον από 55 Κράτη- Μέρη της Σύμβασης για τις κλιματικές αλλαγές, και μεταξύ αυτών να συμπεριλαμβάνονται Μέρη του Παραρτήματος Ι της Σύμβασης (ανεπτυγμένες χώρες) που αντιπροσωπεύουν τουλάχιστον το 55% των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα των χωρών αυτών κατά το 1990. (ΥΠΕΚΑ, 2009).

### **2.3 Η Συμφωνία της Κοπεγχάγης**

Η Διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (COP15) που πραγματοποιήθηκε στην Κοπεγχάγη (7-19 Δεκεμβρίου 2009) δεν είχε τα επιθυμητά αποτελέσματα, δηλαδή την σύναψη μιας παγκόσμιας, φιλόδοξης, αποτελεσματικής και νομικά δεσμευτικής συμφωνίας. Το κύριο αποτέλεσμα της Διάσκεψης ήταν μια πολιτική συμφωνία, γνωστή ως η Συμφωνία της Κοπεγχάγης (Copenhagen Accord).

Αναλυτικά, η Συμφωνία της Κοπεγχάγης :

- Αναγνωρίζει το στόχο της διατήρησης της μέγιστης μέσης παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας κάτω από 2°C, και την ανάγκη για επανεξέταση το 2015 για πιθανή επιδίωξη της διατήρησης της μέγιστης μέσης παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας κάτω από 1,5°C σύμφωνα με τις νέες επιστημονικές γνώσεις.
- Ζητεί την εισαγωγή στόχων μείωσης των εκπομπών για τις ανεπτυγμένες χώρες και δράσεις μετριασμού από τις αναπτυσσόμενες χώρες έως τις 31 Ιανουαρίου 2010.
- Αναγνωρίζει την ανάγκη για ενισχυμένη δράση για την προσαρμογή και ανάπτυξη της προσαρμοστικότητας στις αναπτυσσόμενες χώρες, ιδίως στις λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες, τα μικρά νησιωτικά αναπτυσσόμενα κράτη και την Αφρική.
- Περιγράφει τα κύρια στοιχεία των υποχρεώσεων των αναπτυγμένων χωρών για νέα και πρόσθετη χρηματοδότηση, τόσο για την προσαρμογή όσο και το μετριασμό της κλιματικής αλλαγής στις αναπτυσσόμενες χώρες, συμπεριλαμβανομένου ενός προγράμματος ταχείας χρηματοδότησης (30 δισ. δολάρια ΗΠΑ) για την περίοδο 2010-2012 και τις ανάγκες μακροπρόθεσμης οικονομικής βοήθειας (100 δισ. δολάρια

ΗΠΑ ετησίως το 2020). Η χρηματοδότηση αυτή θα προέλθει από μια ευρεία ποικιλία πηγών, δημοσίων και ιδιωτικών, διμερών και πολυμερών.

- Τονίζει τη σημασία της καθιέρωσης αξιόπιστης παρακολούθησης, υποβολής εκθέσεων και εξακρίβωσης (MRV).
- Τονίζει την ανάγκη για τη δημιουργία μηχανισμών άμεσης μείωσης των εκπομπών από την αποψίλωση των δασών, την υποβάθμιση των δασών και άλλων αλλαγών χρήσεων γης.
- Αναγνωρίζει την ανάγκη να ενισχυθεί η δράση για την ανάπτυξη τεχνολογίας και μεταφορά τεχνογνωσίας.

Οι θέσεις της Ελλάδας στη Διάσκεψη της Κοπεγχάγης, σχετικά με τις δυνατότητες εφαρμογής της τεχνολογίας δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (Carbon capture and storage - CCS) αναφέρονταν σε ορισμένες επιφυλάξεις. Οι επιφυλάξεις αυτές αφορούσαν κυρίως τις συνθήκες ασφάλειας, περιβαλλοντικών επιπτώσεων και οικονομικής τεκμηρίωσης, οι οποίες οφείλουν να δοκιμαστούν σε επίπεδο πιλοτικών έργων ώστε να διασφαλισθεί η περιβαλλοντικά ασφαλής εφαρμογή των (ΥΠΕΚΑ, 2009).

#### **2.4 Η Σύνοδος του Κανκούν**

Στη σύνοδο του Κανκούν του Μεξικό, που άρχισε στις 29 Νοεμβρίου και ολοκληρώθηκε τις πρώτες πρωινές ώρες της 11<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου του 2010, 193 χώρες συμφώνησαν σε μια σειρά αποφάσεων που θα αποτελούσαν το υπόβαθρο για μια τελική συμφωνία στη σύνοδο της επόμενης χρονιάς στο Ντέρμπαν της Νότιας Αφρικής. Σε σχέση με τη μείωση των αερίων που ευθύνονται για την κλιματική αλλαγή, το μόνο που συμφωνήθηκε ήταν πως οι χώρες που συμμετέχουν στο Πρωτόκολλο του Κιότο πρέπει να μειώσουν τις εκπομπές τους κατά 25-40% έως το 2020, χωρίς να δεσμεύονται για το πως θα επιτευχθεί αυτό, ενώ δεν εξασφαλίστηκε και η προέκταση του Πρωτοκόλλου και στις υπόλοιπες χώρες. Επί της ουσίας πρόκειται για μια αφηρήμενη κοινή συμφωνία περί της ανάγκης για μεγαλύτερη προσπάθεια ώστε η αύξηση της θερμοκρασίας να μην ξεπεράσει τους 2°C.

Στα πιο σημαντικά σημεία των συμφωνιών της συνόδου είναι η απόφαση για την ίδρυση ενός «Πράσινου Κλιματικού Ταμείου», με στόχο να ενισχυθούν οι φτωχότερες χώρες ώστε να στραφούν σε καθαρότερες τεχνολογίες, χωρίς ωστόσο να διευκρινίζεται από που θα αντλούνται οι πόροι για την χρηματοδότηση του. Η λειτουργία αυτού του ταμείου ανατέθηκε

στην Παγκόσμια Τράπεζα. Επίσης σημαντική ήταν η συμφωνία για τον μετριασμό της αποψίλωσης των δασών REDD (Reducing Emission from Deforestation and Forrest Degradation in Developing Countries), η οποία επεκτείνει το εμπόριο ρύπων σε όλους τους φυσικούς πόρους. Δίνεται έτσι η δυνατότητα στους ρυπαντές του βόρειου ημισφαιρίου να εξαγοράσουν δικαιώματα εκπομπής CO<sub>2</sub> με αντάλλαγμα την προστασία των δασών στο νότιο ημισφαίριο (Προύντζου, 2012).

### **2.5 Η Σύνοδος Ντέρμπαν**

Στη σύνοδο στο Ντέρμπαν της Νότιας Αφρικής το 2011 η σημαντικότερη απόφαση ήταν η παράταση του Πρωτοκόλλου του Κιότο έως ότου διαμορφωθεί μια νέα, καθολική και δεσμευτική συμφωνία, η οποία αναμένεται να ενεργοποιηθεί το 2020. Εκπρόσωποι από 194 χώρες, αποφάσισαν να αρχίσουν τις διαπραγματεύσεις για την τελική συμφωνία το 2012, με στόχο να έχει διατυπωθεί έως το 2015 και να τεθεί σε ισχύ το 2020. Μέχρι τότε, και με βασική απαίτηση των αναδυόμενων οικονομιών όπως η Κίνα και Ινδία, θα παραμένει σε ισχύ το Πρωτόκολλο του Κιότο, το οποίο δεσμεύει για μειώσεις των εκπομπών την ΕΕ και ορισμένες αναπτυγμένες χώρες. Επιπλέον, συμφωνήθηκαν οι λεπτομέρειες για το «Πράσινο Κλιματικό Ταμείο», που είχε διατυπωθεί στη σύνοδο του Κανκούν, χωρίς ωστόσο και πάλι να υπάρξει συμφωνία για το που θα βρεθούν τα χρήματα για τη χρηματοδότησή του (Προύντζου, 2012).

### **2.6 Ευρωπαϊκή Πολιτική**

Το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο του Μαρτίου 2007, επεσήμανε ότι, για να επιτευχθεί ο στόχος της Σύμβασης, η σταθεροποίηση δηλαδή των συγκεντρώσεων των αερίων θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα σε επίπεδα τα οποία αποτρέπουν την επικίνδυνη ανθρωπογενή παρεμβολή στο κλιματικό σύστημα, η συνολική ετήσια μέση αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του πλανήτη δεν θα πρέπει να υπερβεί τους 2°C σε σύγκριση με τα προ-βιομηχανικής εποχής επίπεδα. Για να επιτευχθεί αυτό, απαιτείται να μειωθούν οι παγκόσμιες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου μέχρι το 2050 σε ποσοστό τουλάχιστον 50% έναντι των επιπέδων του 1990.

Οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στην Κοινότητα θα πρέπει να συνεχίσουν να μειώνονται και πέραν του 2020 ως τμήμα των προσπαθειών της Κοινότητας να συμβάλει στην επίτευξη

αυτού του παγκόσμιου στόχου μείωσης των εκπομπών. Το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο του Μαρτίου 2007 αποφάσισε ότι, έως ότου συναφθεί παγκόσμια και συνολική συμφωνία για τη μετά το 2012 περίοδο, η Κοινότητα αναλαμβάνει μονομερή δέσμευση να επιτύχει μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου τουλάχιστον κατά 20% έως το 2020, σε σχέση με το 1990. Επιπλέον, το Συμβούλιο, ενέκρινε για την Κοινότητα στόχο μείωσης των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά 30% μέχρι το 2020, σε σχέση με το 1990, ώστε να συμβάλει στην επίτευξη παγκόσμιας και συνολικής συμφωνίας για τη μετά το 2012 εποχή, εφόσον και άλλες ανεπτυγμένες χώρες δεσμευθούν για ανάλογες μειώσεις εκπομπών και εφόσον οι οικονομικά πιο προηγμένες αναπτυσσόμενες χώρες συμβάλουν καταλλήλως ανάλογα με τις ευθύνες και τις δυνατότητές τους.

Το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο ενέκρινε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την κλιματική και ενεργειακή πολιτική με στόχο την καταπολέμηση της αλλαγής του κλίματος και την αύξηση της ενεργειακής ασφάλειας της ΕΕ, ενισχύοντας παράλληλα την ανταγωνιστικότητα της και την μετατροπή της σε μια ιδιαίτερα αποδοτική από ενεργειακή άποψη οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα.

Οι απαιτήσεις που υιοθετήθηκαν από τους αρχηγούς κρατών και κυβερνήσεων αφορούσαν:

- Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 20% κάτω από τα επίπεδα του 1990.
- 20% της κατανάλωσης ενέργειας της ΕΕ να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές.
- Μείωση κατά 20% στη χρήση πρωτογενούς ενέργειας σε σύγκριση με τα προβλεπόμενα επίπεδα μέσω τη βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης.

Οι παραπάνω απαιτήσεις είναι γνωστές ως στόχοι 20-20-20.

Τον Ιανουάριο του 2008 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή πρότεινε δεσμευτική νομοθεσία για την υλοποίηση των στόχων 20-20-20. Η γνωστή ως «δέσμη για το κλίμα και την ενέργεια», η οποία συμφωνήθηκε από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο τον Δεκέμβριο του 2008 και έγινε νόμος τον Ιούνιο του 2009, περιλαμβάνει τα παρακάτω νομοθετήματα:

1. Την Οδηγία 2009/29/ΕΚ «για τροποποίηση της οδηγίας 2003/87/ΕΚ με στόχο τη βελτίωση και την επέκταση του συστήματος εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπής αερίων θερμοκηπίου της Κοινότητας».
2. Την απόφαση 406/2009/ΕΚ «περί των προσπαθειών των κρατών μελών να μειώσουν τις οικείες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, ώστε να τηρηθούν οι δεσμεύσεις της Κοινότητας για μείωση των εκπομπών αυτών μέχρι το 2020». Για να συμφέρει οικονομικά η επιδιωκόμενη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά 20%

έναντι των επιπέδων του 1990 μέχρι το 2020, θα πρέπει να συμβάλουν στις μειώσεις των εκπομπών όλοι οι τομείς της οικονομίας. Συνεπώς, τα κράτη μέλη θα πρέπει να εφαρμόσουν πρόσθετες πολιτικές και μέτρα σε μια προσπάθεια περαιτέρω περιορισμού των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου από πηγές που δεν καλύπτει η οδηγία 2003/87/EK. Η απόφαση αφορά τον επιμερισμό της προσπάθειας των Κ-Μ για μείωση των εκπομπών από τομείς που δεν καλύπτονται από το σύστημα εμπορίας, όπως οι μεταφορές, ο οικιακός τομέας, η γεωργία και τα απόβλητα.

3. Οδηγία 2009/28/EK «σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές». Δεσμευτικοί εθνικοί στόχοι αποβλέπουν σε συμμετοχή των ΑΠΕ κατά 20% στην ενεργειακή κατανάλωση σε επίπεδο ΕΕ. Οι στόχοι θα συμβάλουν στη μείωση της εξάρτησης της ΕΕ από τις εισαγωγές ενέργειας και στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.
4. Οδηγία 2009/31/EK «σχετικά με την αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα σε γεωλογικούς σχηματισμούς». Ένα νομικό πλαίσιο για την προώθηση της ανάπτυξης και την ασφαλή χρήση της δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCS). Η ΕΕ σκοπεύει να δημιουργηθεί ένα δίκτυο μονάδων επίδειξης CCS μέχρι το 2015 για να δοκιμάσει τη βιωσιμότητά της, με σκοπό την εμπορική εφαρμογή της μέχρι το 2020 περίπου.
5. Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης γίνεται μέσω του σχεδίου δράσης για την ενεργειακή απόδοση της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου, η Επιτροπή αναλαμβάνει πρωτοβουλίες για να κινητοποιήσει την κοινή γνώμη, τους φορείς λήψης αποφάσεων και των φορέων της αγοράς και θεσπίζει ελάχιστα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης και κανόνες για την επισήμανση των προϊόντων, υπηρεσιών και υποδομών (ΥΠΕΚΑ, 2009).

### **2.6.1 Ευρωπαϊκός Ενεργειακός Χάρτης Πορείας για το 2050**

Στον ενεργειακό χάρτη πορείας για το 2050 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή διερευνά τις προκλήσεις που θέτει η επίτευξη του στόχου της ΕΕ για την απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού και την ανταγωνιστικότητα. Τα σενάρια που παρουσιάζονται στον ενεργειακό χάρτη πορείας για το 2050 διερευνούν διαδρομές προς την απαλλαγή του ενεργειακού συστήματος από τις ανθρακούχες εκπομπές. Όλα τα σενάρια συνεπάγονται σημαντικές αλλαγές, για παράδειγμα,

στις τιμές του διοξειδίου άνθρακα, την τεχνολογία και τα δίκτυα. Συνοπτικά, οι δέκα διαρθρωτικές αλλαγές για τον μετασχηματισμό του ενεργειακού συστήματος είναι:

1. Η απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές είναι δυνατή και μπορεί μακροπρόθεσμα να είναι λιγότερο δαπανηρή από τις τρέχουσες πολιτικές.
2. Υψηλότερες κεφαλαιουχικές δαπάνες και χαμηλότερο κόστος καυσίμων.
3. Η ηλεκτρική ενέργεια διαδραματίζει σπουδαιότερο ρόλο.
4. Οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας θα αυξάνονται έως το 2030 και ακολούθως θα φθίνουν.
5. Οι δαπάνες των νοικοκυριών θα αυξηθούν.
6. Είναι απαραίτητη η εξοικονόμηση ενέργειας σε ολόκληρο το σύστημα.
7. Σημαντική αύξηση των ΑΠΕ.
8. Η δέσμευση και αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα θα διαδραματίσει καίριο ρόλο στο μετασχηματισμό του συστήματος.
9. Σημαντικό το μερίδιο της πυρηνικής ενέργειας.
10. Εντεινόμενη αλληλεπίδραση μεταξύ αποκεντρωμένων και κεντρικών συστημάτων.

Ο ενεργειακός χάρτης πορείας για το 2050 δείχνει ότι η απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές είναι εφικτή. Ο μετασχηματισμός του ευρωπαϊκού ενεργειακού συστήματος είναι επιτακτικός για λόγους κλίματος, ασφάλειας και οικονομίας. Οι αποφάσεις που λαμβάνονται σήμερα διαμορφώνουν ήδη το ενεργειακό σύστημα του 2050. Για να πραγματοποιηθεί έγκαιρα ο απαραίτητος μετασχηματισμός του ενεργειακού συστήματος, χρειάζεται να επιδείξει η ΕΕ πολύ περισσότερο φιλόδοξη πολιτική βούληση και μεγαλύτερη αίσθηση του επείγοντος του θέματος.

Ο χάρτης πορείας δείχνει ότι, παρόλο που οι τιμές θα αυξάνονται έως λίγο-πολύ το 2030, τα νέα ενεργειακά συστήματα είναι ικανά να οδηγήσουν σε μείωση των τιμών μετά το έτος αυτό. Η κοινωνία πρέπει να είναι προετοιμασμένη και να προσαρμοστεί σε υψηλότερες ενεργειακές τιμές τα επόμενα έτη. Οι εύλωτοι πελάτες και οι ενεργοβόρες βιομηχανίες ενδεχομένως να χρειαστούν προσωρινή στήριξη. Το σαφές μήνυμα είναι ότι οι επενδύσεις θα είναι αποδοτικές, από πλευράς οικονομικής μεγέθυνσης, απασχόλησης, μεγαλύτερης ασφάλειας ενεργειακού εφοδιασμού και χαμηλότερου κόστους καυσίμων. Ο μετασχηματισμός δημιουργεί ένα νέο τοπίο για την Ευρωπαϊκή βιομηχανία και μπορεί να αυξήσει την ανταγωνιστικότητα.

Για να επιτευχθεί αυτό το νέο ενεργειακό σύστημα, πρέπει να πληρούνται δέκα προϋποθέσεις:



1. Άμεση προτεραιότητα είναι η πλήρης εφαρμογή της ενωσιακής στρατηγικής «Ενέργεια 2020».
2. Πρέπει να αυξηθεί δραστικά η ενεργειακή απόδοση του ενεργειακού συστήματος και της κοινωνίας στο σύνολό της.
3. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να συνεχίσει να δίνεται στην ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
4. Η προώθηση της τεχνολογικής καινοτομίας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για να γίνει δυνατή η εμπορική αξιοποίηση νέων τεχνολογιών.
5. Η δέσμευση της Ευρωπαϊκής Ένωσης για μια πλήρως ολοκληρωμένη εσωτερική αγορά μέχρι το 2014.
6. Οι τιμές της ενέργειας πρέπει να αντανακλούν καλύτερα το κόστος, ιδίως των νέων επενδύσεων που απαιτούνται σε όλο το ενεργειακό σύστημα. Ειδικά μέτρα θα πρέπει να καθοριστούν σε εθνικό και τοπικό επίπεδο για την αποφυγή της ενεργειακής ένδειας.
7. Η κρισιμότητα της ανάγκης ανάπτυξης νέων ενεργειακών υποδομών και δυνατοτήτων αποθήκευσης να γίνει ευρέως αντιληπτή.
8. Η ασφάλεια παραδοσιακών ή νέων μορφών πηγών ενέργειας είναι αδιαπραγμάτευτη και η ΕΕ θα συνεχίσει να αναλαμβάνει διεθνώς πρωτοβουλίες προς την κατεύθυνση αυτή.
9. Η συντονισμένη Ευρωπαϊκή δράση στις διεθνείς σχέσεις να αποτελεί κανόνα με ενίσχυση των προσπαθειών για διεθνείς δράσεις για το κλίμα.
10. Οι χώρες μέλη και οι επενδυτές χρειάζονται ορόσημα, γι αυτό είναι απαραίτητη η θέσπιση πολιτικού πλαισίου προς το 2030 (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2011).

#### **2.6.2 Οδηγία 2009/31/ΕΚ «αποθήκευση CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς»**

Ο στόχος της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) με την Οδηγία 2009/31/ΕΚ «σχετικά με την αποθήκευση CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς» του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Απριλίου 2009 ήταν η θέσπιση ενός νομικού πλαισίου για την περιβαλλοντικά ασφαλή αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα σε γεωλογικούς σχηματισμούς ως συμβολή στην καταπολέμηση της αλλαγής του κλίματος. Συνοπτικά τα σημαντικότερα σημεία της οδηγίας είναι τα παρακάτω:

- Η οδηγία εφαρμόζεται στην αποθήκευση CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς εντός της επικράτειας των κρατών μελών, εντός των αποκλειστικών οικονομικών ζωνών τους και στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα τους.
- Η οδηγία δεν εφαρμόζεται στην αποθήκευση CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς με αποθηκευτική ικανότητα κάτω των 100 χιλιοτόνων.
- Δεν επιτρέπεται η αποθήκευση CO<sub>2</sub> στη στήλη ύδατος ή σε τόπο αποθήκευσης με συγκρότημα αποθήκευσης που εκτείνεται πέραν της επικράτειας, των αποκλειστικών οικονομικών ζωνών ή της ηπειρωτικής υφαλοκρηπίδας των κρατών μελών.
- Επιλογή και εξερεύνηση των τόπων αποθήκευσης

Ένας γεωλογικός σχηματισμός επιλέγεται ως τόπος αποθήκευσης μόνον εάν, υπό τις προτεινόμενες προϋποθέσεις χρήσης, δεν υφίσταται σημαντικός κίνδυνος διαρροών, ούτε σημαντικός κίνδυνος για το περιβάλλον ή την υγεία. Η καταλληλότητα ενός γεωλογικού σχηματισμού για χρήση του ως τόπου αποθήκευσης κρίνεται κατόπιν χαρακτηρισμού και αξιολόγησης του δυνητικού συγκροτήματος αποθήκευσης και της γύρω περιοχής κατ' εφαρμογή των κριτηρίων που ορίζονται στο παράρτημα I της οδηγίας. Ο χαρακτηρισμός ενός τόπου αποθήκευσης διενεργείται σε τρεις φάσεις:

- Φάση 1: Συλλογή δεδομένων που αφορούν τον τόπο αποθήκευσης (γεωλογία, υδρογεωλογία, σεισμικότητα, κλπ.) και τη γύρω περιοχή (πληθυσμός, γειτνίαση με προστατευόμενους πόρους ή τόπους, κλπ).
- Φάση 2: Εκπόνηση πληροφορικών μοντέλων βάσει των συλλεχθέντων δεδομένων, προκειμένου να χαρακτηρισθεί ο τόπος από διάφορες απόψεις (γεωολογική δομή, γεωμηχανικές και γεωχημικές ιδιότητες, διαθέσιμος όγκος, κλπ.).
- Φάση 3: Χαρακτηρισμός της δυναμικής συμπεριφοράς της αποθήκευσης, χαρακτηρισμός ευαισθησίας, εκτίμηση κινδύνου.

Οι απαιτούμενες εξερευνήσεις για την παραγωγή των πληροφοριών που είναι αναγκαίες για την επιλογή ενός τόπου αποθήκευσης δεν διενεργούνται χωρίς άδεια. Η άδεια εκδίδεται από την αρμόδια αρχή κάθε κράτους μέλους για το χρονικό διάστημα που απαιτείται για τη διεξαγωγή της εξερεύνησης του τόπου. Ωστόσο, μπορεί να χορηγηθεί παράταση της άδειας προκειμένου να ολοκληρωθεί η εν λόγω εξερεύνηση. Ο κάτοχος άδειας εξερεύνησης έχει αποκλειστικό δικαίωμα εξερεύνησης του δυνητικού συγκροτήματος αποθήκευσης CO<sub>2</sub>. Τα κράτη μέλη μεριμνούν ώστε να μην

επιτρέπονται αντικρουόμενες χρήσεις του συγκροτήματος κατά τη διάρκεια ισχύος της άδειας.

- Άδειες αποθήκευσης

Δεν μπορεί να διενεργηθεί εκμετάλλευση τόπου αποθήκευσης χωρίς άδεια. Οι αιτήσεις άδειας αποθήκευσης πρέπει να υποβάλλονται στην αρμόδια αρχή κάθε κράτους μέλους και να περιλαμβάνουν ορισμένες πληροφορίες σχετικά με το φορέα εκμετάλλευσης, το χαρακτηρισμό του τόπου και του συγκροτήματος αποθήκευσης και την αξιολόγηση της αναμενομένης ασφάλειας της αποθήκευσης, τη συνολική ποσότητα CO<sub>2</sub> που θα εγχυθεί και τη σύνθεση των ρευμάτων CO<sub>2</sub>, τα μέτρα πρόληψης, το προτεινόμενο σχέδιο παρακολούθησης, τα διορθωτικά μέτρα, το προσωρινό σχέδιο μετά το κλείσιμο, την απόδειξη χρηματικής εγγύησης, κλπ. Η αρμόδια αρχή οφείλει να επαληθεύει ότι τηρούνται οι συναφείς απαιτήσεις της παρούσας οδηγίας και των άλλων νομοθετικών πράξεων της ευρωπαϊκής νομοθεσίας και ότι η διαχείριση του τόπου αποθήκευσης διενεργείται από πρόσωπο αξιόπιστο και τεχνικά ικανό. Τα κράτη μέλη οφείλουν να υποβάλλουν στην Επιτροπή τα σχέδια αδειών αποθήκευσης εντός μηνός από την παραλαβή τους. Εν συνεχεία, η Επιτροπή διαθέτει προθεσμία τεσσάρων μηνών για να εκδώσει μη δεσμευτική γνώμη σχετικά με τις άδειες σε μορφή σχεδίου. Η αρμόδια αρχή οφείλει να λαμβάνει υπόψη τη γνώμη αυτή όταν αποφασίζει για την έκδοση άδειας και να δικαιολογεί την τελική της απόφαση έναντι της Επιτροπής εάν η απόφαση αυτή αποκλίνει από τη γνώμη που διατύπωσε η Επιτροπή. Δεν επιτρέπεται η πραγματοποίηση ουσιαστών μεταβολών χωρίς να έχει εκδοθεί νέα ή ενημερωμένη άδεια αποθήκευσης σύμφωνα με την οδηγία. Η αρμόδια αρχή επανεξετάζει την κατάσταση και επικαιροποιεί ή, ως έσχατο μέτρο, ανακαλεί την άδεια αποθήκευσης:

- Σε περίπτωση διαπίστωσης σημαντικών ανωμαλιών ή διαρροών.
- Σε περίπτωση μη συμμόρφωσης προς τις προϋποθέσεις της άδειας, ή σε περίπτωση κινδύνου σημαντικών ανωμαλιών ή διαρροών.
- Λόγω τυχόν αδυναμίας του φορέα εκμετάλλευσης να τηρήσει τις προϋποθέσεις ισχύος της άδειας.
- Βάσει των επιστημονικών πορισμάτων και της τεχνολογικής εξέλιξης.
- Σε κάθε περίπτωση πέντε έτη από τη χορήγηση της άδειας και στη συνέχεια ανά δεκαετία.

- Υποχρεώσεις κατά την περίοδο εκμετάλλευσης, το κλείσιμο και μετά το κλείσιμο  
Δεν επιτρέπεται να προστίθενται απόβλητα ή άλλες ύλες σε ρεύματα CO<sub>2</sub> με σκοπό τη διάθεση των εν λόγω αποβλήτων ή άλλων υλών. Οι συγκεντρώσεις ουσιών που τυχαίνει να είναι παρούσες σε ρεύματα CO<sub>2</sub> πρέπει να είναι κατώτερες από τα επίπεδα τα οποία επηρεάζουν αρνητικά την ακεραιότητα του τόπου αποθήκευσης και των υποδομών ή συνεπάγονται σημαντικό κίνδυνο για το περιβάλλον. Ο φορέας εκμετάλλευσης οφείλει να αποδεικνύει ότι τα ρεύματα CO<sub>2</sub> πληρούν αυτά τα κριτήρια και να τηρεί μητρώο των παραδιδόμενων ρευμάτων CO<sub>2</sub>.  
Ο φορέας εκμετάλλευσης οφείλει να παρακολουθεί τις εγκαταστάσεις έγχυσης, το συγκρότημα αποθήκευσης και, κατά περίπτωση, το γύρω περιβάλλον, σύμφωνα με το σχέδιο παρακολούθησης που έχει εγκρίνει η αρμόδια αρχή. Η παρακολούθηση έχει σκοπό ιδίως τη σύγκριση της πραγματικής συμπεριφοράς του CO<sub>2</sub> με τα προκαταρτισμένα μοντέλα συμπεριφοράς του, και την ανίχνευση σημαντικών ανωμαλιών, μετανάστευσης του CO<sub>2</sub> και διαρροών CO<sub>2</sub> και αρνητικών επενεργειών στο περιβάλλον και στον πληθυσμό. Το σχέδιο παρακολούθησης επικαιροποιείται ανά πενταετία τουλάχιστον.  
Τουλάχιστον μία φορά κατ' έτος, ο φορέας εκμετάλλευσης οφείλει να διαβιβάζει στην αρμόδια αρχή ορισμένες πληροφορίες σχετικά ιδίως με τα αποτελέσματα της παρακολούθησης του τόπου αποθήκευσης, τις ποσότητες και τα χαρακτηριστικά των ρευμάτων CO<sub>2</sub>, καθώς και απόδειξη της διατήρησης της χρηματικής εγγύησης.  
Η αρμόδια αρχή οφείλει να εξασφαλίζει τη διενέργεια τακτικών επιθεωρήσεων (τουλάχιστον μία φορά κατ' έτος) ή έκτακτων επιθεωρήσεων (για παράδειγμα, σε περίπτωση διαρροών, σε περίπτωση σημαντικών ανωμαλιών, σε περίπτωση μη συμμόρφωσης προς τις προϋποθέσεις ισχύος της άδειας ή σε περίπτωση σοβαρών καταγγελιών σχετικά με το περιβάλλον ή την ανθρώπινη υγεία) των τόπων αποθήκευσης. Η έκθεση που συντάσσεται μετά από κάθε επιθεώρηση ανακοινώνεται στον φορέα εκμετάλλευσης και δημοσιοποιείται.  
Σε περίπτωση διαρροών, ο φορέας εκμετάλλευσης οφείλει να ειδοποιεί αμέσως την αρμόδια αρχή και να λαμβάνει τα αναγκαία διορθωτικά μέτρα, όπως αυτά περιγράφονται στο σχέδιο διορθωτικών μέτρων που έχει εγκρίνει η αρμόδια αρχή. Η αρμόδια αρχή μπορεί να ζητήσει από τον φορέα εκμετάλλευσης να λάβει πρόσθετα μέτρα και, σε περίπτωση αδράνειας του φορέα εκμετάλλευσης, να λάβει η ίδια διορθωτικά μέτρα με δαπάνη του φορέα εκμετάλλευσης.

Ένας χώρος αποθήκευσης κλείνει εάν πληρούνται οι δηλούμενες στην άδεια σχετικές προϋποθέσεις, εάν το ζητήσει ο φορέας εκμετάλλευσης ή αν το αποφασίσει η αρμόδια αρχή μετά την ανάκληση της άδειας αποθήκευσης. Μετά το κλείσιμο τόπου αποθήκευσης, ο φορέας εκμετάλλευσης παραμένει υπεύθυνος για τον τόπο αποθήκευσης, καθώς και για τη σφράγιση του τόπου αποθήκευσης και την απομάκρυνση του εξοπλισμού έγχυσης. Ο φορέας εκμετάλλευσης εκπληρώνει τις ίδιες υποχρεώσεις με εκείνες που είχε κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης, σύμφωνα με το προσωρινό σχέδιο μετά το κλείσιμο που έχει εγκρίνει η αρμόδια αρχή. Η ευθύνη στη συνέχεια μεταβιβάζεται στην αρμόδια αρχή, εάν και όταν όλα τα διαθέσιμα στοιχεία δείχνουν ότι το αποθηκευμένο CO<sub>2</sub> θα διατηρείται πλήρως και μόνιμως απομονωμένο, ότι έχει παρέλθει μία ελάχιστη περίοδος, ότι οι οικονομικές υποχρεώσεις έχουν εκπληρωθεί, ότι έχει σφραγισθεί ο τόπος και ότι έχει απομακρυνθεί ο εξοπλισμός έγχυσης. Μετά τη μεταβίβαση της ευθύνης, οι τακτικές επιθεωρήσεις παύουν, η δε παρακολούθηση μπορεί να περιορίζεται σε επίπεδο που να επιτρέπει την ανίχνευση διαρροών ή σημαντικών ανωμαλιών. Σε περίπτωση ανάκλησης της άδειας αποθήκευσης, η αρμόδια αρχή αναλαμβάνει τις υποχρεώσεις που αναφέρονται ανωτέρω και ανακτά όλες τις δαπάνες που πραγματοποιήθηκαν από τον πρώην φορέα εκμετάλλευσης έως ότου εκπληρωθούν όλες οι προϋποθέσεις οριστικής μεταβίβασης της ευθύνης στην αρμόδια αρχή (έως ότου όλα τα διαθέσιμα στοιχεία δείχνουν ότι το αποθηκευμένο CO<sub>2</sub> θα διατηρείται πλήρως και μόνιμως απομονωμένο).

- Άλλες διατάξεις

Οι φορείς εκμετάλλευσης, πριν από την υποβολή αίτησης για άδεια αποθήκευσης, οφείλουν να παράσχουν χρηματική εγγύηση ή τυχόν άλλο ισοδύναμο εχέγγυο της εκπλήρωσης των υποχρεώσεων που προκύπτουν κατά την περίοδο εκμετάλλευσης, το κλείσιμο και μετά το κλείσιμο του τόπου αποθήκευσης.

Τα κράτη μέλη οφείλουν να διασφαλίσουν την παροχή στους δυνητικούς χρήστες δίκαιης και ανοικτής πρόσβασης στα δίκτυα μεταφοράς CO<sub>2</sub> και στους τόπους αποθήκευσης CO<sub>2</sub>. Οφείλουν επίσης να καθιερώσουν μηχανισμούς επίλυσης διαφορών, να συνεργάζονται μεταξύ τους σε περίπτωση διασυνοριακών συμβάντων, να τηρούν μητρώο όλων των τόπων αποθήκευσης που έχουν κλείσει και να το διαβιβάζουν στην Επιτροπή, και να υποβάλλουν στην Επιτροπή ανά τριετία (την πρώτη φορά έως τις 30 Ιουνίου 2011) έκθεση σχετικά με την εφαρμογή της οδηγίας.

Η οδηγία 2009/31/ΕΚ εντάσσεται στη «δέσμη μέτρων σχετικά με την ενέργεια και τις κλιματικές αλλαγές» που πρότεινε η Επιτροπή στις αρχές του 2008.

Η προθεσμία ενσωμάτωσης στο εθνικό δίκαιο παρήλθε την 25/6/2011.

### **2.7 Εθνική Πολιτική**

Η Ελλάδα υπέγραψε το Πρωτόκολλο Κιότο τον Απρίλιο του 1998, παράλληλα με τα υπόλοιπα Κράτη Μέλη της Ε.Ε. και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Όλα τα Κ-Μ της ΕΕ κύρωσαν το Πρωτόκολλο τον Μάιο 2002. Η Ελλάδα το κύρωσε με το Νόμο 3017/2002 (ΦΕΚ Α'117).

Η Ελλάδα σύμφωνα με την απόφαση αυτή, δεσμεύεται να περιορίσει την αύξηση των εκπομπών της στο +25% για το διάστημα 2008-2012, προκειμένου να συνεισφέρει στο κοινό στόχο της ΕΕ για 8% μείωση των εκπομπών της για το αυτό διάστημα. Προκειμένου η Ελλάδα να ανταποκριθεί στις υποχρεώσεις που απορρέουν από την κύρωση του Πρωτοκόλλου του Κιότο (ΦΕΚ 117/Α/30-5-02) και την αντίστοιχη κοινοτική συμφωνία, το Υ.Π.Ε.Κ.Α. προχώρησε στην εκπόνηση Εθνικού Προγράμματος μείωσης εκπομπών αερίων φαινομένου θερμοκηπίου για την περίοδο 2000-2010.

Το Πρόγραμμα αυτό συντονίζει τις δραστηριότητες του ιδιωτικού και δημόσιου τομέα με στόχο τον περιορισμό των αερίων του θερμοκηπίου και περιλαμβάνει δυνατές επεμβάσεις μείωσης εκπομπών, με μέτρα στους παρακάτω τομείς: οικιακό και τριτογενή τομέα, μεταφορές, βιομηχανία, ηλεκτροπαραγωγή, διαχείριση απορριμμάτων, γεωργία, βιομηχανικές διεργασίες. Η υλοποίηση του Εθνικού Προγράμματος μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για την περίοδο 2000-2010, το οποίο εγκρίθηκε από το Υπουργικό Συμβούλιο με την πράξη του 5/27.2.2003 (ΦΕΚ 58Α/5.3.03), εξαρτάται από τις επί μέρους δράσεις των εμπλεκόμενων Υπουργείων και την μεταξύ τους συνεργασία.

Το Υ.Π.Ε.Κ.Α. είναι αρμόδιο βάσει του κυρωτικού νόμου του Πρωτοκόλλου του Κιότο για την εφαρμογή του και την παρακολούθηση της εφαρμογής του Εθνικού Προγράμματος. Είναι επίσης υπεύθυνο για τη σύνταξη των ετήσιων απογραφών εκπομπών και των Εθνικών Εκθέσεων Προόδου που υποβάλλονται προς την Ε.Ε. και τον ΟΗΕ, μέσω των οποίων παρακολουθεί την πορεία των εκπομπών και των περιλαμβανομένων στο Εθνικό Πρόγραμμα μέτρων (ΥΠΕΚΑ, 2009).

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 2.4 για την περίοδο μέχρι το 2020 η Ευρωπαϊκή Ενεργειακή Πολιτική επικεντρώνεται στην επίτευξη συγκεκριμένων επιμέρους στόχων για το σύνολο των Κρατών-Μελών, οι οποίοι για την Ελλάδα εξειδικεύονται σε μείωση κατά 4%

των εκπομπών αερίων ρύπων του θερμοκηπίου στους τομείς εκτός εμπορίας σε σχέση με τα επίπεδα του 2005 και σε 18% διείσδυση των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση.

Η Ελληνική κυβέρνηση στο πλαίσιο υιοθέτησης συγκεκριμένων αναπτυξιακών και περιβαλλοντικών πολιτικών, με το Νόμο 3851/2010 προχώρησε στην αύξηση του εθνικού στόχου συμμετοχής των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας στο 20%. Ο στόχος αυτός εξειδικεύεται σε 40% συμμετοχή των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, 20% σε θέρμανση και ψύξη και 10% στις μεταφορές.

Το 1<sup>ο</sup> Σχέδιο Δράσης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, που ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 2010 στο πλαίσιο της Οδηγίας 2009/28/ΕΚ, είναι στην ουσία ένα ευρύτερο Σχέδιο Δράσης για την επίτευξη των λεγόμενων στόχων 20-20-20 μέχρι το 2020. Το Σχέδιο ενσωματώνει και τους στόχους Εξοικονόμησης Ενέργειας που περιλαμβάνονται στο 1<sup>ο</sup> και στο 2<sup>ο</sup> Σχέδιο Δράσης για την Ενεργειακή Απόδοση (τα οποία περιγράφουν τα αναγκαία μέτρα βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης μέχρι το 2016) και τους προβάλλει μέχρι το 2020.

Επιπλέον, συνυπολογίζεται το σύνολο των πρόσφατων θεσμικών αλλαγών που αφορούν στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στον κτιριακό τομέα καθώς και στην ανάπτυξη μηχανισμών της αγοράς και εφαρμογής συγκεκριμένων μέτρων και πολιτικών που αποσκοπούν στην επίτευξη του συγκεκριμένου εθνικού στόχου για εξοικονόμηση ενέργειας.

Αναφορικά με τις ΑΠΕ, οι εθνικοί στόχοι για το 2020, αναμένεται να ικανοποιηθούν για την ηλεκτροπαραγωγή με την ανάπτυξη περίπου 13,3GW από ΑΠΕ, που αφορούν 7,5GW αιολικά, 2,5GW φωτοβολταϊκά και 3GW υδροηλεκτρικά. Ήδη η εγκατεστημένη ισχύς και η αδειοδοτική διαδικασία δείχνουν ότι είμαστε στη σωστή πορεία για την επίτευξη των εθνικών μας στόχων.

Με αφετηρία το 1<sup>ο</sup> Σχέδιο Δράσης για τις ΑΠΕ, η Εθνική Επιτροπή Ενεργειακής Στρατηγικής του Υπουργείου Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής επιμελήθηκε μια σε βάθος και με μακροχρόνιο ορίζοντα ανάλυση του Ελληνικού Ενεργειακού Συστήματος με στόχο τη διαμόρφωση του Ενεργειακού Χάρτη Πορείας της Ελλάδας για την περίοδο 2020-2050. Η πορεία αυτή θα μπορεί να εντάσσεται στο γενικότερο πλαίσιο των σχεδιασμών της Ε.Ε., που αποβλέπει στην μεγιστοποίηση της δυνατότητας διασυνοριακών συναλλαγών, με τον κατάλληλο σχεδιασμό των δικτύων.

Πυρήνας του σχεδιασμού του ενεργειακού συστήματος, αποτελεί η προστασία και το όφελος του καταναλωτή, ο οποίος θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα χρήσης των βέλτιστων επιλογών για την κάλυψη των αναγκών του, ενώ θα μπορεί να επιλέγει από ένα πλήθος ενεργειακών

υπηρεσιών στο πλαίσιο λειτουργίας μιας ολοκληρωμένης ενεργειακής αγοράς (ΥΠΕΚΑ, 2012).

Αξίζει να σημειωθεί ότι, μετά το 2012, σύμφωνα με την Οδηγία 2009/29/ΕΚ η ηλεκτροπαραγωγή από συμβατικά καύσιμα θα επιβαρύνεται με το κόστος αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών που εκτιμάται ότι θα κυμαίνεται στο ύψος των 20 €/MWh, για το ελληνικό σύστημα (ΥΠΕΚΑ, 2010).

### **2.7.1 Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός: Οδικός Χάρτης για το 2050**

Η μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενη ενέργεια, η μεγιστοποίηση της διείσδυσης των ΑΠΕ, η επίτευξη σημαντικής μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) μέχρι το 2050, καθώς και η προστασία του τελικού καταναλωτή αποτελούν τους βασικούς άξονες του εθνικού ενεργειακού σχεδιασμού. Ταυτόχρονα, η μηδενική αξιοποίηση της πυρηνικής ενέργειας και η πολύ περιορισμένη χρήση της τεχνολογίας δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCS) λόγω τεχνικοοικονομικών αβεβαιοτήτων που συνδέονται με αυτή την τεχνολογία, αποτελούν με τη σειρά τους ουσιαστικές επιλογές στο πλαίσιο του σχεδιασμού.

Για το διάστημα έως το 2020 οι κατευθυντήριες γραμμές έχουν ήδη υιοθετηθεί, με το 1<sup>ο</sup> Σχέδιο Δράσης για τις ΑΠΕ. Λαμβάνοντας υπόψη το Σχέδιο αυτό, τις κατευθυντήριες γραμμές της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για την περίοδο 2020-2050, καθώς και την εξέλιξη μιας σειράς βασικών παραμέτρων (οικονομική δραστηριότητα ανά κλάδο, διεθνείς τιμές καυσίμων, τιμές CO<sub>2</sub>, επίπεδο χρήσης λιγνίτη, κ.α.) μελετήθηκαν τρία σενάρια ώστε να προσδιορισθούν και να αξιολογηθούν εναλλακτικά μέτρα και πολιτικές για την εκπλήρωση των Εθνικών και των Ευρωπαϊκών στόχων.

Τα σενάρια που μελετήθηκαν περιγράφονται συνοπτικά ως εξής:

- Το Σενάριο «Υφιστάμενων πολιτικών» (Σενάριο ΥΦ) υποθέτει συντηρητική υλοποίηση των πολιτικών για την ενέργεια και το περιβάλλον. Προβλέπεται μέτριο επίπεδο περιορισμού των αερίων του θερμοκηπίου μέχρι το 2050 τουλάχιστον κατά 40% σε σχέση με το 2005. Προβλέπονται επίσης μέτριες διεισδύσεις τεχνολογιών ΑΠΕ και εξοικονόμησης ενέργειας ως συνέπεια των συντηρητικών πολιτικών υλοποίησής του.
- Το Σενάριο «Μέτρων Μεγιστοποίησης ΑΠΕ» (Σενάριο ΜΕΑΠ) υποθέτει τη μεγιστοποίηση της διείσδυσης των ΑΠΕ στα επίπεδα του 100% στην ηλεκτροπαραγωγή και σε πολύ μεγάλη κλίμακα συνολικά, με στόχο τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 60%-70%, με μεγάλη εξοικονόμηση



ενέργειας στα κτίρια και τις μεταφορές. Το ίδιο σενάριο εξετάζεται με χρήση εισαγωγών ηλεκτρικής ενέργειας που θα φέρουν μείωση του κόστους στον τομέα ηλεκτρισμού λόγω λιγότερων επενδύσεων και αγορών ηλεκτρικής ενέργειας σε χαμηλότερες τιμές (Σενάριο ΜΕΑΠ-α).

- Το Σενάριο «Περιβαλλοντικών Μέτρων Ελαχίστου Κόστους» (Σενάριο ΠΕΚ) όπου το μίγμα των ενεργειακών τεχνολογιών επιλέγεται με βάση την πολιτική ελαχίστου κόστους για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 60%-70%, ενώ παράλληλα γίνεται μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια και τις μεταφορές. Το επίπεδο διεύθυνσης των ΑΠΕ είναι μεγάλο αλλά δεν ξεπερνάει το 85% στην ηλεκτροπαραγωγή λόγω του περιορισμού στις απαιτούμενες μονάδες αποθήκευσης. Ειδικά βάσει των υποθέσεων που διαμορφώνονται για το Σενάριο ΠΕΚ, μελετάται και ένα εναλλακτικό σενάριο (Σενάριο ΠΕΚ-α), στο οποίο γίνεται η υπόθεση ότι την περίοδο 2035-2040 εντάσσεται σε δύο από τις υπάρχουσες (και νεότερες) ατμοηλεκτρικές μονάδες λιγνίτη (ισχύος 1,1GW) τεχνολογία δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα (CCS). Το εναλλακτικό αυτό σενάριο στην ουσία εξετάζει την δυνατότητα παράτασης της παραμονής του εγχώριου στερεού καυσίμου στο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής.

Η μελλοντική εικόνα του ενεργειακού συστήματος όπως προκύπτει από τα δύο βασικά σενάρια ενεργειακής πολιτικής μπορεί να συνοψισθεί στα παρακάτω 10 σημεία:

1. Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 60%-70% έως το 2050 ως προς το 2005.
2. Ποσοστό 85-100 % ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, με την αξιοποίηση όλων των εμπορικά ώριμων τεχνολογιών.
3. Συνολική διεύθυνση ΑΠΕ σε ποσοστό 60%-70% στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας μέχρι το 2050.
4. Σταθεροποίηση της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης λόγω των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας.
5. Σχετική αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας λόγω εξηλεκτρισμού των μεταφορών και μεγαλύτερης χρήσης αντλιών θερμότητας στον οικιακό και τριτογενή τομέα.
6. Σημαντική μείωση της κατανάλωσης πετρελαιοειδών.
7. Αύξηση της χρήσης βιοκαυσίμων στο σύνολο των μεταφορών στο επίπεδο του 31% – 34% μέχρι το 2050.

8. Κυρίαρχο το μερίδιο του ηλεκτρισμού στις επιβατικές μεταφορές μικρής απόστασης (45%) και σημαντική αύξηση του μεριδίου των μέσων σταθερής τροχιάς.
9. Σημαντικά βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση για το σύνολο του κτιριακού αποθέματος και μεγάλη διείσδυση των εφαρμογών ΑΠΕ στον κτιριακό τομέα.
10. Ανάπτυξη μονάδων αποκεντρωμένης παραγωγής και έξυπνων δικτύων.

Το πρώτο κρίσιμο συμπέρασμα της ανάλυσης είναι ότι η προοπτική των υφιστάμενων πολιτικών (Σενάριο ΥΦ) οδηγεί σε περιορισμένη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> έως το 2050, που δεν συνάδει με τους ευρωπαϊκούς στόχους για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής ούτε αποτελεί την οικονομικότερη εξέλιξη του ενεργειακού τομέα.

Τα σενάρια νέας ενεργειακής πολιτικής (Σενάρια ΜΕΑΠ και ΠΕΚ), στα οποία κυριαρχεί η υψηλή διείσδυση των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας, επιτυγχάνουν μεγάλη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> (κατά 60% με 70% σε σχέση με το 2005) με ταυτόχρονη μείωση της εισαγόμενης ενέργειας καθώς και της ενεργειακής εξάρτησης της χώρας από εισαγωγές ορυκτών καυσίμων.

Είναι αξιοσημείωτο ότι μακροπρόθεσμα το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας δεν παρουσιάζει σημαντική διαφοροποίηση για τα διάφορα σενάρια, εμφανίζοντας ελαφρά μικρότερες τιμές για τα σενάρια μειωμένων εκπομπών. Συγκεκριμένα, ακολουθεί πτωτική τάση μετά το 2030 ενώ η αυξημένη χρήση των ΑΠΕ και ο περιορισμός της καύσης ορυκτών καυσίμων εξασφαλίζει την περαιτέρω μείωση του κόστους μέχρι το 2050.

Η προσέλκυση και μόχλευση επενδυτικών κεφαλαίων, για την υλοποίηση των προβλεπόμενων από τον ενεργειακό σχεδιασμό τεχνολογικών αλλαγών στο ελληνικό ενεργειακό σύστημα, αποτελεί ιδιαίτερα σημαντική ευκαιρία εγχώριας οικονομικής ανάπτυξης σε διάφορους κλάδους οικονομικής δραστηριότητας (π.χ. ενεργειακός, κατασκευαστικός, εμπορικός κλάδος κλπ).

Σε κάθε περίπτωση, αυτό που είναι ορατό είναι ότι το εθνικό ενεργειακό σύστημα έχει τη δυνατότητα να διαφοροποιηθεί σημαντικά τα επόμενα χρόνια, εκπληρώνοντας τις δεσμεύσεις της ευρωπαϊκής ενεργειακής πολιτικής και παράλληλα παρέχοντας ασφάλεια στον τελικό καταναλωτή, καθώς τον προστατεύει από την αστάθμητη διακύμανση του κόστους των εισαγόμενων καυσίμων, προσφέροντάς του επιπλέον τις βέλτιστες τεχνολογικές λύσεις και επιλογές ώστε να επιτύχει εξοικονόμηση ενέργειας και τελικά μείωση των συνολικών του ενεργειακών δαπανών (ΥΠΕΚΑ, 2012).

### **Κεφάλαιο 3**

#### **Δυνατότητες Περιορισμού των Εκπομπών CO<sub>2</sub>**

##### **3.1 Εισαγωγή**

Τα αέρια που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και ιδιαίτερα το διοξείδιο του άνθρακα, μπορούν να μειωθούν είτε περιορίζοντας τις εκπομπές τους στην ατμόσφαιρα, είτε αυξάνοντας το ρυθμό απομάκρυνσής τους από αυτή. Για την αποφυγή της συνεχιζόμενης αύξησης της συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ποικιλία τεχνικών. Οι κυριότερες από αυτές είναι:

- Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και αύξηση της απόδοσης της ενεργειακής μετατροπής και αξιοποίησης.
- Αντικατάσταση των χρησιμοποιούμενων καυσίμων με άλλα μικρότερης περιεκτικότητας σε άνθρακα, όπως φυσικό αέριο αντί για άνθρακα.
- Ενίσχυση των φυσικών δεξαμενών, που απορροφούν από την ατμόσφαιρα με φυσικές διεργασίες το διοξείδιο του άνθρακα (π.χ. δάση, έδαφος, ωκεανοί).
- Χρήση πηγών ενέργειας με σημαντικά μικρότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή και η πυρηνική ενέργεια.
- Δέσμευση και αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα που παράγεται από την καύση ορυκτών καυσίμων.

Όσον αφορά στις εκπομπές των υπολοίπων αερίων θερμοκηπίου και ειδικότερα το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) και τα οξείδια του αζώτου (N<sub>2</sub>O) τα προτεινόμενα μέτρα περιορισμού τους είναι διαφορετικά και μελετώνται ξεχωριστά. (IEA, 2000a)

Η επίτευξη σημαντικών μειώσεων στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα δεν είναι δυνατή ακολουθώντας αποκλειστικά μία από τις δυνατές τεχνικές μείωσης που προαναφέρθηκαν. Για να είναι αποδοτικότερη η αντιμετώπιση του προβλήματος θα πρέπει να περιλαμβάνει περισσότερες από μια τεχνικές. Το ποσοστό στο οποίο θα συνεισφέρει η κάθε μία από τις δυνατές επιλογές, εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους με κυριότερες το κόστος εφαρμογής της κάθε επιλογής, τις απαιτήσεις μείωσης των εκπομπών, που είναι διαφορετικές σε κάθε περίπτωση, τις διαθέσιμες κάθε φορά ενεργειακές πηγές, τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της εφαρμογής τους, αλλά και τον κοινωνικό παράγοντα.

Η πρακτική η οποία θα οδηγούσε στην αποτελεσματική επίτευξη των απαραίτητων μειώσεων του διοξειδίου του άνθρακα είναι η παροχή ισχυρού οικονομικού κινήτρου, με τη μορφή

υψηλού κόστους των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Με τον τρόπο αυτό παρέχεται ουσιαστικά το απαραίτητο κίνητρο ώστε να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα των εκπομπών από όλες τις δυνατές πλευρές, όπως με μείωση της ενεργειακής ζήτησης, με αντικατάσταση των χρησιμοποιούμενων καυσίμων, αλλά και με δέσμευση του εκπεμπόμενου διοξειδίου του άνθρακα.

Η μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα που οφείλονται στην ανθρώπινη δραστηριότητα, μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους. Συνολικά, οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα εκφράζονται με τη σχέση:

$$CO_2^{\uparrow} = (POP) * (GDP/POP) * (BTU/GDP) * (CO_2^{\uparrow}/BTU) - CO_2^{\downarrow}$$

όπου :

CO<sub>2</sub><sup>↑</sup>: Είναι η συνολική ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα η οποία ελευθερώνεται τελικά στην ατμόσφαιρα.

POP: Είναι ο ανθρώπινος πληθυσμός.

GDP/POP: Είναι το ακαθάριστο κατά κεφαλή εισόδημα και αποτελεί μέτρο του βιοτικού επιπέδου.

BTU/GDP: Είναι η ενεργειακή κατανάλωση ανά μονάδα του GDP και αποτελεί μέτρο της ενεργειακής έντασης.

CO<sub>2</sub><sup>↑</sup>/BTU: Είναι η ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα που ελευθερώνεται ανά μονάδα καταναλισκόμενης ενέργειας και η οποία αποτελεί ένα μέτρο της έντασης άνθρακα και

CO<sub>2</sub><sup>↓</sup>: Είναι η ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα που απορρίπτεται στις φυσικές δεξαμενές της βιόσφαιρας και της γεώσφαιρας. (Wong S. and Bioletti R., 2002)

Η συνεχιζόμενη ανάπτυξη συνεπάγεται ταυτόχρονη αύξηση του πληθυσμού (POP) και ανύψωση του βιοτικού επιπέδου (GDP/POP). Από την εξίσωση οι δύο πρώτοι παράμετροι που αφορούν τη μείωση του πληθυσμού και τη μείωση του επιπέδου ζωής, δεν είναι δυνατό να μεταβληθούν. Από τις υπόλοιπες τρεις παραμέτρους μπορούν να πραγματοποιηθούν αλλαγές, έτσι ώστε και να αναπτύσσεται η οικονομία αλλά και να πραγματοποιείται μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Οι παράμετροι αυτές είναι:

- Η ενεργειακή ένταση της οικονομίας.
- Η ένταση άνθρακα (ποσότητα παραγόμενου άνθρακα ανά μονάδα καταναλισκόμενης ενέργειας).
- Η ποσότητα του άνθρακα που απομακρύνεται από την ατμόσφαιρα μέσω διεργασιών δέσμευσης.

Οι τρεις αυτές παράμετροι αφορούν και σε συγκεκριμένους τρόπους μείωσης των εκπομπών,

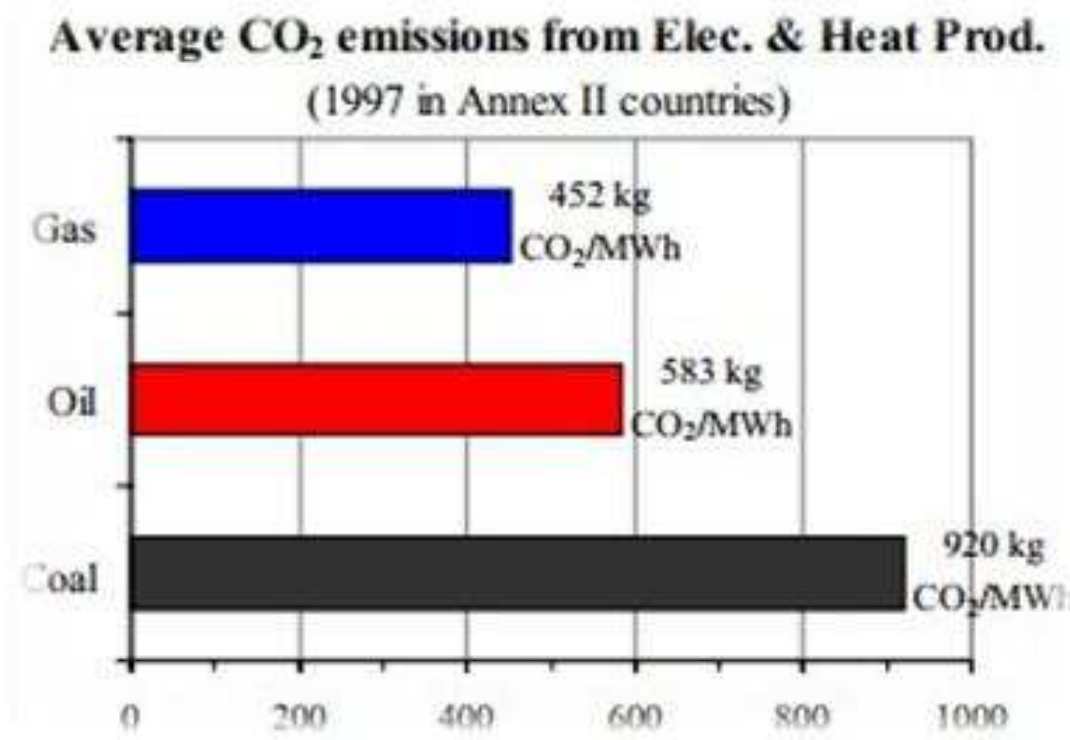
για όλα τα αέρια θερμοκηπίου. Με αύξηση της απόδοσης της πρωτογενούς μετατροπής ενέργειας και της τελικής χρήσης της, θα απαιτούνται και λιγότερες μονάδες πρωτογενούς ενέργειας για την παροχή ίδιας ποσότητας. Επίσης, αντικαθιστώντας τις χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας με άλλες στις οποίες θα περιέχεται μικρότερη ποσότητα άνθρακα ή ακόμη και μηδενική, μπορεί να μειωθεί η ένταση άνθρακα της ενεργειακής οικονομίας. Τέλος, η ανάπτυξη και η βελτίωση των τεχνολογιών δέσμευσης μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλες μειώσεις των εκπομπών, επιτρέποντας ταυτόχρονα την εξακολούθηση της χρήσης των ορυκτών καυσίμων. Οι δύο πρώτες επιλογές μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά αλλά θα πρέπει να συνδυαστούν με την επιλογή της δέσμευσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. (Wong S. and Bioletti R., 2002)

### **3.2 Βελτίωση απόδοσης**

Η βελτίωση της απόδοσης μπορεί να πραγματοποιηθεί σε κάθε ένα από τα στάδια του κύκλου του καυσίμου, από την ανάκτησή του ως τη χρήση του για παραγωγή ενέργειας, αλλά και την τελική του χρήση. Με την παροχή κατάλληλων κινήτρων και με τη δημιουργία των κατάλληλων συνθηκών στην αγορά, μπορεί η συγκεκριμένη επιλογή να εφαρμοστεί σε μεγάλη κλίμακα ευνοώντας και μέσω της μειωμένης χρήσης ενέργειας και μέσω των μειωμένων εκπομπών. Η βελτίωση των αποδόσεων μπορεί και παρέχει άμεσα πλεονεκτήματα με διάφορους τρόπους, όχι μόνο επιτυγχάνοντας μείωση εκπομπών, αλλά και μεταφέροντας στο μέλλον την ανάγκη για εύρεση, ανάπτυξη και χρήση νέων πηγών καυσίμων. Επιπρόσθετα, με βελτιώσεις της απόδοσης μπορεί να μειωθεί σημαντικά και το κόστος που αφορά στην εφαρμογή των διαφόρων τεχνολογιών απομάκρυνσης του διοξειδίου του άνθρακα. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ολικής παραγωγής ενέργειας με βαθμό απόδοσης ίσο με 40%, η αύξηση της απόδοσης κατά 1 ποσοστιαία μονάδα, σε 41 %, μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα κατά περίπου 2,5% ανά μονάδα παραγόμενης kWh (Audus, 1999).

Σχετικά με τις ειδικές εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα (εκπομπές ανά παραγόμενη kWh) από ορυκτά καύσιμα, παρατηρείται μεγάλη διακύμανση, γεγονός που οφείλεται σε διαφορές στην απόδοση της παραγωγής, στον τύπο του καυσίμου, αλλά και στην ηλικία του σταθμού παραγωγής ενέργειας που μελετάται. Με την πάροδο του χρόνου έχει παρατηρηθεί μείωση των μέσων ειδικών εκπομπών η οποία οφείλεται στην αλλαγή των

χρησιμοποιούμενων καυσίμων και τη στροφή προς καύσιμα με χαμηλότερη περιεκτικότητα άνθρακα (σχήμα 3.2.1, εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα ανά παραγόμενη kWh ανάλογα με το είδος χρησιμοποιούμενου καυσίμου), αλλά και σε βελτιώσεις της απόδοσης. Η διακύμανση των ειδικών εκπομπών ανάλογα με την τεχνολογία του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής είναι σημαντικές, εκφράζοντας και την αντίστοιχη διακύμανση του βαθμού απόδοσης. (Bill *et al.*, 2001)



(Πηγή: Marion *et al.*, 2000)

Σχήμα 3.2.1: Μέση τιμή των εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά τύπο καυσίμου στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας

Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα έχουν ως βάση σχεδιασμού τον ατμοστρόβιλο, με σκοπό τη μετατροπή της θερμότητας σε ηλεκτρισμό. Η τιμή απόδοσης σε σταθμούς συμβατικής τεχνολογίας φτάνει περίπου το 40%, ενώ σε πιο σύγχρονης τεχνολογίας με κύκλο ατμού υπερκρίσιμων χαρακτηριστικών, όπου μπορούν να επιτευχθούν υψηλότερες τιμές πίεσης και θερμοκρασίας, η τιμή της απόδοσης φτάνει ακόμη και το 50% (βάση LHV). Στην κατεύθυνση αυτή αναμένονται περαιτέρω εξελίξεις και βελτιώσεις στο άμεσο μέλλον. Η παραγωγή ενέργειας σε σταθμό φυσικού αερίου, συνδυασμένου κύκλου, (NGCC, Natural Gas Combined Cycle) αποτελεί ελκυστική επιλογή για αρκετές χώρες και παρουσιάζει το πλεονέκτημα της μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα με αύξηση της απόδοσης και με χρήση καυσίμου (φυσικού αερίου) χαμηλής

περιεκτικότητας άνθρακα. Με τα σημερινά δεδομένα, η τιμή της απόδοσης τέτοιων σταθμών είναι περίπου στο 58% (βάση LHV) και η αλλαγή καυσίμου (θεωρώντας ότι πρόκειται για αντικατάσταση του καυσίμου άνθρακα από το φυσικό αέριο) οδηγεί σε σημαντική μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Η αντικατάσταση παλαιών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής χαμηλής απόδοσης με νέους αποτελεί έναν έμμεσο τρόπο βελτίωσης της απόδοσης και ταυτόχρονης μείωσης των εκπομπών. Όσον αφορά στη βραχυπρόθεσμη εφαρμογή ενός τέτοιου μέτρου, αποτελεί την οικονομικότερη από τις πιθανές επιλογές για μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Προς την κατεύθυνση της αντικατάστασης σταθμών παλαιότερης τεχνολογίας έχει προταθεί και η επιλογή της συμπαραγωγής θερμότητας και ισχύος.

Συνοψίζοντας, με τους νέους σχεδιασμούς που είναι πλέον τεχνικά εφικτοί στην κατασκευή σταθμών, η τιμή του βαθμού απόδοσης φτάνει στο 60%. Η αύξηση αυτή μεταφράζεται και σε σημαντική μείωση των εκπομπών. Έτσι, υπάρχει η προοπτική της μείωσης των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα έως και κατά 30%, με αύξηση της ολικής απόδοσης των σταθμών παραγωγής ενέργειας από το 40% στο 60% (Bill *et al.*, 2001).

### **3.3 Αντικατάσταση καυσίμου**

Η χρήση καυσίμων με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση των ειδικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Για το λόγο αυτό, δίνεται μεγάλη βαρύτητα στη χρήση του φυσικού αερίου. Η συνεισφορά του στο άμεσο μέλλον εκτιμάται ότι θα είναι μεγάλη, γεγονός που θα οδηγήσει και σε σημαντική μείωση των εκπομπών. Το πρόβλημα που υπάρχει σε αυτή την περίπτωση είναι της περιορισμένης διαθεσιμότητας του φυσικού αερίου, αφού πρόκειται επίσης για ορυκτό καύσιμο.

Επίσης σημαντική συμβολή στη μείωση των εκπομπών αναμένεται τα επόμενα χρόνια, έπειτα και από την εφαρμογή σε εμπορική κλίμακα και άλλων καυσίμων, όπως του υδρογόνου, για παραγωγή κυψελών καυσίμου.

Μεγάλη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα σε παγκόσμιο επίπεδο είναι δυνατή και με στροφή προς χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας των οποίων η προοπτική είναι αισιόδοξη. Μεταξύ άλλων, από μελέτες της Παγκόσμιας Τράπεζας (World Bank) και του Παγκοσμίου Συμβουλίου Ενέργειας (World Energy Council), εκτιμάται ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να καλύψουν σημαντικό ποσοστό των ενεργειακών

αναγκών, μέχρι τα μέσα περίπου του αιώνα. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις μελέτες αυτές είναι σύμφωνα και με τα αντίστοιχα μιας σειράς σχετικών αναλύσεων. Σύμφωνα με αυτά, εκτός από την ενέργεια που προέρχεται από τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια, σημαντικός αναμένεται να είναι και ο ρόλος της ενέργειας από την καύση βιομάζας και της αιολικής ενέργειας, για τις επόμενες δεκαετίες. Ακολουθεί η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική κυρίως με χρήση φωτοβολταϊκών, αλλά και με χρήση ηλιακών θερμικών συστημάτων. (Turkenburg, 1997)

Από σχετικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σε παγκόσμιο επίπεδο, αναμένεται να αυξηθεί η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θεωρώντας ταυτόχρονα και σημαντικές επενδύσεις στις πηγές αυτές αλλά και πολύ μεγάλες μειώσεις στο κόστος της παραγόμενης ενέργειας. Η έκταση όμως στην οποία θα μπορούσε να εξαπλωθεί η χρήση τους καθώς και το πόσο εύκολα θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί στροφή του γενικού ενδιαφέροντος προς αυτές τις πηγές ενέργειας είναι αβέβαιο.

Για τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας, θα πρέπει να αντιμετωπιστούν εμπόδια που αφορούν τα υψηλά κόστη εγκαταστάσεων, την απόρριψη των αποβλήτων αλλά και την έλλειψη κοινής αποδοχής, ιδιαίτερα έπειτα από το σεισμό στην Ιαπωνία (11/3/2011) και τη διαρροή ραδιενέργειας που προκλήθηκε στον σταθμό παραγωγής ενέργειας της Fukushima Daiichi. Συνέπεια των παραπάνω, η συνεισφορά της πυρηνικής ενέργειας (εκτός από κάποιες ελάχιστες περιπτώσεις εξαιρέσεων) στον παγκόσμιο εφοδιασμό ενέργειας δεν αναμένεται να είναι σημαντική στο άμεσο μέλλον.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα όλων αυτών των επιλογών, που αναμφισβήτητα οδηγούν σε μείωση των εκπομπών, είναι το υψηλό κόστος τους το οποίο αναμένεται να μειωθεί σημαντικά στο μέλλον, με αύξηση της εγκατεστημένης ικανότητας παραγωγής. Το κόστος στις περιπτώσεις αυτές εξαρτάται από τις ειδικές συνθήκες και την περιοχή όπου μελετάται η αντικατάσταση καυσίμου ή την εισαγωγή νέας πηγής ενέργειας (Wilson *et al.*, 2009).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι δεν είναι δυνατό να στηριχθεί η ενεργειακή και κλιματική πολιτική αποκλειστικά σε επιδιώξεις εξοικονόμησης ενέργειας ή αύξησης της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αν και η συνεισφορά τους μπορεί να είναι σημαντική, δε μπορεί να επιτύχει τις ζητούμενες μειώσεις των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, τουλάχιστον όχι προς το παρόν και όχι με τα σημερινά δεδομένα. Η χρήση πηγών ενέργειας που θα εκπέμπουν λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα, αν πραγματοποιηθεί, θα έχει ως αποτέλεσμα μεγάλες διαταραχές στη δομή του υπάρχοντος συστήματος ενέργειας με σημαντικές επιπτώσεις στην παγκόσμια οικονομία (Turkenburg, 1999).



### **3.4 Ενίσχυση των φυσικών δεξαμενών**

Οι φυσικές δεξαμενές (γήινα και ωκεάνια συστήματα) απομακρύνουν ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα από την ατμόσφαιρα μέσω διεργασιών φωτοσύνθεσης χρησιμοποιώντας την ηλιακή ενέργεια. Τα δάση, τα οποία αποτελούν τη σημαντικότερη από τις φυσικές δεξαμενές, συγκρατούν περίπου 1300GtC, υπεργείως και υπογείως, σε παγκόσμιο επίπεδο. Έτσι, η συνεισφορά της δασοκομίας μπορεί να είναι μεγάλη, με κατάλληλη ενίσχυση των φυσικών δεξαμενών. Μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα μπορούν να απομακρυνθούν από την ατμόσφαιρα, για μεγάλα χρονικά διαστήματα, με τη βοήθεια των δασών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με αποφυγή των αποψιλώσεων, με καλύτερη διαχείριση των υφιστάμενων δασών, με αναδάσωση περιοχών όπου υπήρχαν στο παρελθόν δάση, αλλά και με δημιουργία και ανάπτυξη δασών σε άλλες περιοχές που θα κριθούν κατάλληλες για το σκοπό αυτό. Ο σημαντικότερος από τους δυνατούς τρόπους είναι αυτός των αναδασώσεων σε περιοχές της εύκρατης και τροπικής ζώνης. Αρχικές εκτιμήσεις δείχνουν ότι με υλοποίηση τέτοιων έργων μεγάλης κλίμακας και για χρονική περίοδο μεγαλύτερη των 50 ετών, θα είναι δυνατή η απομάκρυνση ποσότητας 50-100Gt διοξειδίου του άνθρακα, ενώ κάποιες εκτιμήσεις αναφέρουν ως προοπτική παγκόσμιας αποθήκευση της τάξεως του 1,2GtC/y.

Στην κατεύθυνση αυτή έχει ιδρυθεί ο Ολλανδικός οργανισμός FACE (Forests Absorbing Carbon Dioxide Emissions) με σκοπό την φύτευση δασών που θα απορροφούν μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα από την ατμόσφαιρα και έχει ήδη ξεκινήσει αρκετά τέτοια προγράμματα σε περιοχές όπως η Μαλαισία, η Τσεχία, το Εκουαδόρ, η Ουγκάντα και η Ολλανδία.

Για τη διερεύνηση των επιπτώσεων της εφαρμογής ενός τέτοιου σχεδίου σε μεγάλη κλίμακα, το IEA GHG Programme, έχει πραγματοποιήσει μελέτη εφαρμογής τέτοιου σχεδίου δέσμευσης μεγάλων ποσοτήτων άνθρακα στο Chiapas του Μεξικό. Από τη μελέτη αυτή προέκυψε ότι το κόστος ανά μονάδα δέσμευσης ανέρχεται σε 80\$/tC. Το πλεονέκτημα που παρουσιάζει ένα τέτοιο πρόγραμμα αφορά τη δυνατότητα δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα ανεξάρτητα της πηγής προέλευσής του.

Για να είναι αξιόλογη η συνεισφορά της δασοπονίας στη μείωση που θα επιτευχθεί, απαιτούνται εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Όσον αφορά στη διαθεσιμότητα των κατάλληλων εκτάσεων, υπάρχουν αρκετές αβεβαιότητες όπως επίσης και σχετικά με την ασφάλεια αυτού του τρόπου αποθήκευσης του διοξειδίου του άνθρακα, δεδομένου ότι η ποσότητα που απομακρύνεται από την ατμόσφαιρα με τον τρόπο αυτό, μακροπρόθεσμα ελευθερώνεται

πάλι σε αυτή (Freund, 2001).

Επίσης, ενώ η αποδοτική διαχείριση των δασών μπορεί να οδηγήσει σε απομάκρυνση σημαντικών ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα από την ατμόσφαιρα, και μάλιστα με σχετικά χαμηλό κόστος, η μελλοντική κατάστασή τους -ειδικά όταν δημιουργούνται για το συγκεκριμένο σκοπό- χρειάζεται επιπλέον διερεύνηση αφού απαιτείται η εξασφάλιση κάποιου βαθμού βεβαιότητας. Επιπλέον μελέτη απαιτείται και όσον αφορά στις πολιτικές επιπτώσεις που θα έχει η πιθανή δημιουργία μεγάλων δασικών εκτάσεων για απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα, όχι στις χώρες που ευθύνονται για την εκπομπή του οι οποίες είναι κατά κύριο λόγο οι ανεπτυγμένες, αλλά σε χώρες όπου είναι δυνατή η δημιουργία όπως οι αναπτυσσόμενες (Riemer, 1996).

### **3.5 Δέσμευση των εκπομπών CO<sub>2</sub>**

Η δέσμευση και αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα αφορά στη χρήση τεχνολογιών που έχουν μελετηθεί και χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν σε άλλου είδους εφαρμογές (π.χ. βελτιωμένη εκμετάλλευση κοιτασμάτων πετρελαίου, κ.α.). Για την υιοθέτησή τους με στόχο τη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, θα πρέπει να μελετηθεί και η εφαρμογή τους στην κατάλληλη εμπορική κλίμακα. Παράλληλα απαιτείται βελτίωση των αποδόσεών τους, μείωση του σχετικού κόστους τους, αντιμετώπιση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεών τους και μελέτη της αξιοπιστίας και της ασφάλειας των δυνατών επιλογών αποθήκευσης. Ακολουθώντας αυτή την προσέγγιση για την αντιμετώπιση του προβλήματος των εκπομπών, αντί να μειώνεται η χρήση των ορυκτών καυσίμων, αυξάνεται, αφού για την πραγματοποίηση των διεργασιών αυτών απαιτούνται επιπλέον ποσότητες ενέργειας. Είναι όμως δυνατό, τα καύσιμα τα οποία θα χρησιμοποιούνται για την παραγωγή της ενέργειας αυτής να είναι διαφορετικά, περιορίζοντας με τον τρόπο αυτό σε κάποιο βαθμό της αναπόφευκτη αύξηση των εκπομπών. Από τις μεθόδους αντιμετώπισης του προβλήματος (βελτίωση απόδοσης, χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενίσχυση δασοκομίας, χρήση καυσίμων χαμηλότερης περιεκτικότητας άνθρακα, δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα), ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στη δέσμευση και την αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα από τις μεγάλες πηγές εκπομπής του. Η κρισιμότητα της επιλογής αυτής προκύπτει από το γεγονός ότι σήμερα, περίπου το 85% των ενεργειακών αναγκών παγκοσμίως καλύπτεται από τα ορυκτά καύσιμα και η στροφή σε άλλες πηγές ενέργειας,

ακόμη και αν ήταν εφικτή, πιθανώς να δημιουργούσε πρόβλημα στη δομή του υφιστάμενου ενεργειακού συστήματος με σημαντικές συνέπειες για την παγκόσμια οικονομία.

Στην κατεύθυνση της δέσμευσης, κινούνται σήμερα πάρα πολλές προσπάθειες και μελέτες, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της τεχνολογίας και των σχετικών διεργασιών.

Η διαδικασία της απομάκρυνσης του διοξειδίου του άνθρακα συμπεριλαμβάνει τα εξής διακριτά στάδια:

1. Δέσμευση.
2. Μεταφορά.
3. Αποθήκευση.

Από τα τρία στάδια το σημαντικότερο, όσον αφορά το κόστος, είναι το στάδιο της δέσμευσης. Για το λόγο αυτό λαμβάνει τη μεγαλύτερη προσοχή από τα τρία και προς αυτό κινούνται και όλες σχεδόν οι προσπάθειες βελτιστοποίησης.

Σκοπός της διεργασίας δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα είναι η απομόνωσή του από τις πηγές εκπομπής του και μάλιστα σε μορφή κατάλληλη για να είναι δυνατή, στη συνέχεια, η ασφαλής μεταφορά και αποθήκευσή του. Η απαιτούμενη τεχνολογία εξαρτάται από το είδος της πηγής εκπομπής του, καθώς επίσης και από τη μορφή του παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα, η οποία πρέπει να είναι κατάλληλη για την πραγματοποίηση των διαδοχικών σταδίων που θα οδηγήσουν στην απομόνωσή του. Για να καθίσταται περισσότερο εύκολη η μεταφορά του, έπειτα από τη διεργασία της δέσμευσής του, το διοξείδιο του άνθρακα συνήθως συμπιέζεται, περίπου στις 100atm. Προκύπτει τελικά ένα σχετικά καθαρό, υψηλής πίεσης ρεύμα διοξειδίου του άνθρακα (Burchell and Judkins, 1996).

Η δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα στις πηγές εκπομπής του, αποτελεί το βέλτιστο τρόπο αντιμετώπισης των εκπομπών του.

Για να θεωρηθεί κάποια τεχνολογία απομάκρυνσης αξιόπιστη και αποτελεσματική πρέπει να:

- Συνεισφέρει σημαντικά στη μείωση εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα.
- Είναι οικονομικά αποδεκτή.
- Είναι αποδοτική.
- Μην παρουσιάζει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της.
- Είναι κοινωνικά αποδεκτή.
- Προσαρμόζεται στο υφιστάμενο ενεργειακό σύστημα.

Υπάρχουν αρκετά διαθέσιμα συστήματα με τα οποία επιτυγχάνεται δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα, αλλά οι δυνατές επιλογές είναι περιορισμένες, αφού από τις τεχνολογίες δέσμευσης κάποιες είναι άμεσα εφαρμόσιμες όπως για παράδειγμα η χημική απορρόφηση με

αμίνες, ενώ κάποιες άλλες βρίσκονται στο στάδιο της έρευνας, όπως η κρυογενική μέθοδος διαχωρισμού (David, 2000).

### 3.6 Πηγές για δέσμευση CO<sub>2</sub>

Οι βέλτιστες πηγές για εφαρμογή τεχνολογίας διαχωρισμού του διοξειδίου του άνθρακα είναι οι πηγές όπου πραγματοποιείται παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων του, όπως οι συμβατικοί θερμοηλεκτρικοί σταθμοί, οι σταθμοί συνδυασμένου κύκλου με φυσικό αέριο, καθώς επίσης και οι σταθμοί παραγωγής προηγμένης τεχνολογίας, όπως είναι οι σταθμοί αεριοποίησης - συνδυασμένου κύκλου (Integrated Gas Combined Cycle - IGCC). Οι πηγές αυτές ενδείκνυνται, διότι η απαιτούμενη για τη δέσμευση τεχνολογία έχει σημαντικό κόστος, ενώ αυτές οι πηγές εκπέμπουν μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα καθιστώντας οικονομικά αποδεκτή την εφαρμογή τους.

Εκτός των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σημαντικές πηγές μεγάλων ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα αποτελούν και βιομηχανίες όπως τα διυλιστήρια πετρελαίου, οι βιομηχανίες σιδήρου και χάλυβα, παραγωγής τσιμέντου, ασβέστου, καθώς και οι εγκαταστάσεις εξόρυξης φυσικού αερίου.

Οι τομείς της βιομηχανίας με τις σημαντικότερες εκπομπές μεταξύ των χωρών του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (Ο.Ο.Σ.Α.) παρουσιάζονται στον πίνακα 3.6.1 (IEA, 2001).

Πίνακας 3.6.1: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που προέρχονται από τη βαριά βιομηχανία

Τομέας	Εκπομπές CO <sub>2</sub> (εκ. τόνοι / έτος)
Παραγωγή σιδήρου και χάλυβα	1440
Παραγωγή τσιμέντου	1130
Δύλιση πετρελαίου	690
Πετροχημικά	520
Άλλες βιομηχανίες	1320
Ηλεκτροπαραγωγή	7660

Όπως φαίνεται από τα στοιχεία που παρουσιάζονται στον πίνακα 3.6.1, τέσσερις μεγάλοι βιομηχανικοί κλάδοι (η παρασκευή σιδήρου και χάλυβα, η βιομηχανία τσιμέντου, τα διυλιστήρια πετρελαίου και οι πετροχημικές βιομηχανίες) είναι υπεύθυνοι για την παραγωγή

σχεδόν των 3/4 των συνολικών εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, πλην της ηλεκτροπαραγωγής και ισοδυναμούν περίπου με το μισό των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα που προέρχονται από τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (IEA, 2001). Τυπικές τιμές συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα σε αέρια ρεύματα στα οποία περιέχεται παρουσιάζονται στον πίνακα 3.6.2 (Thambimuthu *et al.*, 2009) και εξαρτώνται από τον κλάδο από τον οποίο προέρχονται.

Πίνακας 3.6.2: Τιμές συγκέντρωσης του περιεχόμενου διοξειδίου του άνθρακα σε ρεύματα προς επεξεργασία από διάφορες πηγές

Πηγή CO <sub>2</sub>	Συγκέντρωση CO <sub>2</sub> (% κατ' όγκο)
Καυσαέρια από σταθμό παραγωγής ενέργειας <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ανθρακικός σταθμός</li> <li>• Σταθμός καύσης φυσικού αερίου</li> <li>• Συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου</li> <li>• Καύση άνθρακα με οξυγόνο</li> </ul>	14 8 4 >80
Δέσμευση πριν την καύση σε σταθμό παραγωγής ενέργειας <ul style="list-style-type: none"> <li>• Αεριοποίηση καύσιμου άνθρακα</li> <li>• Μερική οξείδωση φυσικού αερίου</li> </ul>	40 24
Αέρια υψικαμίνων <ul style="list-style-type: none"> <li>• Πριν την καύση</li> <li>• Μετά την καύση</li> </ul>	20 27
Καυσαέρια από χωνευτήρια τσιμέντου	14-33
Διυλιστήρια πετρελαίου και πετροχημικοί σταθμοί	8

### 3.6.1 Σταθμοί παραγωγής ενέργειας

Η εγκατάσταση μονάδων δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα σε υφιστάμενους και εν λειτουργία σταθμούς είναι εφικτή με τα σημερινά δεδομένα, αν και το κόστος είναι αρκετά υψηλό. Στη συνέχεια περιγράφονται οι συνηθέστερες από τις τεχνολογίες των σταθμών παραγωγής ενέργειας..

#### Συμβατικός ανθρακικός σταθμός

Οι ανθρακικοί σταθμοί με κύκλο ατμού αποτελούν την κυριότερη τεχνολογία των τελευταίων 50 ετών. Ο άνθρακας καίγεται στο λέβητα και ανυψώνει την πίεση του ατμού που στη συνέχεια διερχόμενος από ατμοστρόβιλο παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Οι αποδόσεις που παρατηρούνται σε καινούριους σταθμούς αυτής της τεχνολογίας είναι περίπου 40%. Με σκοπό τη βελτίωση των κύκλων ατμού και την επίτευξη υψηλότερων αποδόσεων απαιτείται

χρήση νέων, βελτιωμένων υλικών (όπως είναι το νικέλιο και τα κράματα χρωμίου). Η έρευνα εστιάζεται στην ανάπτυξη κατάλληλων υλικών για ατμό με χαρακτηριστικά 375bar/700°C, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε αποδόσεις της τάξης του 55% (IEA, 2009).

#### **Σταθμός φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου (NGCC)**

Το φυσικό αέριο καίγεται σε αεριοστρόβιλο όπου παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια. Ακολούθως, τα θερμά καυσαέρια που παράγονται τροφοδοτούν λέβητα που παράγει ατμό, ο οποίος στη συνέχεια περνά από ατμοστρόβιλο, παράγοντας επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια. Σε παγκόσμιο επίπεδο, τέτοιου είδους σταθμοί συνήθως αντικαθιστούν παλαιότερους. Μεγάλες τέτοιες μονάδες συνδυασμένου κύκλου με φυσικό αέριο παρουσιάζουν τιμή θερμικής απόδοσης περίπου 56-58%. Στα επόμενα έτη αναμένεται να αυξηθούν οι τιμές απόδοσης περισσότερο από 60%, με την υπάρχουσα τεχνολογία, αν και με τις αναμενόμενες τεχνολογικές εξελίξεις, είναι δυνατό να επιτευχθούν ακόμη μεγαλύτερες αποδόσεις. Οι σταθμοί φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερες τιμές θερμικής απόδοσης και δεδομένου ότι το καύσιμο φυσικό αέριο περιέχει μικρότερη ποσότητα άνθρακα σε σχέση με τους άνθρακες, οι ειδικές εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα, είναι σχεδόν μισές σε σχέση με ανθρακικούς σταθμούς. Ο όγκος όμως των παραγόμενων καυσαερίων είναι μεγαλύτερος στην περίπτωση του σταθμού φυσικού αερίου, και μάλιστα κατά περίπου 2/3. Αυξανόμενης της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια ή μειούμενου του όγκου του καυσαερίου, είναι πιθανό να μειωθεί και το κόστος της διαχείρισής του. Η περιεκτικότητα σε διοξείδιο του άνθρακα των καυσαερίων σταθμών παραγωγής ενέργειας είναι περίπου 4% κατ' όγκο για καύση φυσικού αερίου και περίπου 14% κατ' όγκο για καύση άνθρακα. Τα καυσαέρια θα μπορούσαν να, συμπιεστούν απευθείας και να αποθηκευτούν, αλλά η απαιτούμενη ενέργεια για τη συμπίεση θα ήταν πολύ μεγάλη λόγω του μεγάλου όγκου των καυσαερίων. Επιπλέον, η χωρητικότητα των διαθέσιμων δεξαμενών αποθήκευσης δεν είναι απεριόριστη και θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη ο όγκος του συμπιεσμένου αερίου που αποθηκεύεται. Για τους λόγους αυτούς καθίσταται απαραίτητος ο διαχωρισμός του διοξειδίου του άνθρακα από το συνολικό όγκο των εξαγόμενων καυσαερίων, οπότε ο όγκος προς συμπίεση και αποθήκευση να είναι σημαντικά μικρότερος (Thambimuthu *et al.*, 2009).

### 3.6.2 Άλλες μεγάλες πηγές εκπομπών CO<sub>2</sub>

Όπως έχει αναφερθεί εκτός από τους σταθμούς παραγωγής ενέργειας, άλλες μεγάλες πηγές διοξειδίου του άνθρακα και πιθανά σημεία εφαρμογής των τεχνολογιών δέσμευσής του, αποτελούν βιομηχανίες όπως τα διυλιστήρια πετρελαίου, οι βιομηχανίες σιδήρου και χάλυβα, οι μονάδες επεξεργασίας φυσικού αερίου, οι χαρτοβιομηχανίες, οι βιομηχανίες λιπασμάτων καθώς και σημεία παραγωγής τσιμέντου και άσβεστου. Οι σημαντικότερες από αυτές παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

#### **Παραγωγή τσιμέντου**

Το διοξείδιο του άνθρακα στην παραγωγή τσιμέντου μπορεί να προέρχεται από τις πρώτες ύλες ή και από το καύσιμο το οποίο χρησιμοποιείται. Συνήθως τα χωνευτήρια τσιμέντου παράγουν μεγάλο όγκο διοξειδίου του άνθρακα αφού οι διεργασίες αναγωγής του ανθρακικού νατρίου σε τσιμέντο που συντελούνται, οδηγούν στην απελευθέρωση διοξειδίου του άνθρακα. Τα παραγόμενα καυσαέρια περιέχουν 14-33% κατ' όγκο διοξείδιο του άνθρακα, ανάλογα με τη διεργασία παραγωγής και το είδος του τσιμέντου που παράγεται.

Η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα είναι υψηλότερη από αυτή των καυσαερίων των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η δέσμευσή του μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας διάλυμα αμινών, αλλά οι μεγάλες ποσότητες ενέργειας που απαιτούνται για το στάδιο της αναγέννησης, συνήθως δεν είναι διαθέσιμες σε τέτοιες μονάδες. Η βέλτιστη προτεινόμενη λύση είναι, τουλάχιστον θεωρητικά, η κατασκευή μονάδων συμπαραγωγής. Επίσης είναι πιθανό να είναι δυνατή η χρήση της τεχνικής καύσης με οξυγόνο, αλλά θα πρέπει να μελετηθεί η επίδραση της εμφάνισης υψηλότερων τιμών συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα στη χημεία της διεργασίας (David, 2000).

#### **Παραγωγή σιδήρου και χάλυβα**

Στην παρασκευή σιδήρου και χάλυβα συμπεριλαμβάνονται διεργασίες που αφορούν σε αέρια με πολύ υψηλές τιμές συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα. Περίπου το 60% των εκπομπών από τη βιομηχανία σιδήρου και χάλυβα προέρχεται από τις υψικαμίνους (Turkenburg, 1999). Τα αέρια υψικαμίνων συνήθως περιέχουν περίπου 20% κατ' όγκο διοξείδιο του άνθρακα, 21% κατ' όγκο μονοξείδιο του άνθρακα και το υπόλοιπο είναι άζωτο, σε τιμές πίεσης 2-3bar, ενώ μετά την καύση με αέρα, στο καυσαέριο περιέχεται περίπου 27% κατ' όγκο διοξείδιο του άνθρακα, περιεκτικότητα αρκετά υψηλότερη από εκείνη των καυσαερίων των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να δεσμευτεί είτε πριν είτε και μετά από την καύση του αερίου υψικαμίνου. Τα αέρια ρεύματα

που ελευθερώνονται από τις υψικαμίνοες κατά την παραγωγή του χάλυβα και τα οποία είναι πλούσια σε διοξείδιο του άνθρακα, μπορούν να εισέλθουν σε μονάδα απομάκρυνσης του πριν την περαιτέρω επεξεργασία τους ή τη χρήση τους. Στην περίπτωση αυτή πρόκειται ουσιαστικά για ενδιάμεση μορφή απομάκρυνσης του. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα τόσο περισσότερο μπορεί να μειωθεί αντίστοιχα και το ενεργειακό κόστος της δέσμευσης, ανάλογα πάντα και με την τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί. Οι υψηλές τιμές της μερικής πίεσης που παρατηρούνται σημαίνουν ότι η δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα από τέτοια αέρια ρεύματα μπορεί να είναι σημαντικά αποδοτική. Επίσης και άλλα αέρια ρεύματα των διεργασιών αυτών μπορούν να είναι κατάλληλα για εφαρμογή τεχνολογίας δέσμευσης, πριν ή μετά την καύση, στα οποία περιέχεται σχεδόν 70% κατ' όγκο μονοξείδιο του άνθρακα και 16% κατ' όγκο διοξείδιο του άνθρακα (Thambimuthu, *et al.*, 2009).

#### **Διυλιστήρια πετρελαίου**

Τα διυλιστήρια πετρελαίου αποτελούν επίσης σημαντική πηγή εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Ένα διυλιστήριο μεγάλης δυναμικότητας μπορεί να παράγει και να εκπέμπει στην ατμόσφαιρα περίπου 1 εκατομμύριο τόνους διοξειδίου του άνθρακα ανά έτος. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ποσότητας προέρχεται από τους λέβητες και τους θερμαντές, των οποίων τα καυσαέρια είναι παρόμοια με αυτά των σταθμών παραγωγής ενέργειας. Οι τεχνολογίες δέσμευσης που είναι δυνατό να εφαρμοστούν σε εγκαταστάσεις διύλισης πετρελαίου θα είναι ίδιες με αυτές που προτείνονται για τους ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς (Thambimuthu, *et al.*, 2009).

#### **Καθαρισμός φυσικού αερίου**

Συνήθως στα αποθέματα του φυσικού αερίου περιέχονται σημαντικές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα της τάξεως του 20% κατ' όγκο ή και ακόμη περισσότερο. Από τις ποσότητες αυτές θα πρέπει να απομακρύνεται ένα μεγάλο μέρος ώστε τελικά να προκύπτει ρεύμα φυσικού αερίου ποιοτικά κατάλληλο προς εμπορική χρήση (David, 2000). Εκτός από εγκαταστάσεις όπου το διοξείδιο του άνθρακα που περιέχεται στο φυσικό αέριο, δεσμεύεται και αποθηκεύεται, (π.χ. Sleipner Project στη Νορβηγία) στις υπόλοιπες ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα.

#### **Παραγωγή λιπασμάτων**

Η παραγωγή υδρογόνου, κυρίως για χρησιμοποίηση ως πρώτη ύλη στην παραγωγή λιπασμάτων με βάση την αμμωνία, πραγματοποιείται σχεδόν αποκλειστικά με διεργασίες αναμόρφωσης του φυσικού αερίου. Η ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτει



ως προϊόν της διεργασίας ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα, αλλά είναι δυνατό και να δεσμευτεί και να αποθηκευτεί, και μάλιστα σχετικά οικονομικά.

Η παραγωγή λιπασμάτων απαιτεί πολλή ενέργεια και παράγει σημαντικές ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου. Εκτιμήσεις αναφέρουν ότι η παραγωγή λιπασμάτων καταναλώνει περίπου το 1,2% της παγκόσμιας ενέργειας και είναι υπεύθυνη για περίπου 1,2% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Wood and Cowie, 2004).

### 3.6.3 Διασπαρμένες εκπομπές CO<sub>2</sub>

Μεγάλη ποσότητα ορυκτών καυσίμων (κυριώς πετρέλαιο και προϊόντα του) χρησιμοποιείται και στον τομέα των μεταφορών, (χερσαίες, θαλάσσιες και εναέριες), αλλά και σε μικρής κλίμακας παραγωγή θερμότητας ή και ισχύος. Η δέσμευση, η συλλογή και η αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα από τέτοιου τύπου πηγές εκπομπών του, δεν είναι εύκολη με τις διαθέσιμες τεχνολογίες. Είναι όμως δυνατή η επίτευξη μειώσεων και σε αυτού του είδους τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, με χρήση μορφών ενέργειας που δεν περιέχουν άνθρακα. Χαρακτηριστική περίπτωση είναι αυτή του υδρογόνου, που χρησιμοποιείται ως μέσο ενέργειας, καθώς και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παραγωγή του υδρογόνου είναι δυνατή από ορυκτά καύσιμα, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες δέσμευσης. Τα εναλλακτικά σενάρια που παρουσιάζουν μελλοντικές προοπτικές, για τέτοιου είδους εφαρμογές, είναι τα εξής:

- Η εισαγωγή κυψελών υδρογόνου για χρήση τους σαν φορέα καυσίμου-ενέργειας ή ακόμη και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ανάγκη για εγκαταστάσεις κεντρικής παραγωγής υδρογόνου και να αυξήσει σημαντικά την προοπτική απομάκρυνσης του διοξειδίου του άνθρακα.
- Η χρήση ηλεκτρικών οχημάτων, αφού ο διαχωρισμός και η δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα σε κεντρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας είναι τεχνικά εφικτός όπως έχει αναφερθεί και θα οδηγήσει έμμεσα, σε μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (David, 2000).

## **Κεφάλαιο 4**

### **Τεχνολογίες Δέσμευσης CO<sub>2</sub>**

#### **4.1 Εισαγωγή**

Η χρήση καυσίμων με χαμηλή ή μηδενική περιεκτικότητα σε άνθρακα, καθώς και η αύξηση της απόδοσης των σταθμών παραγωγής ενέργειας, μπορούν να επιφέρουν σημαντικές μειώσεις στις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα. Οι παραπάνω ενέργειες όμως, δεν είναι αρκετές για την επίτευξη σταθεροποίησης των επιπέδων του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

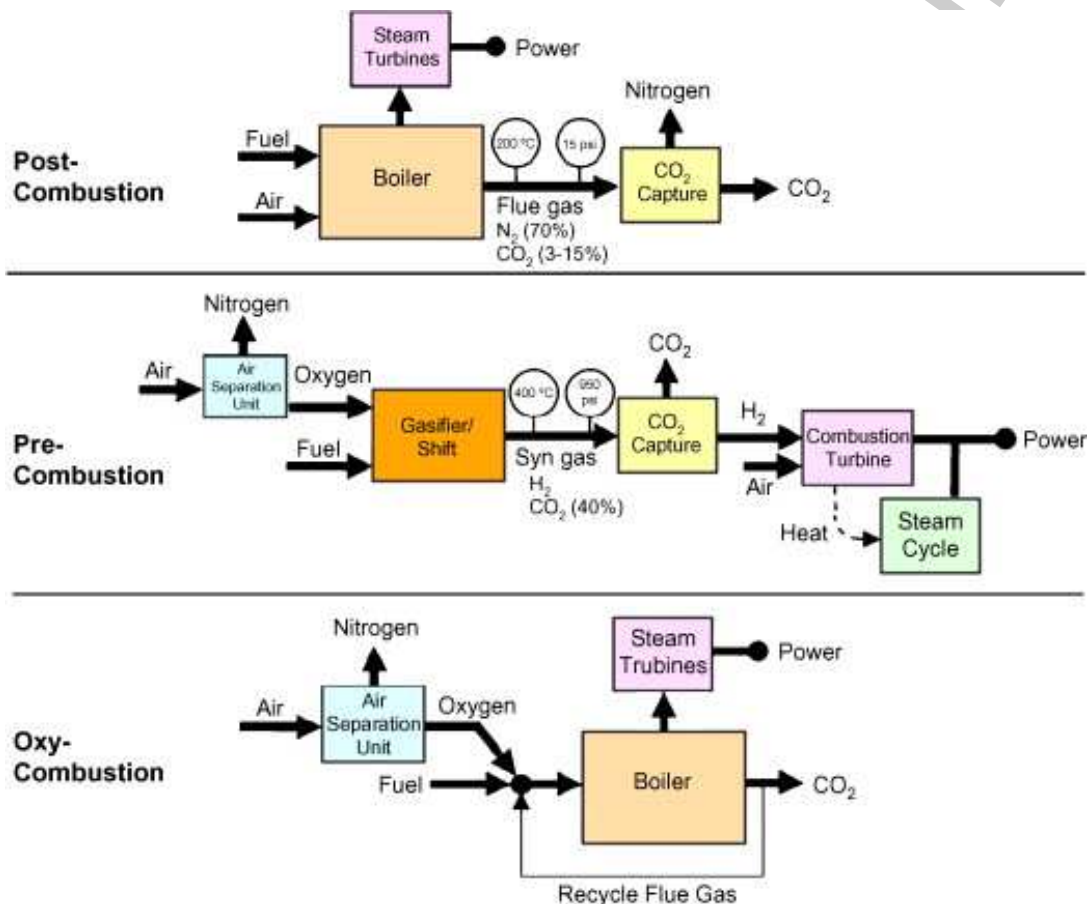
Η ανάπτυξη τεχνολογιών δέσμευσης και αποθήκευσης του διοξειδίου του άνθρακα (CCS - Carbon Capture and Storage) που παράγεται από την καύση ορυκτών καυσίμων, έχει προκαλέσει τα τελευταία χρόνια το έντονο ενδιαφέρον της ερευνητικής δραστηριότητας. Οι κυριότερες από αυτές τις τεχνολογίες είναι δυνατό να ταξινομηθούν σε τρεις ευρύτερες κατηγορίες:

1. Διαχωρισμός CO<sub>2</sub> από το καυσαέριο (Post-Combustion). Σε αυτήν την κατηγορία, το CO<sub>2</sub> διαχωρίζεται από τα υπόλοιπα συστατικά των καυσαερίων.
2. Δέσμευση του άνθρακα πριν από την καύση (Pre-Combustion). Στην περίπτωση αυτή το αποτέλεσμα των διεργασιών είναι η παραγωγή καυσίμου που δεν περιέχει άνθρακα.
3. Καύση σε αυξημένα επίπεδα συγκέντρωσης οξυγόνου και ανακυκλοφορία μέρους των καυσαερίων (Oxyfuel-combustion).

Η τεχνολογία της δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα είναι γνωστή για περίπου 60 χρόνια από τις διεργασίες επεξεργασίας του φυσικού αερίου. Η ιδέα της δέσμευσής του από τα καυσαέρια δεν προέκυψε από την ανάγκη μείωσής του, αλλά μελετήθηκε αρχικά για την παραγωγή του για εμπορική χρήση. Όταν η τιμή του πετρελαίου αυξήθηκε σημαντικά, στα τέλη της δεκαετίας του 1970, οι ιδιοκτήτες πετρελαιοπηγών δημιούργησαν τη ζήτηση διοξειδίου του άνθρακα για ενίσχυση της ανάκτησης πετρελαίου από τα κοιτάσματα (Enhanced Oil Recovery). Αποτέλεσμα ήταν η κατασκευή αρκετών εμπορικών μονάδων δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, στις Ηνωμένες Πολιτείες. Στα μέσα της δεκαετίας του 1980 όταν άρχισε να μειώνεται η τιμή του πετρελαίου, οι περισσότερες από αυτές έκλεισαν. Στα επόμενα χρόνια κατασκευάστηκαν άλλες, για παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα για

διάφορες χρήσεις (Biggs, 2000).

Στο σχήμα 4.1.1 παρουσιάζονται τα διαγράμματα ροής των τριών διαφορετικών προσεγγίσεων για την δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα από μια εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



(Πηγή: Figueroa et al., 2007)

Σχήμα 4.1.1: Διαγράμματα ροής των τριών προσεγγίσεων δέσμευσης του CO<sub>2</sub>

Οι τεχνολογίες που βρίσκονται στο στάδιο δοκιμαστικής ή εμπορικής διάθεσης από τις κατασκευάστριες εταιρείες για εφαρμογές σε θερμοηλεκτρικές μονάδες μεγάλης κλίμακας είναι:

- Η χημική απορρόφηση του CO<sub>2</sub>.
- Η καύση με καθαρό O<sub>2</sub> (oxy-fuel).
- Η αεριοποίηση του άνθρακα (coal gasification - water shift reaction).
- Η αναμόρφωση του μεθανίου σε H<sub>2</sub> και CO<sub>2</sub> (CH<sub>4</sub> reforming).

Ωστόσο, υπάρχουν και οι τεχνολογίες που βρίσκονται στο στάδιο της ανάπτυξης σε ερευνητικό επίπεδο. Σε αυτήν την κατηγορία συμπεριλαμβάνονται:

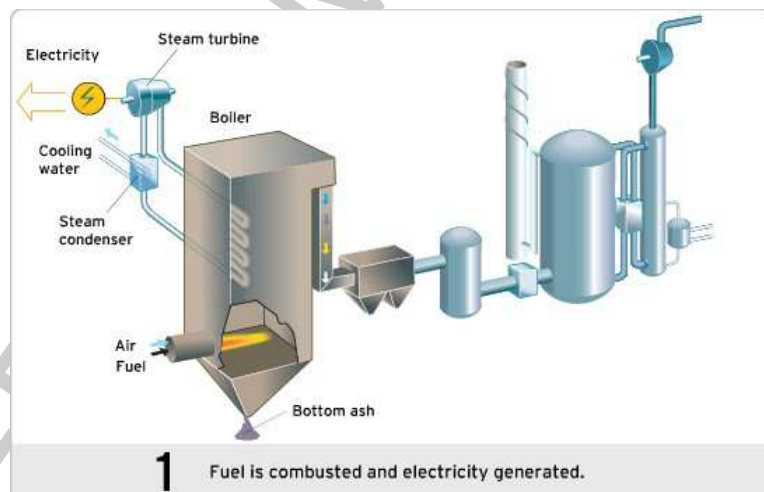
- Καύση με οξείδια μετάλλων (Chemical looping combustion).

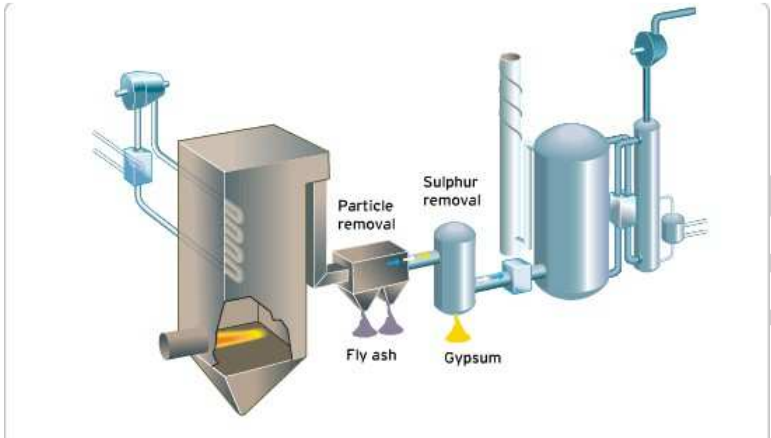
- Μεμβράνες.
- Διαχωρισμός του H<sub>2</sub> από το αέριο καύσιμο.
- Διαχωρισμός του CO<sub>2</sub> από τα καυσαέρια ή το αέριο καύσιμο.
- Κελιά καυσίμου.
- Φυσική προσρόφηση (Κουμανάκος, 2009).

#### **4.2 Διαχωρισμός CO<sub>2</sub> από το καυσαέριο (Post-Combustion)**

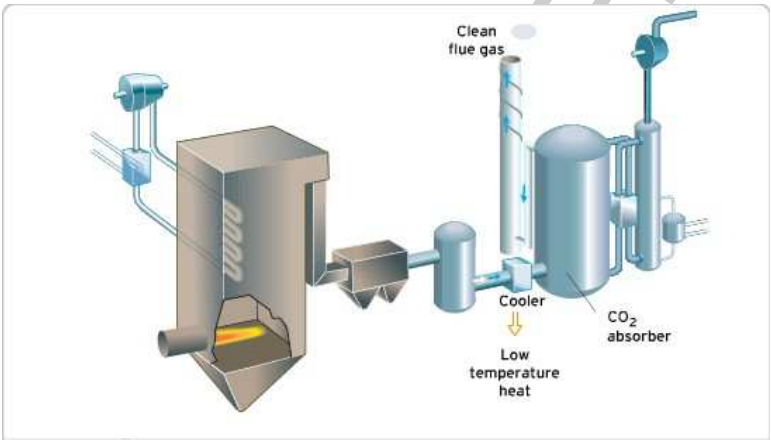
Στην περίπτωση της δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα μετά την καύση, πραγματοποιείται διαχωρισμός αυτού από το ρεύμα των καυσαερίων. Η διεργασία παρουσιάζεται απλοποιημένη και ανά στάδιο στο σχήμα 4.2.1.

Η τεχνική της δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα μετά την καύση είναι παραπλήσια της τεχνολογίας υγρής αποθείωσης που χρησιμοποιείται ευρέως σε μεγάλη κλίμακα, τόσο σε ανθρακικούς όσο και σε πετρελαϊκούς σταθμούς, με σκοπό την απομάκρυνση του διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>) από τα καυσαέρια (IEA, 2001).

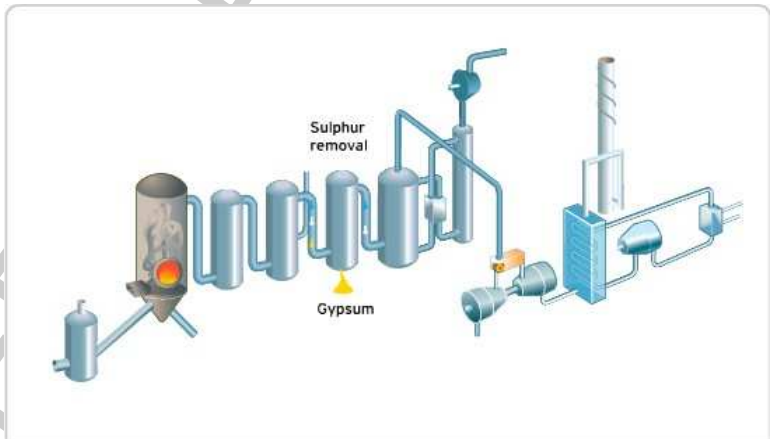




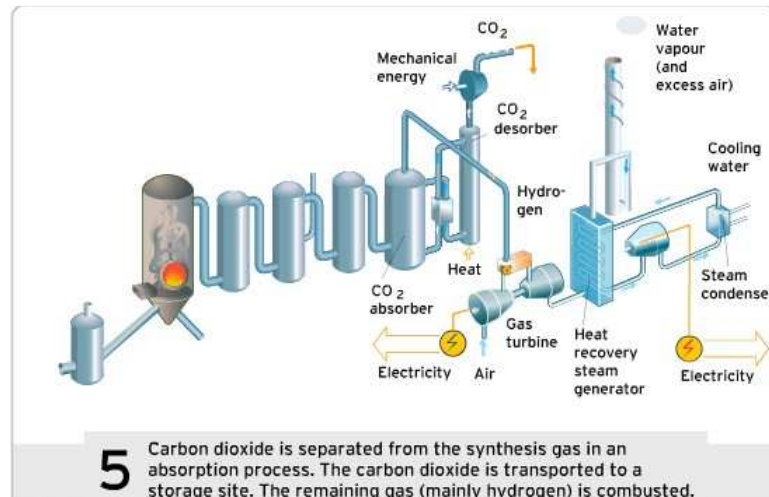
**2** The flue gas is cleaned from residuals such as particles and sulphur.



**3** Carbon dioxide is separated from the flue gas in an absorption process, using a chemical solvent. The clean flue gas is vented.



**4** The gas is cleaned from sulphur either before or after the shift reactor.



(Πηγή: Vattenfall)

Σχήμα 4.2.1: Απλοποιημένη απεικόνιση Post-Combustion εγκατάστασης δέσμευσης του CO<sub>2</sub>

Τα σημαντικότερα είδη των τεχνολογιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιτευχθεί η δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα μετά την καύση, κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Χημική και φυσική απορρόφηση.
- Φυσική και χημική προσρόφηση.
- Μεμβράνες.
- Κρυογενικός διαχωρισμός.
- Άλλες τεχνολογίες.

#### 4.2.1 Απορρόφηση CO<sub>2</sub>

Το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να απομακρυνθεί από αέριο ρεύμα χρησιμοποιώντας διεργασίες απορρόφησης. Ανάλογα με το αν λαμβάνει χώρα ή όχι, χημική αντίδραση έπειτα από τη διάλυση της δεσμευμένης ουσίας μεταξύ αυτής και του απορροφητικού μέσου, διακρίνονται σε διεργασίες χημικής ή φυσικής απορρόφησης (David, 2000).

Η χημική απορρόφηση εφαρμόζεται όταν η παροχή του αερίου είναι υψηλή (άνω των 150 m<sup>3</sup>/s) και όταν η μερική πίεση του CO<sub>2</sub> είναι χαμηλή (< 7bar). Από την άλλη μεριά, η φυσική απορρόφηση είναι επίσης κατάλληλη για υψηλές παροχές αερίων, αλλά η μερική πίεση του CO<sub>2</sub> πρέπει να είναι υψηλή (> 7bar), (Κουμανάκος, 2009).

Τα συστήματα απορρόφησης, αποτελούν τη συνηθέστερη από τις υπάρχουσες τεχνολογίες δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα από αέριο ρεύμα και χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στη βιομηχανία του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, καθώς και σε μεγάλες χημικές βιομηχανίες. Η διαδικασία περιλαμβάνει έκπλυση του προς καθαρισμού ρεύματος

καυσαερίου σε πύργο απορρόφησης (στήλη με πληρωτικό υλικό ή δίσκους), ώστε να συγκεντρωθεί το διοξείδιο του άνθρακα και στη συνέχεια ακολουθεί η αναγέννηση του διαλύτη, οπότε ελευθερώνεται και η δεσμευμένη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα, με πρόσδοση της απαραίτητης θερμότητας ή/και με μείωση της θερμοκρασίας. Στο στάδιο της αναγέννησης της απορροφημένης ουσίας, αυτή μεταφέρεται από την υγρή φάση σε φάση ατμών. Ο εξοπλισμός που απαιτείται στο στάδιο αυτό εξαρτάται από το αν η διεργασία που πραγματοποιείται στηρίζεται σε χημική ή σε φυσική διάλυση.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα του διαχωρισμού με διεργασίες απορρόφησης σχετίζονται με τον περιορισμό στην ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα που μπορεί να δεσμευτεί και τις υψηλές απαιτήσεις ενέργειας, μειονεκτήματα τα οποία οφείλονται στη στοιχειομετρία και τη θερμότητα αντίδρασης, αντίστοιχα. Επιπλέον, απαιτούνται εκτεταμένες εγκαταστάσεις για την κυκλοφορία των μεγάλων όγκων των απορροφητικών ουσιών. Παρόλα αυτά, η δέσμευση που στηρίζεται σε διεργασίες απορρόφησης αποτελεί ανταγωνιστική μέθοδο για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας και κυρίως για τις περιπτώσεις στις οποίες το διοξείδιο του άνθρακα εμφανίζεται σε αέρια μίγματα σχετικά υψηλής τιμής πίεσης με συστατικά που αντιδρούν αντιστρεπτά με τις απορροφητικές ουσίες (David, 2000).

#### **4.2.1.1 Χημική Απορρόφηση**

Στις τεχνολογίες χημικής απορρόφησης γίνεται χρήση υλών που αντιδρούν χημικά με το CO<sub>2</sub>. Οι αμίνες αποτελούν τις πιο κατάλληλες οργανικές ενώσεις. Η χημική απορρόφηση του CO<sub>2</sub> σε στήλη υγρού διαχωρισμού με μονοεθανολαμίνη (MEA) είναι μια τεχνολογία εμπορικά δοκιμασμένη με επιτυχία. Η απομάκρυνση του CO<sub>2</sub> είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί σε ποσοστό άνω του 98%, ενώ το τελικό προϊόν έχει καθαρότητα άνω του 99% κ.ο. Τα συστήματα χημικής απορρόφησης χρησιμοποιούν συνήθως υδάτινο διάλυμα MEA με περιεκτικότητα 15-25% κ.β.

Τα καυσαέρια εισέρχονται στη στήλη απορρόφησης η οποία λειτουργεί σε θερμοκρασία 40-60°C, όπου απομακρύνεται από αυτά το CO<sub>2</sub>. Τα καυσαέρια που έχουν συμπιεστεί μέχρι τα 1,12-1,13bar, έρχονται σε επαφή κατ' αντιστροφή με το υδάτινο διάλυμα αμίνης. Η είσοδος των καυσαερίων γίνεται στο κάτω μέρος της στήλης, ενώ το διάλυμα ψεκάζεται από το άνω μέρος αυτής. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η συγκέντρωση των καυσαερίων σε SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> και σωματίδια είναι επιθυμητό να είναι αρκετά χαμηλή. Η αναγέννηση του διαλύματος της αμίνης γίνεται σε ξεχωριστή στήλη και σε θερμοκρασία 100-150°C ενώ η πίεση είναι

χαμηλή για τη διευκόλυνση της αποβολής του απορροφηθέντος CO<sub>2</sub>. Το ρεύμα του CO<sub>2</sub> εξέρχεται από το άνω μέρος της στήλης μαζί με υδρατμούς οι οποίοι στη συνέχεια συμπυκνώνονται. Το θερμό διάλυμα της αμίνης αφού έχει αναγεννηθεί θερμαίνει το ρεύμα του διαλύματος που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης.

Η απαιτούμενη ενέργεια για την αναγέννηση του διαλύματος αμίνης ανέρχεται στα 4MJ/kg CO<sub>2</sub> που απομακρύνεται, ενώ η συμπίεση των καυσαερίων στην είσοδο του συστήματος και η ηλεκτρική κατανάλωση των αντλιών αμίνης ανέρχεται στα 0,11MJ/kg CO<sub>2</sub> που δεσμεύεται. Οι πιο συνηθισμένες χημικές ύλες που χρησιμοποιούνται για τη χημική απορρόφηση του CO<sub>2</sub> είναι οι αλκανολαμίνες και συγκεκριμένα:

- Μονοεθανολαμίνη (MEA)
- Διγλυκολαμίνη (DGA)
- Διεθανολαμίνη (DEA)
- Δισοπροπυλαμίνη (DIPA)
- Τριεθανολαμίνη (TEA)
- Μεθυλδιεθανολαμίνη (MDEA)

Η χημική αντίδραση του CO<sub>2</sub> με υδατικό διάλυμα MEA είναι:



Σε αυτήν την αντίδραση φαίνεται ότι απαιτούνται 2 mol MEA για τη δέσμευση 1 mol CO<sub>2</sub>, καταδεικνύοντας έτσι ότι η απορροφητικότητα του διαλύματος αμίνης δεν είναι μεγάλη (Κουμανάκος, 2009).

Από τις πρωτοταγείς αμίνες η MEA αποτελεί τη συνήθη επιλογή για απορρόφηση του διοξειδίου του άνθρακα και απομάκρυνση οξικών αερίων γενικότερα. Είναι η λιγότερο δαπανηρή και παρουσιάζει θεωρητικά την υψηλότερη ικανότητα απορρόφησης για το διοξείδιο του άνθρακα. Όμως, η βέλτιστη ικανότητα απορρόφησης δεν παρουσιάζεται και πρακτικά λόγω προβλημάτων διάβρωσης. Επιπρόσθετα έχει τη μεγαλύτερη τάση ατμών από όλες τις αλκανολαμίνες και μπορεί να πραγματοποιήσει υψηλή μεταφορά διαλύτη από το προς καθαρισμό αέριο ρεύμα στο στάδιο της αναγέννησης. Για να μειωθεί η απώλεια διαλύτη συνήθως απαιτείται έκπλυση με νερό. Επιπλέον αντιδρά αναντιστρεπτά και με ελάχιστες ποσότητες ακαθαρσιών (COS, CS<sub>2</sub>), οδηγώντας σε αποικοδόμηση του διαλύτη (DTI, 2002).

Οι δευτεροταγείς αμίνες παρουσιάζουν πλεονεκτήματα σε σχέση με τις πρωτοταγείς αφού η θερμότητα αντίδρασης τους με το διοξείδιο του άνθρακα είναι μικρότερη σε σχέση με των πρωτοταγών, δηλαδή οι δευτεροταγείς απαιτούν λιγότερη θερμότητα για την αναγέννηση.

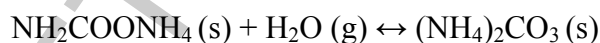
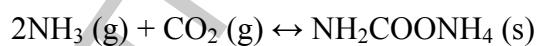
Οι τριτοταγείς αμίνες αντιδρούν με το διοξείδιο του άνθρακα σε μικρότερο ρυθμό από τις



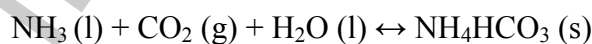
πρωτοταγείς και τις δευτεροταγείς και έτσι απαιτούν υψηλότερο ρυθμό ανακυκλοφορίας για επίτευξη της ίδιας απομάκρυνσης. Σημαντικό πλεονέκτημά τους αποτελεί η χαμηλότερη απαίτηση θερμότητας για αναγέννηση. Επίσης, παρουσιάζουν μικρότερη τάση σχηματισμού προϊόντων αποικοδόμησης σε σχέση με τις πρωτοταγείς και τις δευτεροταγείς (Wong and Bioletti, 2002).

Ένα πρόβλημα της διεργασίας της χημικής απορρόφησης είναι η αποικοδόμηση της χημικής σύστασης του διαλύματος. Τα παραπροϊόντα που δημιουργούνται μειώνουν την αποτελεσματικότητα στην απορρόφηση του CO<sub>2</sub> και συμβάλλουν στην διάβρωση του εξοπλισμού. Για το λόγο αυτό, λαμβάνονται μέτρα όπως η απομάκρυνση των παραπροϊόντων από το σύστημα και η συνεχής συμπλήρωση νέου διαλύματος. Για το λόγο αυτό, το κόστος λειτουργίας της εγκατάστασης εμφανίζεται αυξημένο. Η αποικοδόμηση της χημικής σύστασης της αμίνης επιβάλλει η περιεκτικότητα του διαλύματος σε MEA να είναι χαμηλή. Έτσι, η κατανάλωση ενέργειας για την αναγέννηση του διαλύματος είναι σημαντικά αυξημένη.

Ο χημικός διαχωρισμός του CO<sub>2</sub> από τα καυσαέρια με αμμωνία αποτελεί μια σχετικά νέα τεχνική με υψηλή απόδοση σε ότι αφορά την απορροφητικότητα του διαλύματος. Βάσει αυτής της τεχνολογίας είναι δυνατό το CO<sub>2</sub> να απομακρύνεται σε ποσοστό 95-99% από τα καυσαέρια. Σε ατμοσφαιρική πίεση (1 atm) και θερμοκρασίες δωματίου, το CO<sub>2</sub> ενώνεται με την NH<sub>3</sub> η οποία βρίσκεται σε αέρια φάση, παράγοντας ανθρακικό αμμώνιο (NH<sub>2</sub>COONH<sub>4</sub>):



Με τη μέθοδο του υγρού διαχωρισμού, το CO<sub>2</sub> αντιδρά με το νερό και την αμμωνία η οποία βρίσκεται σε υγρή φάση, παράγοντας διανθρακικό αμμώνιο:



Από την τελευταία αντίδραση φαίνεται ότι 1 mol NH<sub>3</sub> είναι δυνατό να δεσμεύσει 1 mol CO<sub>2</sub>. Η ενέργεια που απαιτείται για την αναγέννηση του αντιδραστηρίου με NH<sub>3</sub> είναι χαμηλότερη από αυτήν που απαιτείται για την αναγέννηση του αντιδραστηρίου με MEA. Στα πιθανά προβλήματα αυτής της τεχνολογίας συμπεριλαμβάνεται η εξάτμιση της NH<sub>3</sub> και του διανθρακικού αμμωνίου. Επιπλέον, δεδομένου ότι η αντίδραση απορρόφησης του CO<sub>2</sub> πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες δωματίου, τα καυσαέρια θα πρέπει να ψυχθούν πριν την είσοδό τους στο σύστημα και να αναθερμανθούν στην έξοδό του (Κουμανάκος, 2009).

#### 4.2.1.2 Φυσική Απορρόφηση

Η διεργασία της φυσικής απορρόφησης είναι ευρέως καθιερωμένη, κυρίως λόγω της εφαρμογής της σε μονάδες παραγωγής αμμωνίας. Πρόκειται για τη διεργασία της έκπλυσης του αερίου και διαχωρισμού του από το μίγμα όπου περιέχεται, με τον ίδιο τρόπο που περιγράφεται και για την περίπτωση της χημικής απορρόφησης. Η διαφορά στη φυσική απορρόφηση έγκειται στο γεγονός ότι ο χρησιμοποιούμενος διαλύτης για απορρόφηση του CO<sub>2</sub> από το αέριο μίγμα, δεν αντιδρά χημικά με αυτό.

Στα συστήματα φυσικής απορρόφησης υπάρχουν επίσης, δύο στήλες. Στην πρώτη λαμβάνει χώρα η διεργασία της απορρόφησης του CO<sub>2</sub> από το κατά αντιρροή ρεύμα στο οποίο περιέχεται και στη δεύτερη ελευθερώνεται το δεσμευμένο CO<sub>2</sub> και αναγεννάται ο διαλύτης.

Σε αυτές τις διεργασίες ισχύει ο νόμος του Henry, δηλαδή ο βαθμός απορρόφησης του CO<sub>2</sub> εξαρτάται από την πίεση και τη θερμοκρασία. Η απορρόφηση πραγματοποιείται σε υψηλές τιμές μερικής πίεσης του CO<sub>2</sub> και σε χαμηλές τιμές θερμοκρασίας. Οι φυσικοί διαλύτες ανακτώνται πολύ πιο εύκολα, είτε με θέρμανση είτε με μείωση της πίεσης. Η διεργασία ενδείκνυται για τις περιπτώσεις που η συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> δηλαδή η μερική πίεσή του, είναι υψηλή (μεγαλύτερη των 525kPa). Χαρακτηριστική τέτοια περίπτωση αποτελεί το CO<sub>2</sub> που παράγεται ως προϊόν συστημάτων αεριοποίησης συνδυασμένου κύκλου (IGCC), όπου τα καυσαέρια εξέρχονται σε ανυψωμένες τιμές πίεσης (Wong and Bioletti, 2002).

Η φυσική απορρόφηση πραγματοποιείται σε χαμηλές τιμές θερμοκρασίας, από -5°C ως -10°C. Υπάρχει ένα κατώτατο όριο στην τιμή της θερμοκρασίας, λόγω της αύξησης του ιξώδους με μείωση της τιμής της θερμοκρασίας, που οδηγεί σε μικρό ρυθμό μεταφοράς μάζας (Koljonen *et al.*, 2002).

Τυπικοί διαλύτες διεργασιών φυσικής απορρόφησης είναι οι Selexol (πολυαιθυλενικός διμεθυλαιθέρας γλυκόλης) και Rectisol (ψυχρή μεθανόλη), η Ν-μεθυλο-2-πυρρολιδόνη, και το ανθρακικό προπυλένιο (διεργασία Fluor).

Η διεργασία Selexol χρησιμοποιείται αρκετές δεκαετίες σε διεργασίες φυσικού αερίου, για απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα αλλά και του υδρόθειου. Πρόκειται για υγρό φυσικό διαλύτη που παρασκευάστηκε από την Allied Signal στη δεκαετία του 1950. Ο Selexol είναι ένα μίγμα διμεθυλαιθέρων της πολυαιθυλενο-γλυκόλης και ο χημικός τύπος του είναι ο CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>CH<sub>3</sub>, με το n να παίρνει τιμές από το 3 ως και το 9.

Οι αμίνες, ως διαλύτες, αντιδρούν προς σχηματισμό ενός χημικού δεσμού με το οξικό αέριο, όμως οι διαλύτες Selexol λειτουργούν ως φυσικοί διαλύτες και δεν λαμβάνει χώρα χημική

αντίδραση με το προς απορρόφηση αέριο. Η ικανότητα των διαλυτών Selexol να μην αντιδρούν χημικά με το αέριο αποτελεί επιθυμητό χαρακτηριστικό. Αποφεύγεται ο σχηματισμός θερμικά σταθερών αλάτων που, στην περίπτωση χρήσης χημικών διαλυτών, αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα. Το στάδιο της απορρόφησης πραγματοποιείται σε χαμηλές τιμές θερμοκρασίας (περίπου 0-5°C), ενώ το στάδιο αποβολής του απορροφηθέντος αερίου μπορεί να επιτευχθεί με μείωση της τιμής της πίεσης, ή χρησιμοποιώντας αέρα, αδρανές αέριο ή ατμό. Από το διαλύτη απομακρύνονται επίσης περιεχόμενοι υδρογονάνθρακες, COS, CS<sub>2</sub> και μερκαπτάνη. Η χαμηλή θερμοκρασία, υπό την οποία πραγματοποιείται η απορρόφηση, οδηγεί στην απαίτηση επιστροφής του φτωχού διαλύματος στον απορροφητή διαμέσω μιας μονάδας ψύξης.

Η διεργασία Rectisol χρησιμοποιείται κυρίως με σκοπό την επεξεργασία χημικής σύνθεσης αερίου υδρογόνου, και απομακρύνει τις περισσότερες από τις προσμίξεις.

Οι διαλύτες που περιγράφηκαν παραπάνω δεν είναι τόσο ισχυρά δραστικοί με το διοξείδιο του άνθρακα όπως οι χημικοί διαλύτες. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα που παρουσιάζει η χρήση των φυσικών διαλυτών σε διεργασίες δέσμευσης του CO<sub>2</sub> είναι το γεγονός των ελάχιστων ενεργειακών απαιτήσεων κατά το στάδιο της αναγέννησης. Η απομάκρυνση του δεσμευμένου αερίου CO<sub>2</sub> από το υγρό και η ανάκτησή του, είναι δυνατή μόνο με μείωση της τιμής της πίεσης.

Οι ανάγκες για βελτίωση των συστημάτων φυσικής απορρόφησης είναι παρόμοιες με αυτές των συστημάτων χημικής απορρόφησης. Επίσης, απαιτείται η ανάπτυξη περισσότερο αποτελεσματικών συσκευών επαφής υγρού-αερίου και η εύρεση βελτιωμένων διαλυτών οι οποίοι θα απαιτούν χαμηλότερη ενέργεια κατά το στάδιο της αναγέννησής τους (Wong and Bioletti, 2002).

#### 4.2.2 Προσρόφηση CO<sub>2</sub>

Οι διεργασίες διαχωρισμού με φυσική ή με χημική προσρόφηση στηρίζονται στην ικανότητα που εμφανίζουν κάποια στερεά σώματα με μεγάλη ενεργή επιφάνεια λόγω του πορώδους τους ή της κοκκώδους δομής τους, να προσροφούν αντιστρεπτά, μεγάλες ποσότητες συγκεκριμένου συστατικού από μίγμα στο οποίο περιέχεται. Η προσροφητική ικανότητα οφείλεται στις δυνάμεις έλξης που αναπτύσσονται μεταξύ των μορίων του αερίου και του προσροφητικού στερεού -ενδομοριακές δυνάμεις- το οποίο έχει πορώδη δομή και συνεπώς παρουσιάζει σχετικά μεγάλη επιφάνεια προσροφήσεως ανά μονάδα μάζας. Πρόκειται για

αντιστρεπτή διεργασία όπου είναι δυνατή η αναγέννηση της προσροφητικής ουσίας η οποία χρησιμοποιείται αρκετές φορές. Ανάλογα με την τιμή θερμοκρασίας, τις μερικές πιέσεις, την επιφανειακή τάση και το πορώδες του προσροφητικού μέσου, μπορεί να πραγματοποιηθεί προσρόφηση ενός ή/και περισσότερων στρωμάτων των αερίων (Meisen *and* Shuai, 1997).

Στο πρώτο στάδιο κατά τη διεργασία της προσρόφησης, το αέριο μίγμα τροφοδοτείται σε κλίνη του προσροφητικού υλικού όπου το περιεχόμενο CO<sub>2</sub> προσροφάται, ενώ όλα τα υπόλοιπα αέρια συστατικά του μίγματος περνούν ελεύθερα. Όταν μία κλίνη κορεστεί πλήρως σε CO<sub>2</sub>, το αέριο τροφοδοτείται σε άλλη κλίνη προσρόφησης, ενώ η πρώτη, πλήρης, αναγεννάται ώστε να απομακρυνθεί η προσροφημένη ποσότητα του CO<sub>2</sub>. Η αναγέννηση του προσροφητή (διεργασία εκρόφησης) μπορεί να επιτευχθεί με μείωση της τιμής της πίεσης ή αύξηση της τιμής της θερμοκρασίας. Ο πρώτος από τους τρόπους αυτούς ονομάζεται PSA: Pressure Swing Adsorption (προσρόφηση κλιμακούμενης πίεσης) και ο δεύτερος τρόπος TSA: Thermal Swing Adsorption (προσρόφηση κλιμακούμενης θερμοκρασίας). Στην περίπτωση της PSA, το αέριο μίγμα ρέει μέσω των προσροφητικών κλινών σε αυξημένες τιμές πίεσης και χαμηλές τιμές θερμοκρασίας ώσπου η προσρόφηση του επιθυμητού συστατικού του μίγματος να φτάσει σε συνθήκες ισορροπίας στην έξοδο της κλίνης. Οι χρησιμοποιούμενες κλίνες στη συνέχεια αναγεννιούνται με παύση της ροής του μίγματος τροφοδοσίας, με αύξηση της τιμής της πίεσης και με εξαγωγή του προσροφημένου συστατικού. Αφού ολοκληρωθεί, με τον τρόπο αυτό, το στάδιο της αναγέννησης, οι κλίνες είναι έτοιμες ώστε να χρησιμοποιηθούν και πάλι σε νέο κύκλο της διεργασίας προσρόφησης (Meisen *and* Shuai, 1997).

Η PSA χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση του CO<sub>2</sub> από αέρια μίγματα που βρίσκονται σε υψηλή πίεση. Συνεπώς, για εφαρμογή στα καυσαέρια θερμοηλεκτρικών μονάδων είναι απαραίτητη η χρήση συμπιεστή. Υλικά που χρησιμοποιούνται είναι:

- Ενεργοποιημένο κωκ
- Άνθρακας
- Ζεόλιθος
- Ενεργοποιημένη αλουμίνα

Η PSA είναι μια τεχνική δέσμευσης του CO<sub>2</sub> που παρουσιάζει ενδιαφέρον κυρίως λόγω των χαμηλών απαιτήσεών της σε ενέργεια (Κουμανάκος, 2009).

Στα συστήματα της TSA, το αέριο προσροφάται στην επιφάνεια του προσροφητικού υλικού σε σχετικά χαμηλές τιμές θερμοκρασίας, απομονώνεται και ακολουθεί διεργασία αποβολής του προσροφηθέντος αερίου με αύξηση της τιμής θερμοκρασίας. Γενικά οι διεργασίες αυτές

είναι δαπανηρές, ενεργειακά και οικονομικά. Στην περίπτωση της TSA, η αναγέννηση επιτυγχάνεται με κλιμακούμενη ανύψωση της τιμής θερμοκρασίας, χρησιμοποιώντας θερμό αδρανές αέριο ή ακόμη και εξωτερική θέρμανση. Η διεργασία της PSA είναι καλύτερη από της TSA, σε όλες τις περιπτώσεις και λόγω των υψηλότερων ενεργειακών απαιτήσεων, αλλά και λόγω της χαμηλότερης ταχύτητας που παρουσιάζει η διεργασία της TSA στο στάδιο της αναγέννησης (Meisen *and* Shuai, 1997).

Τα συστήματα προσρόφησης είναι σήμερα εμπορικά διαθέσιμα και βρίσκουν εφαρμογή κυρίως στην παραγωγή H<sub>2</sub> και την απομάκρυνση του CO<sub>2</sub> από το φυσικό αέριο. Σαν μειονέκτημα της τεχνικής αυτής αναφέρεται το γεγονός ότι δεν εφαρμόζονται σε περιπτώσεις που η παροχή του αερίου μίγματος είναι μεγάλη (Κουμανάκος, 2009).

#### 4.2.3 Μεμβράνες

Μίγματα αερίων και υγρών συστατικών είναι δυνατό να διαχωριστούν διαβιβαζόμενα μέσω ημιπερατών μεμβρανών με μία από τις ακόλουθες διεργασίες: υπερδιήθηση, αντίστροφη ώσμωση, ηλεκτροδιαπίδυση και διαπίδυση. Το βασικότερο από τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι μέθοδοι διαχωρισμού με μεμβράνες αφορά στη σχετικά χαμηλή απαιτούμενη ενέργεια για την πραγματοποίηση του διαχωρισμού, σε σχέση με όλες τις άλλες διαθέσιμες διεργασίες διαχωρισμού. Είναι δυνατό να διενεργείται σε χαμηλές τιμές θερμοκρασίας και χωρίς πραγματοποίηση αλλαγής φάσης. Οι μεμβράνες αποτελούν ημιπερατά εμπόδια τα οποία επιλεκτικά επιτρέπουν τη διέλευση κάποιων εκ των συστατικών του προς διαχωρισμό αερίου μίγματος (Wong *and* Bioletti, 2002).

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η διεργασία των μεμβρανών σε σχέση με το συνήθη διαχωρισμό με διεργασίες απορρόφησης, είναι:

- Δεν απαιτείται η ύπαρξη μέσου διαχωρισμού και έτσι δεν απαιτείται στάδιο ανάκτησης.
- Τα συστήματα με μεμβράνες είναι μικρότερων διαστάσεων και βάρους και έτσι μπορούν να τοποθετηθούν είτε οριζοντίως είτε καθέτως, γεγονός σημαντικό κυρίως για την προσθήκη συστήματος διαχωρισμού σε υπάρχοντες σταθμούς.
- Ο ανά μονάδα σχεδιασμός επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της μεθόδου με χρήση λειτουργίας πολλαπλών σταδίων.
- Οι απαιτήσεις για συντήρηση είναι χαμηλές αφού δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη (Wong *and* Bioletti, 2002).

Ωστόσο, οι τεχνικές αυτές βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στο διαχωρισμό αερίων με μικρότερο μοριακό βάρος από το CO<sub>2</sub>. Τέτοια εφαρμογή είναι ο διαχωρισμός του H<sub>2</sub> από το CO<sub>2</sub> στο αέριο καύσιμο που προκύπτει από την αεριοποίηση του άνθρακα. Για θερμοκρασίες χαμηλότερες των 100°C χρησιμοποιούνται πολυμερικές μεμβράνες, ενώ για θερμοκρασίες άνω των 100°C χρησιμοποιούνται κεραμικές μεμβράνες. Η απομάκρυνση του CO<sub>2</sub> από το αέριο καύσιμο γίνεται με την παρουσία CO, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O και H<sub>2</sub>S (Κουμανάκος, 2009).

#### 4.2.4 Κρυγενικός διαχωρισμός

Το CO<sub>2</sub> μπορεί επίσης να διαχωριστεί από άλλα αέρια με επαναλαμβανόμενα βήματα ψύξης και συμπίεσης. Η τεχνική του κρυγενικού διαχωρισμού του CO<sub>2</sub> από αέριο μείγμα, υπαγορεύει την ύπαρξη χαμηλών θερμοκρασιών. Για συνθήκες άνω του τριπλού σημείου (-56,6°C και 5,18bar), το CO<sub>2</sub> λαμβάνεται σε υγρή μορφή ενώ τα υπόλοιπα συστατικά του καυσαερίου παραμένουν στην αέρια φάση. Η μέθοδος χρησιμοποιείται εμπορικά για την υγροποίηση και τον καθαρισμό του CO<sub>2</sub> από υψηλής καθαρότητας πηγές (συγκέντρωση μεγαλύτερη του 90%) και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διαχωρισμό αραιών ρευμάτων. Ως μέθοδος απομάκρυνσης είναι περισσότερο οικονομική όταν το αέριο τροφοδοσίας είναι διαθέσιμο σε υψηλή τιμή πίεσης (Koljonen *et al.*, 2002).

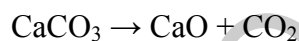
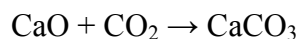
Το σημαντικότερο μειονέκτημα του κρυογενικού διαχωρισμού είναι το μεγάλο ποσό ενέργειας που απαιτείται για την ψύξη, κυρίως στις περιπτώσεις των πιο αραιών ρευμάτων. Για εφαρμογή της διεργασίας ως επεξεργασία μετά την καύση, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι στο αέριο ρεύμα περιέχονται και ενώσεις όπως τα οξείδια αζώτου, θείου και οι υδρατμοί, που παρεμβαίνουν σημαντικά στην ψύξη προκαλώντας προβλήματα διάβρωσης, υπερχειλίσης, αποφράξεων και μείωση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας. Για το λόγο αυτό απαιτείται να απομακρύνονται με ειδικές διεργασίες, πριν από την εισαγωγή του ρεύματος για επεξεργασία στο τμήμα χαμηλής θερμοκρασίας. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση παρουσίας υδρατμών η οποία μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό ενώσεων εγκλείσεως στερεού CO<sub>2</sub> και πάγου και εντέλει στη δημιουργία επιστρώσεων στον εξοπλισμό. Η απομάκρυνση των ανεπιθύμητων ενώσεων συνεισφέρει σημαντικά στο κόστος η οποία, σε συνδυασμό με τις υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις της ψύξης σε χαμηλή θερμοκρασία, καθιστούν τη διεργασία λιγότερο οικονομική από τις άλλες διεργασίες διαχωρισμού.

Το κυριότερο πλεονέκτημα της διεργασίας είναι ότι επιτρέπει απευθείας παραγωγή υγρού CO<sub>2</sub>, δηλαδή μορφή κατάλληλη για τη μεταφορά του (David, 2000).

#### 4.2.5 Κύκλος CaO/CaCO<sub>3</sub>

Μια άλλη μέθοδος διαχωρισμού του CO<sub>2</sub> κατά την οποία λαμβάνει χώρα χημική αντίδραση είναι ο κύκλος CaO/CaCO<sub>3</sub>. Ο εξοπλισμός για τη διεργασία αυτή συμπεριλαμβάνει βασικά δύο θαλάμους αντίδρασης. Στον πρώτο, το αέριο μείγμα έρχεται σε επαφή με διάλυμα που περιέχει CaO. Το CO<sub>2</sub> αντιδρά με το CaO και παράγει CaCO<sub>3</sub>. Η θερμοκρασία που επικρατεί σε αυτόν το θάλαμο αντίδρασης είναι μεγαλύτερη από 600°C. Στο δεύτερο θάλαμο πραγματοποιείται η αντίστροφη αντίδραση σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Τελικά το αντιδρόν διάλυμα αναγεννάται απελευθερώνοντας καθαρό CO<sub>2</sub>. Ο κύκλος CaO/CaCO<sub>3</sub> είναι δυνατό να συνδυαστεί με την αεριοποίηση άνθρακα, με τελικό στόχο την παραγωγή υδρογόνου.

Οι αντιδράσεις δέσμευσης του CO<sub>2</sub> και αναγέννησης του ασβεστόλιθου είναι αντίστοιχα:



Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί η δυνατότητα καύσης σε σύστημα ρευστοποιημένης κλίνης με την ταυτόχρονη δέσμευση του CO<sub>2</sub> από διάλυμα CaO. Ο θάλαμος καύσης λειτουργεί σε πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής και το οξείδιο του ασβεστίου είναι δυνατό να δεσμεύσει περισσότερο από 80% του παραγόμενου CO<sub>2</sub> και σχεδόν όλο το παραγόμενο SO<sub>2</sub>. Στον θάλαμο αναγέννησης μία μικρή ποσότητα του καυσίμου καίγεται με καθαρό O<sub>2</sub> και το CaCO<sub>3</sub> μετατρέπεται πάλι σε CaO.

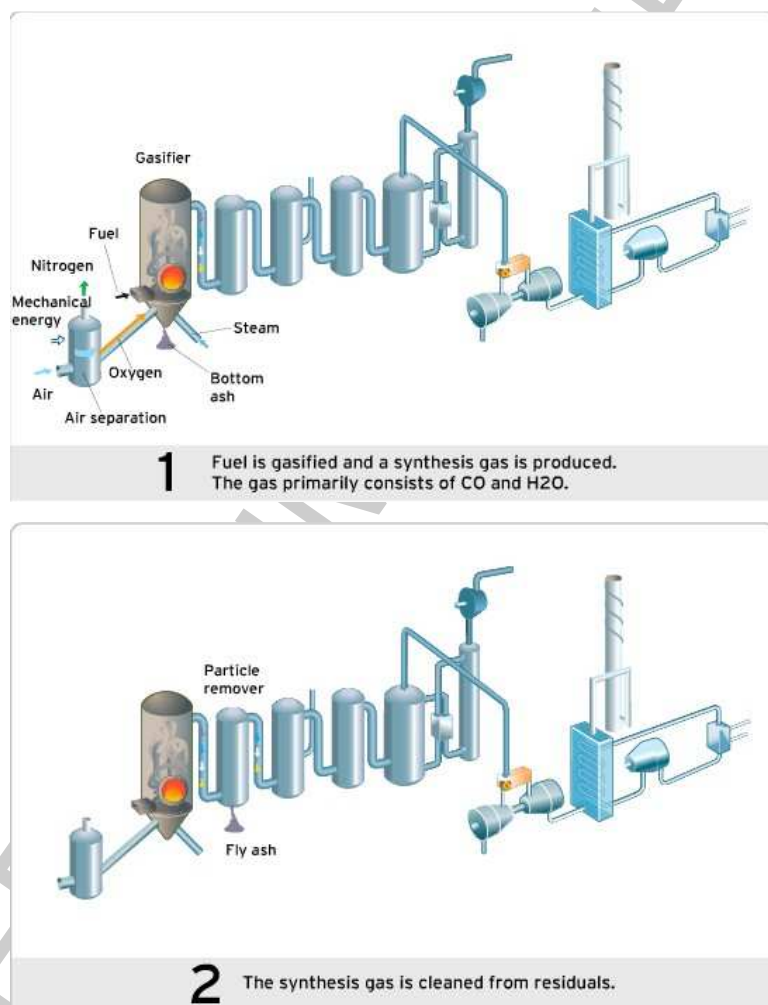
Το σημαντικότερο μειονέκτημα της εφαρμογής του κύκλου CaO/CaCO<sub>3</sub> σε συστήματα δέσμευσης του CO<sub>2</sub> είναι ότι μετά από κάποιο αριθμό κύκλων, το CaO χάνει την ικανότητα αποδοτικής απορρόφησης του CO<sub>2</sub> (Κουμανάκος, 2009).

#### **4.3 Δέσμευση του άνθρακα πριν από την καύση (Pre-Combustion)**

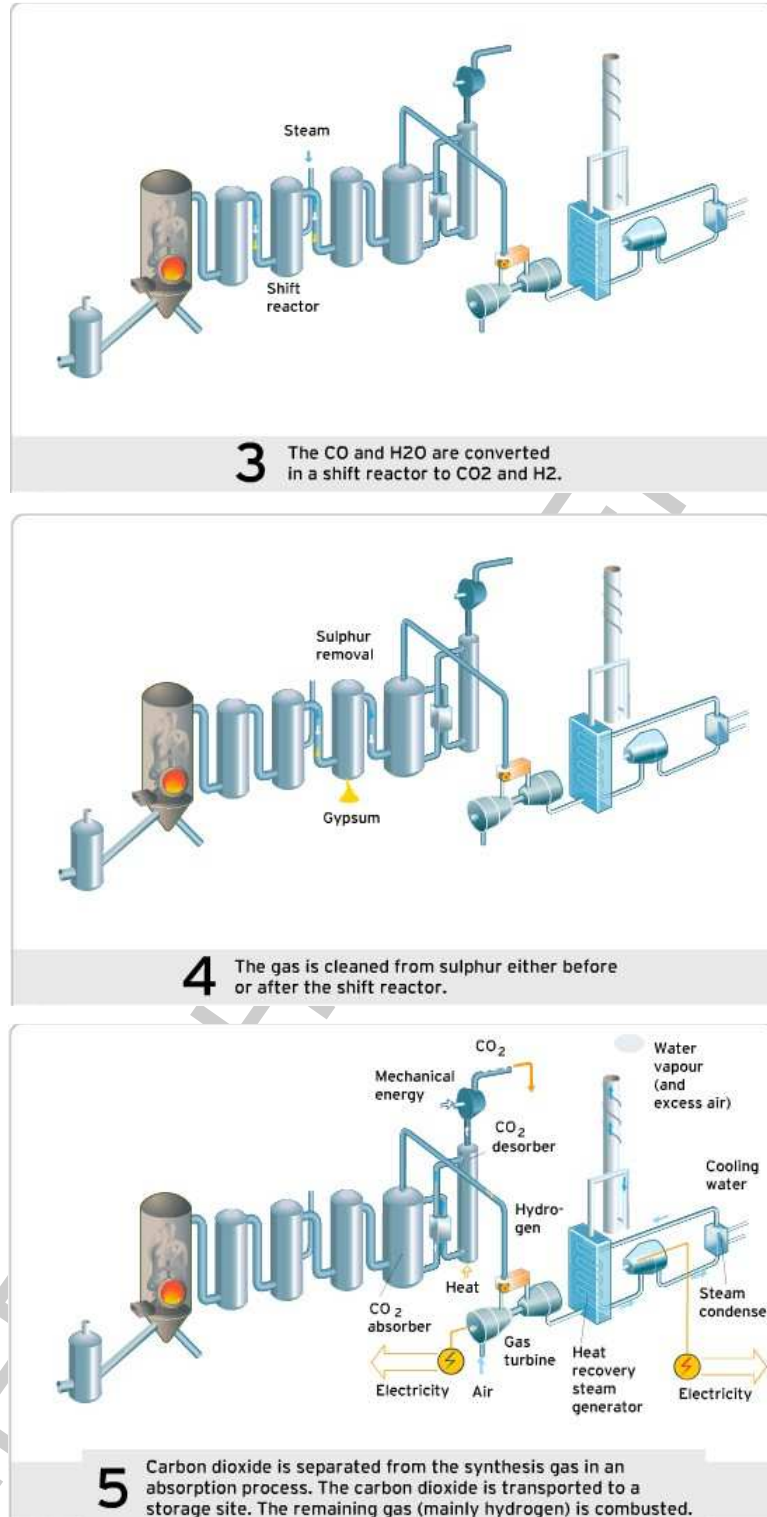
Η τεχνική της δέσμευσης πριν την καύση αποτελεί εναλλακτικό τρόπο αύξησης της τιμής της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> ή της μερικής πίεσης του. Η χαμηλή τιμή της συγκέντρωσής του στα καυσάερα σταθμού παραγωγής ενέργειας σημαίνει ότι θα πρέπει να γίνει επεξεργασία μεγάλου όγκου αερίου. Αυτό συνεπάγεται απαίτηση για μεγάλες διαστάσεις του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού και υψηλά κόστη επένδυσης. Επιπλέον μειονέκτημα της εμφάνισης χαμηλών τιμών συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> αποτελεί και η απαίτηση ισχυρών διαλυτών

για να επιτευχθεί ο διαχωρισμός του, η αναγέννηση των οποίων απαιτεί μεγάλα ποσά ενέργειας. Με αύξηση της τιμής της συγκέντρωσης και πίεσης του CO<sub>2</sub>, οι διαστάσεις του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού θα ήταν μικρότερες και θα ήταν δυνατή η χρησιμοποίηση λιγότερο δραστικών διαλυτών με χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις για την αναγέννησή τους (IEA, 2001).

Στο σχήμα 4.3.1 παρουσιάζεται διαγραμματικά και απλοποιημένα η διαδικασία της δέσμευσης πριν την καύση.







(Πηγή: Vattenfall)

Σχήμα 4.3.1: Απλοποιημένη απεικόνιση Pre-Combustion εγκατάστασης δέσμευσης του CO<sub>2</sub>

### 4.3.1 Εφαρμογές για φυσικό αέριο

Η οικονομικότερη μέθοδος παραγωγής υδρογόνου είναι η αναμόρφωση του CH<sub>4</sub> με ατμό. Η αναμόρφωση του φυσικού αερίου πραγματοποιείται με ατμό και αέρα ή καθαρό οξυγόνο σε πιέσεις μεγαλύτερες της ατμοσφαιρικής. Η αντίδραση πραγματοποιείται σε θερμοκρασία περίπου 900°C με την παρουσία καταλύτη. Η διεργασία είναι ενδόθερμη. Η εισερχόμενη θερμότητα προέρχεται από την καύση ενός μέρους του φυσικού αερίου ή του πλούσιου σε H<sub>2</sub> καυσίμου που παράγεται. Ο άνθρακας του καυσίμου μετατρέπεται σε CO αφού οξειδωθεί από το O<sub>2</sub> του ατμού ενώ απελευθερώνεται το υδρογόνο που περιέχεται στο μεθάνιο και τον ατμό. Τελικά, τα προϊόντα της αντίδρασης θα είναι H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, οι υδρογονάνθρακες που δεν έχουν αντιδράσει και N<sub>2</sub> στην περίπτωση που χρησιμοποιείται αέρας αντί για O<sub>2</sub>.

Για την παραγωγή καθαρού H<sub>2</sub> είναι απαραίτητο να απομακρυνθεί το μονοξείδιο του άνθρακα από το παραγόμενο καύσιμο. Αυτό επιτυγχάνεται με την χημική αντίδραση μετασχηματισμού κατά την οποία το CO αντιδρά με το νερό (water gas shift reaction). Τελικά, τα προϊόντα αυτής της αντίδρασης θα είναι H<sub>2</sub> και CO<sub>2</sub>.

Οι αντιδράσεις αναμόρφωσης του CH<sub>4</sub> και μετασχηματισμού του αερίου καυσίμου προϊόντος με νερό είναι οι ακόλουθες:

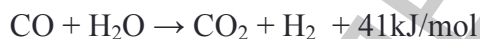


Η απομάκρυνση του CO<sub>2</sub> από το αέριο καύσιμο είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί με διεργασίες προσρόφησης που εξαρτώνται από την πίεση (PSA). Επίσης, για το διαχωρισμό του H<sub>2</sub> από τα υπόλοιπα συστατικά είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν μεμβράνες που λειτουργούν στη θερμοκρασία μετασχηματισμού του αερίου καυσίμου προϊόντος της αναμόρφωσης του μεθανίου. Ο συνδυασμός της αντίδρασης μετασχηματισμού με τον ταυτόχρονο διαχωρισμό του H<sub>2</sub> με μεμβράνες, ευνοεί το σχηματισμό του CO<sub>2</sub>. Τελικά, από το θάλαμο αντίδρασης απομακρύνεται ένα αέριο μείγμα του αποτελείται από CO<sub>2</sub> και υδρατμούς (Κουμανάκος, 2009).

### 4.3.2 Εφαρμογές για άνθρακα

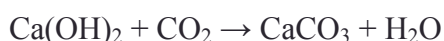
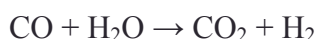
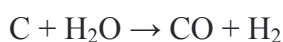
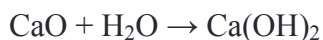
Τα συστήματα αεριοποίησης του άνθρακα είναι δυνατό να ενσωματωθούν σε μονάδες συνδυασμένου κύκλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (IGCC). Το πλεονέκτημα των συστημάτων αεριοποίησης άνθρακα σε ότι αφορά τη δέσμευση του CO<sub>2</sub> είναι αφ' ενός η

μικρή παροχή του αερίου και αφ' ετέρου η υψηλή μερική πίεση του CO<sub>2</sub>. Έτσι, η μέθοδος της φυσικής απορρόφησης του CO<sub>2</sub> είναι μία αποτελεσματική και ενεργειακά αποδοτική επιλογή. Κατά την τυπική διεργασία αεριοποίησης του άνθρακα, αρχικά το καύσιμο κονιοποιείται και αναμειγνύεται με νερό. Στη συνέχεια το αιώρημα θερμαίνεται μαζί με αέρα ή καθαρό O<sub>2</sub> στους 1400°C περίπου. Το βασικό προϊόν της αντίδρασης είναι H<sub>2</sub> και CO. Για την παραγωγή καθαρού H<sub>2</sub> απαιτείται η αντίδραση μετασχηματισμού του CO σε CO<sub>2</sub> με ατμό. Η αεριοποίηση με αέρα αντί για O<sub>2</sub> είναι πιο αποδοτική. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει όταν απαιτείται η απομάκρυνση του CO<sub>2</sub> από το παραγόμενο αέριο καύσιμο. Σε αυτήν την περίπτωση η αεριοποίηση με καθαρό O<sub>2</sub> είναι οικονομικότερη. Η αντίδραση μετασχηματισμού του CO με ατμό είναι εξώθερμη:

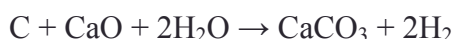


Όπως έχει αναφερθεί η ενδεδειγμένη μέθοδος απομάκρυνσης του CO<sub>2</sub> από το τελικό προϊόν είναι η φυσική απορρόφηση (π.χ. μεθανόλη - Rectisol) καθώς η μερική πίεση του CO<sub>2</sub> είναι αρκετά μεγάλη. Άλλες επιλογές δέσμευσης του CO<sub>2</sub> από το αέριο καύσιμο είναι η χρήση μεμβρανών και η μέθοδος της χημικής απορρόφησης με αμίνες. Ωστόσο, η εφαρμογή της τελευταίας επιβάλλει αρκετά μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας.

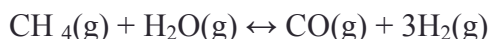
Μία νέα ιδέα για την παραγωγή υδρογόνου από την αεριοποίηση άνθρακα είναι η απομάκρυνση του CO<sub>2</sub> κατά τη διάρκεια της αντίδρασης μετατροπής του CO. Σύμφωνα με αυτήν την τεχνολογία, οι αντιδράσεις της αεριοποίησης, του μετασχηματισμού του CO με ατμό και της δέσμευσης του CO<sub>2</sub> πραγματοποιούνται ταυτόχρονα. Η θερμοκρασία της συμβατικής αεριοποίησης είναι 1273K, ενώ της μετατροπής του CO 673K. Επιπλέον, η αντίδραση μετατροπής του CaO σε CaCO<sub>3</sub> πραγματοποιείται στη θερμοκρασία των 1100K. Η εξέλιξη των αντιδράσεων αυτών είναι δυνατόν να επιτευχθεί σε κοινό θάλαμο αντίδρασης.

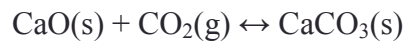
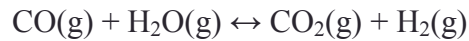


Η συνολική αντίδραση είναι:



Η τεχνολογία αυτή είναι δυνατόν να εφαρμοσθεί και για την παραγωγή H<sub>2</sub> από φυσικό αέριο. Σε αυτήν την περίπτωση οι αντιδράσεις της αναμόρφωσης του CH<sub>4</sub>, της μετατροπής του CO με ατμό και της απομάκρυνσης του CO<sub>2</sub> από το CaO πραγματοποιούνται ταυτόχρονα.





Η συνολική αντίδραση είναι:



Ο βασικός εξοπλισμός της τεχνολογίας αυτής συμπεριλαμβάνει δύο ρευστοποιημένες κλίνες: την κλίνη αεριοποίησης και την κλίνη αναγέννησης. Στην πρώτη παράγεται το πλούσιο σε H<sub>2</sub> καύσιμο με την ταυτόχρονη δέσμευση του CO<sub>2</sub>, ενώ στη δεύτερη λαμβάνει χώρα η αναγέννηση του CaCO<sub>3</sub>. Στη συνέχεια, το CaO ανακυκλοφορεί στην κλίνη αεριοποίησης (Κουμανάκος, 2009).

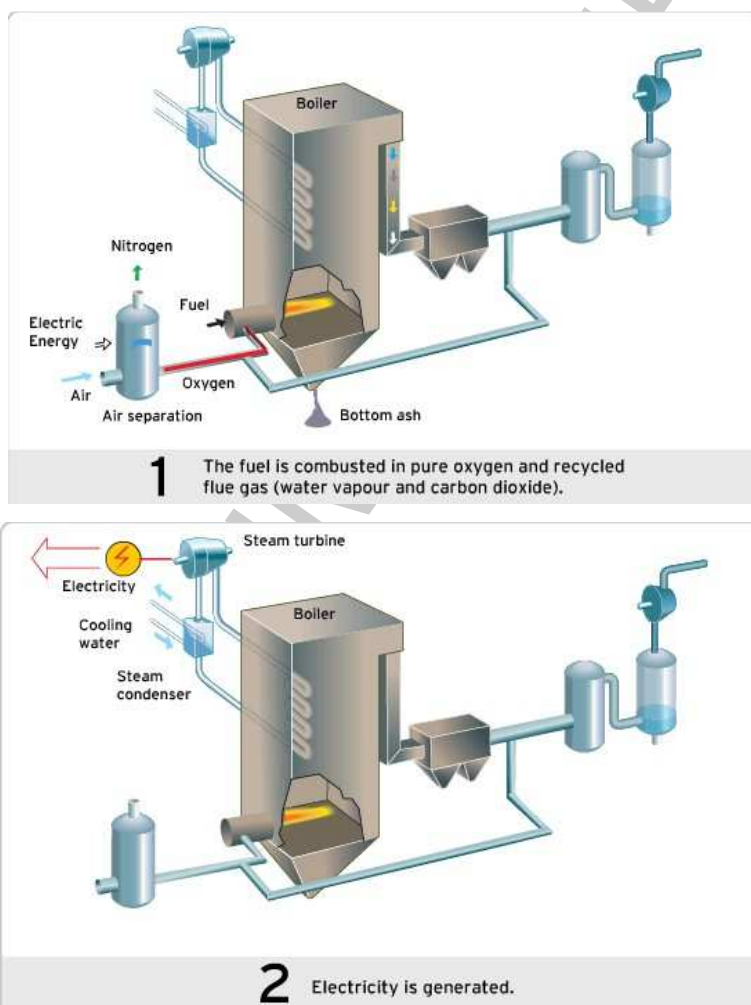
Αν και με τα σημερινά δεδομένα οι κυψέλες υδρογόνου δεν αποτελούν τεχνολογία οικονομικά ανταγωνιστική αυτής των αεριοστροβίλων, αναμένεται να αποτελέσουν στο μέλλον, κυρίως στην παραγωγή ενέργειας μικρής κλίμακας (χαρακτηριστική η περίπτωση του αυτοκινήτου) αλλά μακροπρόθεσμα ακόμη και για μεγαλύτερης κλίμακας (σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας). Δεδομένου ότι η ενέργεια για παραγωγή των απαιτούμενων ποσοτήτων υδρογόνου θα προέλθει από καύση ορυκτών καυσίμων, η τεχνολογία των κυψέλων υδρογόνου θα ενισχύσει κατά κάποιον τρόπο την επιλογή της δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα. Εναλλακτική χρήση του παραγόμενου υδρογόνου αποτελεί η προσθήκη του στο δίκτυο φυσικού αερίου, έως κάποιο ποσοστό, που εκτιμάται περίπου στο 15%, ώστε να μην παρουσιάζονται προβλήματα. Προκύπτει το «πράσινο αέριο» το οποίο ονομάζεται έτσι λόγω των πολύ χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που παράγονται από την καύση του. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της επιλογής αυτής είναι το γεγονός ότι το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υφιστάμενες συσκευές και στο υφιστάμενο σύστημα ενέργειας. Βασικό μειονέκτημα αποτελεί το σχετικά υψηλό κόστος που εκτιμάται περίπου σε 55-115€/t δεσμευμένου CO<sub>2</sub> αλλά μπορεί να μειωθεί με αύξηση της χρήσης του (Turkenburg and Hendriks, 1999).

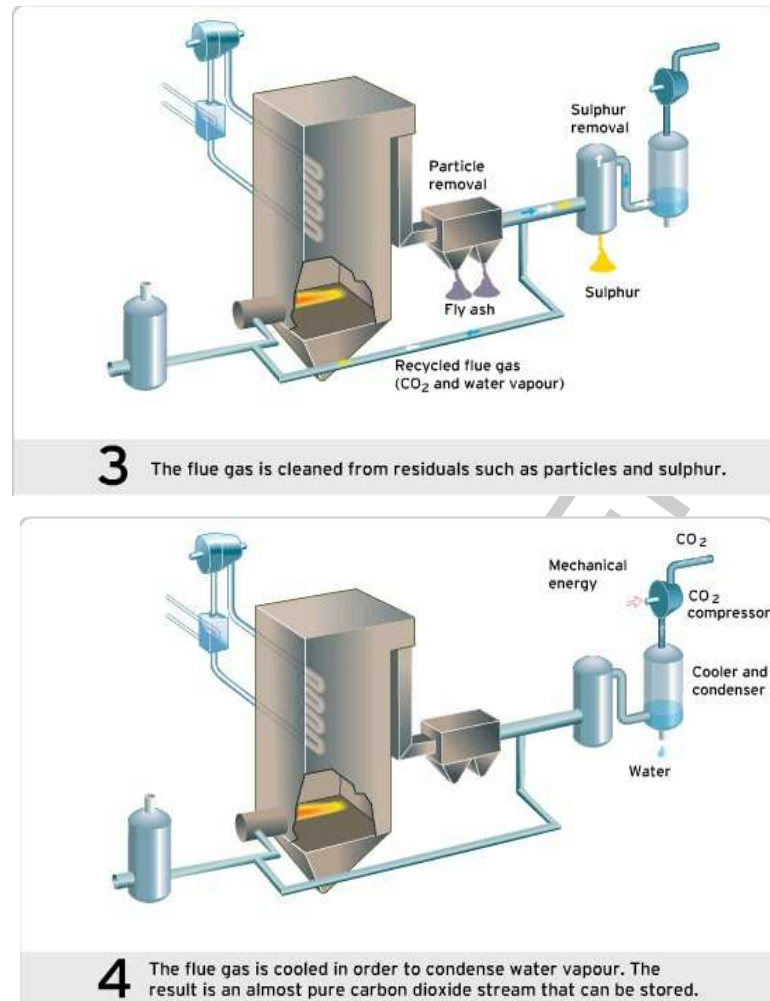
#### **4.4 Καύση σε αυξημένα επίπεδα συγκέντρωσης οξυγόνου (Oxyfuel-combustion)**

Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι όταν η καύση του λιγνίτη, των υδρογονανθράκων ή του συνθετικού αερίου πραγματοποιείται με καθαρό οξυγόνο, το παραγόμενο καυσαέριο περιέχει κυρίως διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Με ψύξη των καυσαερίων, το H<sub>2</sub>O που περιέχεται στο καυσαέριο συμπυκνώνεται και παράγεται σχεδόν

καθαρό αέριο CO<sub>2</sub>. Στη συνέχεια, αυτό συμπιέζεται και μεταφέρεται στην τοποθεσία αποθήκευσης. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοσθεί σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς, αεριοστρόβιλους και σταθμούς συνδυασμένου κύκλου με καύσιμο φυσικό αέριο ή ακόμα και σε συστήματα συνδυασμένου κύκλου με αεριοποίηση. Επίσης, μπορεί να εφαρμοσθεί για οποιοδήποτε ορυκτό καύσιμο (λιγνίτη, πετρέλαιο ή φυσικό αέριο), (Κακαράς κ.α., 2005).

Στο σχήμα 4.4.1 παρουσιάζεται διαγραμματικά και απλοποιημένα η διαδικασία καύσης με οξυγόνο και ανακυκλοφορία καυσαερίου (Oxyfuel-combustion).





(Πηγή: Vattenfall)

Σχήμα 4.4.1: Απλοποιημένη απεικόνιση εγκατάστασης καύσης με οξυγόνο και ανακυκλοφορία καυσαερίου (Oxyfuel-combustion)

Για την παραγωγή του οξυγόνου είναι απαραίτητη η μονάδα διαχωρισμού του αέρα (Air Separation Unit, ASU). Η κρυογενική μέθοδος είναι η πιο κατάλληλη τεχνολογία για το διαχωρισμό του αζώτου από τον αέρα. Τα στάδια της κρυογενικής μεθόδου διαχωρισμού του αέρα είναι τα ακόλουθα:

- Συμπίεση του αέρα με ενδιάμεσες ψύξεις. Το επίπεδο συμπίεσης είναι περίπου 5,5bar και προτείνονται τα ακόλουθα στάδια συμπίεσης 1,013-1,53bar, 1,53-2,35bar, 2,35-3,6bar και 3,6-5,5bar και οι ενδιάμεσες ψύξεις είναι στους 25°C.
- Ψύξη του αέρα περίπου στους 11,5°C.
- Απομάκρυνση της υγρασίας και άλλων σωματιδίων με τη μέθοδο της προσρόφησης.
- Υγροποίηση του αέρα (-180°C).
- Απομάκρυνση του αζώτου σε στήλη απόσταξης.

Η διαδικασία διαχωρισμού του αέρα είναι δυνατό να καταναλώσει έως και το 15% της

παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας του σταθμού. Η καθαρότητα του οξυγόνου παρουσιάζει σημαντική επίδραση όσον αφορά την κατανάλωση ισχύος από τη μονάδα διαχωρισμού του αέρα. Η καθαρότητα που μπορεί να επιτύχει η κρυογενική μονάδα διαχωρισμού του αέρα είναι έως και 99,7%. Για καθαρότητα οξυγόνου μικρότερη του 95%, η κατανάλωση ισχύος μειώνεται, καθώς το επίπεδο της απαιτούμενης συμπίεσης του αέρα μειώνεται. Από την άλλη μεριά, για καθαρότητα οξυγόνου πάνω από 97%, η κατανάλωση ισχύος αυξάνεται απότομα, γιατί σε αυτή την περίπτωση πρέπει να διαχωριστεί και το αργό. Η βέλτιστη επιλογή για την καθαρότητα του οξυγόνου που παράγεται από τη μονάδα διαχωρισμού είναι 95%.

Η καύση με καθαρό οξυγόνο οδηγεί σε πολύ υψηλή θερμοκρασία καύσης στην εστία. Για να μειωθεί η θερμοκρασία αυτή, ένα μέρος του καυσαερίου ανακυκλοφορεί στο θάλαμο καύσης. Στην περίπτωση εφαρμογής της τεχνολογίας καύσης με οξυγόνο σε ήδη υπάρχοντα σταθμό, τόσο η θερμοκρασία όσο και η παροχή του καυσαερίου πρέπει να κυμαίνονται στα επίπεδα της συμβατικής καύσης με αέρα. Αναφέρεται ότι κατά την εφαρμογή της τεχνολογίας σε λέβητα μεγάλης εγκατάστασης παραγωγής ενέργειας, περίπου τα 2/3 της παροχής του καυσαερίου στην έξοδο της εστίας πρέπει να επανακυκλοφορεί.

Η διαχείριση του ρεύματος καυσαερίου που απομακρύνεται από το λέβητα έχει τα ακόλουθα στάδια:

- Ψύξη του καυσαερίου για απομάκρυνση του μεγαλύτερου μέρους του νερού.
- Συμπίεση, ώστε το καυσαέριο να μεταβεί στην υγρή φάση.
- Αφύγρανση με TEG (Tri-Ethylene Glycol) για την απομάκρυνση του νερού που έχει απομείνει, με σκοπό την αποφυγή της διάβρωσης κατά τη μεταφορά.
- Περαιτέρω ψύξη του προϊόντος.
- Απομάκρυνση των συστατικών που δεν έχουν συμπυκνωθεί, όπως N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> και Ar.
- Συμπίεση μέχρι το σημείο που απαιτείται για τη μεταφορά του προϊόντος.

Η καθαρότητα του οξυγόνου καθώς και η εισαγωγή αέρα στο λέβητα είναι δυνατό να μειώσουν την ικανότητα απομάκρυνσης του διοξειδίου του άνθρακα που παράγεται κατά την καύση (Κακαράς κ.α., 2005).

Το σημαντικό πλεονέκτημα της προσέγγισης αυτής είναι ότι προκύπτουν σημαντικά υψηλότερες τιμές συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια, περίπου 55-60% κατ' όγκο. Αν το παραγόμενο καυσαέριο, ή μέρος του, ανακυκλωθεί στο θάλαμο καύσης και χρησιμοποιηθεί ένα ρεύμα σχετικά καθαρού οξυγόνου για την καύση, τότε η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια μπορεί να φτάσει και το 90% κατ' όγκο. Οι τιμές αυτές είναι σημαντικά υψηλότερες από τις αντίστοιχες του 4-14% κατ' όγκο

(όταν η καύση πραγματοποιείται με αέρα), οπότε για την απομάκρυνσή του απαιτούνται απλές διεργασίες καθαρισμού, με σημαντικά χαμηλότερο κόστος.

Το μειονέκτημα της προσέγγισης σχετίζεται με το υψηλό κόστος παραγωγής του απαιτούμενου για την καύση οξυγόνου λόγω του υψηλού κόστους κεφαλαίου της μονάδας διαχωρισμού αέρα (ASU- Air Separation Unit) και της κατανάλωσης ενέργειας. Όμως, η χρήση καθαρού οξυγόνου ή μίγματος οξυγόνου-αέρα για την καύση ανοίγει νέες προοπτικές στην αύξηση της απόδοσης καύσης. Η μονάδα διαχωρισμού του αέρα χρησιμοποιεί συνήθως τεχνολογία κρυογενικού διαχωρισμού, τη μοναδική διαθέσιμη τεχνολογία για μεγάλης κλίμακας μονάδες (Wong *and* Bioletti, 2002).

Η καθαρότητα του οξυγόνου που παράγεται στη μονάδα ASU κυμαίνεται από 95% έως 99,99%. Όσον αφορά στη διαρροή αέρα στο θάλαμο καύσης, συνήθως εκτιμάται σε 1%-3%. Οι δύο αυτές παράμετροι, η καθαρότητα του οξυγόνου που παράγεται και η διαρροή αέρα στο θάλαμο καύσης, καθορίζουν τελικά την περιεκτικότητα του καυσαερίου σε διοξείδιο του άνθρακα, που είναι από 80% ως και 95% (κατ' όγκο, σε ξηρή βάση). Το καυσαέριο μπορεί να γίνει και περισσότερο «καθαρό» με επιπλέον διεργασία (Singh *et al.*, 2003).

Λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών καύσης που παρατηρούνται είναι απαραίτητες αλλαγές του εξοπλισμού και των χρησιμοποιούμενων υλικών, οπότε είναι προτιμότερο να εφαρμόζεται σε νέες εγκαταστάσεις. Δε συνίσταται για δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα από τα καυσαέρια υφιστάμενων σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Στην περίπτωση εφαρμογής σε υφιστάμενο σταθμό είναι απαραίτητη η ανακύκλωση του καυσαερίου, οπότε η περιεκτικότητά σε σωματίδια θα πρέπει να είναι εξαιρετικά χαμηλή (Wong *and* Bioletti, 2002).



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **Μεταφορά και Αποθήκευση CO<sub>2</sub>**

#### **5.1 Εισαγωγή**

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας δέσμευσης του CO<sub>2</sub>, το αέριο ρεύμα στο οποίο περιέχεται θα πρέπει να μεταφερθεί και να αποθηκευτεί ώστε να μην εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα.

Το CO<sub>2</sub> είναι ένα αδρανές αέριο οπότε η διαχείρισή του είναι σχετικά εύκολη. Η μεταφορά του ήδη πραγματοποιείται σε αρκετές περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα στο Κολοράντο του Τέξας στις ΗΠΑ, η εταιρεία Cortez Pipeline (Shell Oil Co) χρησιμοποιώντας αγωγό 30 ιντσών, μεταφέρει CO<sub>2</sub> σε απόσταση 480 μιλίων, με σκοπό την ενίσχυση της ανάκτησης (Enhanced Oil Recovery - EOR) του πετρελαίου σε πετρελαιοπηγές.

Η μεταφορά του CO<sub>2</sub> είναι δυνατή με διάφορους τρόπους:

- Ως αέριο.
- Ως υγρό.
- Ως μίγμα υγρού και αερίου.
- Ως υψηλής πυκνότητας αέριο σε υψηλή πίεση (Skovholt, 1993).

Αν η δέσμευση και η αποθήκευση του CO<sub>2</sub> εφαρμοστεί ευρέως, το πιθανότερο είναι η μεταφορά του να γίνεται με δίκτυο αγωγών. Άλλος τρόπος μεταφοράς του δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα είναι με δεξαμενόπλοια, των οποίων ο σχεδιασμός θα είναι παραπλήσιος με αυτών που ήδη χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του LPG. Σε αυτή την περίπτωση απαιτείται ψύξη του CO<sub>2</sub> για μείωση της πίεσης (IEA, 2002).

Μερικά βασικά κριτήρια που θα πρέπει να πληρεί μια επιλογή αποθήκευσης είναι τα παρακάτω:

- Η περίοδος αποθήκευσης θα πρέπει να είναι μακρά, κατά προτίμηση εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια.
- Το κόστος της αποθήκευσης, το οποίο συμπεριλαμβάνει το κόστος μεταφοράς από την πηγή εκπομπής στον τόπο αποθήκευσης, να είναι ελάχιστο.
- Ο κίνδυνος ατυχήματος θα πρέπει να εξαλειφθεί.
- Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις θα πρέπει να είναι οι ελάχιστες δυνατές.
- Η μέθοδος αποθήκευσης δεν θα πρέπει να παραβιάζει εθνικούς ή διεθνείς νόμους και

κανονισμούς.

Οι σημαντικότεροι χώροι αποθήκευσης είναι, κατάλληλοι γεωλογικοί σχηματισμοί και τα μεγάλα βάθη των ωκεανών. Η γεωλογική αποθήκευση μπορεί να γίνει σε βαθύς αλατούχους σχηματισμούς (ηπειρωτικούς και θαλάσσιους), σε εξαντλημένους ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου, σε κοιτάσματα πετρελαίου για βελτίωση της ανάκτησής του και σε μη αξιοποιήσιμα κοιτάσματα άνθρακα. Η αποθήκευση στα βάθη των ωκεανών περιλαμβάνει, απευθείας έγχυση του υγρού διοξειδίου του άνθρακα στην στήλη του νερού σε ενδιάμεσα βάθη (1.000-3.000m) ή σε βάθη μεγαλύτερα των 3.000m, όπου το υγρό CO<sub>2</sub> γίνεται βαρύτερο από το νερό της θάλασσας, με αποτέλεσμα να καταβυθίζεται στον πυθμένα δημιουργώντας εκεί μια «λίμνη CO<sub>2</sub>».

Τέλος, το δεσμευμένο CO<sub>2</sub> μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για τη χημική βιομηχανία. Ωστόσο, οι ποσότητες του CO<sub>2</sub> που μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεν είναι παρά ένα μικρό ποσοστό των εκπομπών CO<sub>2</sub> από ανθρωπογενείς πηγές (Herzog and Golomb, 2004).

## **5.2 Μεταφορά του CO<sub>2</sub>**

Μετά τη δέσμευση του CO<sub>2</sub> στις πηγές των εκπομπών του, θα πρέπει να μεταφερθεί στους χώρους αποθήκευσης. Λόγω των μεγάλων όγκων του CO<sub>2</sub> η μεταφορά του απαιτεί υποδομές μεγάλης κλίμακας. Τα υφιστάμενα συστήματα μεταφοράς CO<sub>2</sub>, μεταφέρουν ετησίως εκατομμύρια τόνους σε μεγάλες αποστάσεις στην ξηρά -κυρίως στις ΗΠΑ- με αγωγούς υψηλής πίεσης. Ο σκοπός της μεταφοράς είναι για χρήση στη βιομηχανία ανάκτησης πετρελαίου (EOR). Η χρήση CO<sub>2</sub> σε EOR διαδικασίες, έχει το πλεονέκτημα ότι το CO<sub>2</sub> αποκτά προστιθέμενη αξία. Για παράδειγμα, πετρελαιοπαραγωγοί στις ΗΠΑ είναι πρόθυμοι να πληρώσουν μεταξύ 9 ως 18\$/t CO<sub>2</sub> που τους παραδίδεται προς χρήση σε EOR εγκαταστάσεις. Αγωγοί για την θαλάσσια μεταφορά CO<sub>2</sub> δεν βρίσκονται σήμερα σε λειτουργία, αλλά η κατασκευή τους είναι τεχνικά εφικτή (Svensson *et al.*, 2004).

Άλλα μέσα μεταφοράς που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι:

- Φορτηγά μεγάλης χωρητικότητας. Αποτελούν την πιο κοινή εναλλακτική λύση για μεταφορά προϊόντων με βάρος λιγότερο των πέντε τόνων, εξαιτίας της αξιοπιστίας, της προσαρμογής και της ευελιξίας που παρέχει ο τρόπος αυτός.
- Τραίνα με ειδικά προσαρμοσμένα βαγόνια μπορούν να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες CO<sub>2</sub> σε μεγάλες αποστάσεις.

- Βυτιοφόρα πλοία τα οποία αποτελούν τον πιο κατάλληλο τρόπο για θαλάσσια μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις. Το μεγάλο πλεονέκτημα εδώ είναι η οικονομική αποδοτικότητα αφού έτσι μπορούν να μεταφερθούν πολύ μεγάλες (38.000-78.000m<sup>3</sup>) ποσότητες CO<sub>2</sub> (Κούκουζας κ.α., 2005).

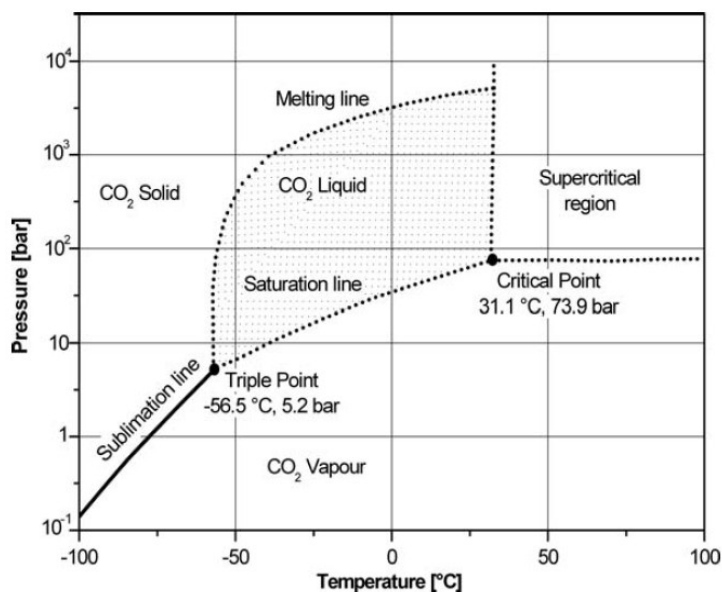
Εκτός από τους αγωγούς, οι εφαρμογές των άλλων μέσων μεταφοράς CO<sub>2</sub> συναντώνται κυρίως στον τομέα των τροφίμων και των αναψυκτικών. Οι μεταφερόμενοι όγκοι είναι της τάξης των 100.000 τόνων CO<sub>2</sub> ετησίως, δηλαδή ποσότητες πολύ μικρότερες από αυτές που αφορούν τη CCS.

Οι συνθήκες μεταφοράς του CO<sub>2</sub> έχουν πολλές ομοιότητες με εκείνες που αφορούν σε μεταφορά υγραερίου (LPG), το οποίο μεταφέρεται με ειδικά κατασκευασμένα πλοία, τρένα και φορτηγά. Ως εκ τούτου, η εμπειρία που υπάρχει από τη μεταφορά LPG, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία υποδομών μεταφοράς CO<sub>2</sub> σε μεγάλη κλίμακα.

Για να επιτυγχάνεται μέγιστη απόδοση και να διευκολύνεται η αποτελεσματική φόρτωση – εκφόρτωση των διακινούμενων ποσοτήτων, η κατάσταση του CO<sub>2</sub> θα πρέπει να είναι υγρή ή να βρίσκεται σε υπερκρίσιμη/πυκνή φάση. Ωστόσο, οι αγωγοί εμφανίζουν πτώση πίεσης κατά μήκος της διαδρομής μεταφοράς, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ροές δύο φάσεων με συνέπειες στη λειτουργία αλλά και στα υλικά, όπως οι σταθμοί συμπίεσης και οι αντλίες (π.χ. σπηλαίωση). Έτσι, όταν χρησιμοποιούνται αγωγοί είναι προτιμότερο το CO<sub>2</sub> να βρίσκεται σε υπερκρίσιμη/πυκνή φάση. Η κατάσταση αυτή εμφανίζεται σε θερμοκρασίες υψηλότερες από 60°C και πιέσεις μεγαλύτερες από την κρίσιμη πίεση των 73,9bar, δίνοντας ένα σημαντικό περιθώριο για την αποφυγή ροών δύο φάσεων. Για τα υπόλοιπα μέσα μεταφοράς τα οποία έχουν σταθερή πίεση, η υγρή φάση του CO<sub>2</sub> είναι η καταλληλότερη. Η πυκνότητα του CO<sub>2</sub> τόσο στην υγρή όσο και στην υπερκρίσιμη/πυκνή φάση προσεγγίζει τα 1.000kg/m<sup>3</sup> (Svensson *et al.*, 2004).

Σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, το CO<sub>2</sub> είναι αέριο. Σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία πολύ χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, το CO<sub>2</sub> είναι στερεό. Με την αύξηση της θερμοκρασίας, το στερεό θα μεταπηδήσει απευθείας στην αέρια φάση. Σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες μεταξύ της θερμοκρασίας του τριπλού σημείου (-56°C, 5,2bar) και της θερμοκρασίας του κρίσιμου σημείου (31°C, 73,9bar), μια αύξηση της πίεσης προκαλεί μια σταδιακή αλλαγή κατάστασης σε ένα διαφασικό μίγμα αερίου-υγρού. Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και πιέσεις άνω των 60bar, το CO<sub>2</sub> είναι υγρό. Σε θερμοκρασίες υψηλότερες από 31,1°C και πιέσεις άνω των 73,9bar, το διοξείδιο του άνθρακα βρίσκεται σε υπερκρίσιμη κατάσταση, όπου συμπεριφέρεται ως αέριο (Spliethoff, 2010).

Στο σχήμα 5.2.1 απεικονίζεται το διάγραμμα φάσης του CO<sub>2</sub>.

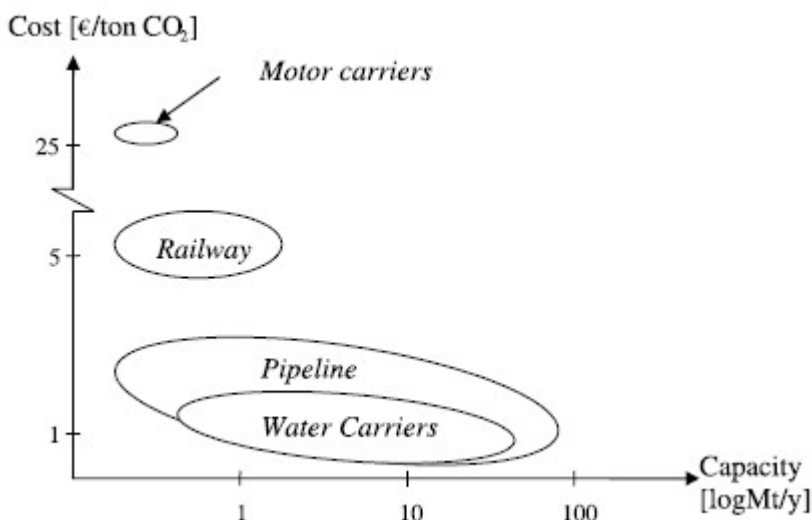


(Πηγή: Spliethoff, 2010)

Σχήμα 5.2.1: Διάγραμμα φάσης του CO<sub>2</sub>

Όπως αναφέρθηκε η μεταφορά του CO<sub>2</sub> είναι εφικτή τεχνικά με διάφορα μέσα. Ωστόσο και έπειτα από αξιολόγηση οικονομικών στοιχείων (το διάγραμμα του σχήματος 5.2.2. απεικονίζει τα αποτελέσματα σχετικής μελέτης), μόνο τρεις εναλλακτικές επιλογές θα μπορούσαν να έχουν εφαρμογή στην τάξη μεγέθους που ερευνάται:

- Αγωγοί για χερσαία και θαλάσσια μεταφορά (on και off-shore pipelines).
- Μεταφορά με πλοία (off-shore).
- Συνδυασμός των παραπάνω επιλογών (Svensson et al., 2004).



(Πηγή: Svensson et al., 2004)

Σχήμα 5.2.2: Κόστος και δυναμικότητα εναλλακτικών επιλογών μεταφοράς CO<sub>2</sub> για 250Km

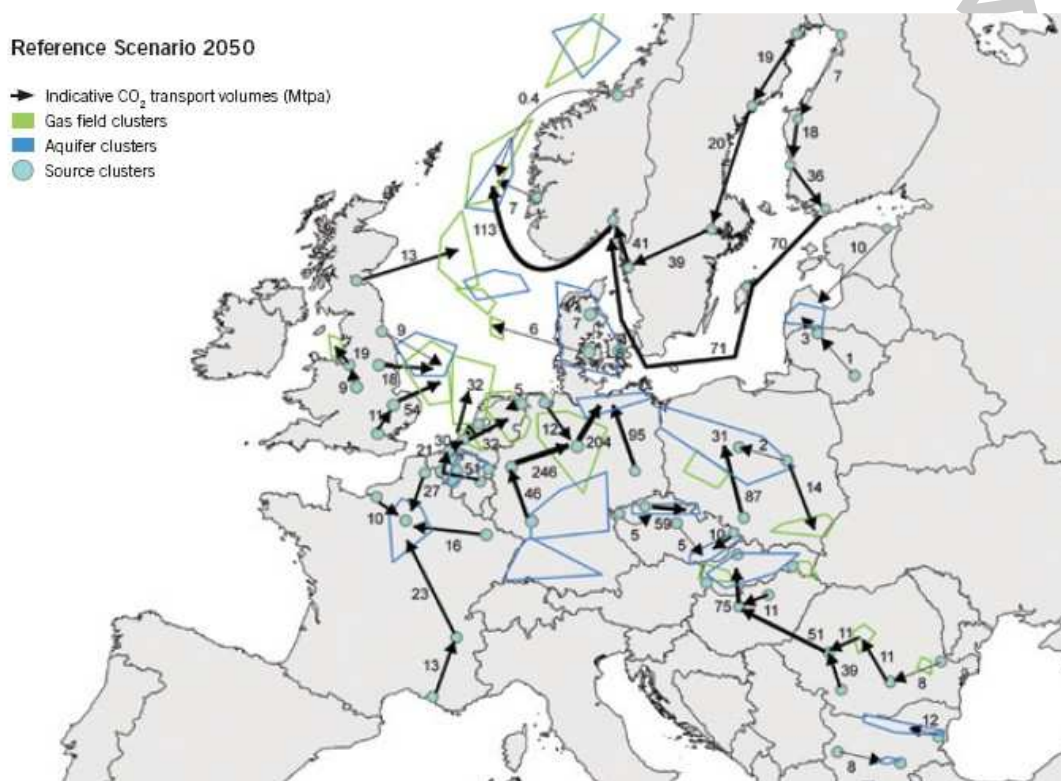
### 5.2.1 Αγωγοί μεταφοράς CO<sub>2</sub>

Οι αγωγοί είναι και πιθανόν θα συνεχίσουν να είναι, η κύρια μέθοδος μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων CO<sub>2</sub> από εφαρμογές CCS. Η μεταφορά μέσω αγωγών είναι γενικά μια καθιερωμένη πρακτική, τόσο στην ξηρά όσο και υποθαλάσσια. Στις Ηνωμένες Πολιτείες μόνο, υπάρχουν περίπου 800.000km αγωγών μεταφοράς επικίνδυνων υγρών και φυσικού αερίου, πέρα των 3,5 εκατομμυρίων χιλιομέτρων αγωγών του δικτύου διανομής φυσικού αερίου.

Στις μέρες μας (2011), υπάρχουν σε λειτουργία σχεδόν 6.000km αγωγών που μεταφέρουν CO<sub>2</sub>, η πλειοψηφία των οποίων βρίσκεται στις Ηνωμένες Πολιτείες. Το δίκτυο αυτό μεταφέρει περίπου 50Mtpa εκπομπών CO<sub>2</sub> και έχει αναπτυχθεί τα τελευταία 40 χρόνια. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, το μέγεθος της υποδομής των αγωγών που απαιτούνται για την πλήρη ανάπτυξη και καθιέρωση της διαδικασίας CCS στις Ηνωμένες Πολιτείες θα κυμανθεί από 8.000 έως 21.000km μέχρι το 2020 και περίπου 35.000 έως 58.000km μέχρι το 2050. Δεδομένου ότι, για τις ανάγκες του δικτύου φυσικού αερίου των Ηνωμένων Πολιτειών κατασκευάστηκαν 33.521km αγωγών από το 1998 έως 2007, οι στόχοι για την ανάπτυξη ενός δικτύου μεταφοράς CO<sub>2</sub> φαίνονται εφικτοί.

Σύμφωνα με το πρόγραμμα CO<sub>2</sub>Europe (χρηματοδοτήθηκε από την Ε.Ε. στα πλαίσια του 7<sup>ου</sup> Προγράμματος Πλαισίου), το συνολικό μήκος των αγωγών που θα απαιτηθεί για την ανάπτυξη της CCS στην ΕΕ και τη Νορβηγία για θαλάσσια και χερσαία αποθήκευση θα είναι περίπου 2.300km μέχρι το 2020, 15.000km μέχρι το 2030 και 22.000km μέχρι το 2050 (Σχήμα 4.2.1.1, Global CCS Institute, 2011). Οι εκτιμήσεις αυτές δεν περιλαμβάνουν το μήκος των αγωγών που απαιτούνται για τη σύνδεση μεμονωμένων έργων με το κύριο δίκτυο αγωγών. Οι χώρες με το μεγαλύτερο μήκος αγωγών που θα πρέπει να κατασκευαστεί είναι η Γερμανία, η Νορβηγία και η Πολωνία, κυρίως λόγω των μεγάλων ποσοτήτων CO<sub>2</sub> που θα μεταφέρονται, απαιτώντας σε κάποιες περιπτώσεις παράλληλα δίκτυα. Η Γαλλία, οι χώρες γύρω από τη Βαλτική Θάλασσα, το Ηνωμένο Βασίλειο και η Ρουμανία θα πρέπει να διαθέτουν δίκτυο αγωγών μεταφοράς CO<sub>2</sub> σε λειτουργία έως το 2030. Στην πραγματικότητα, για πολλά κράτη μέλη της Ε.Ε. η μεγαλύτερη προσπάθεια για την κατασκευή αγωγών αναμένεται να απαιτηθεί μεταξύ των ετών 2020 έως 2030, δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος του δικτύου θα πρέπει να λειτουργεί μέχρι το 2030. Για επιτευχθεί τέτοιου είδους ανάπτυξη, ο ρυθμός κατασκευής των αγωγών θα κυμαίνεται περίπου από 1.200 έως 1.500km

το χρόνο. Όπως και οι Ηνωμένες Πολιτείες έτσι και η Ευρώπη μπορεί να καλύψει τους στόχους κατασκευής των απαιτούμενων αγωγών.



(Πηγή: Global CCS Institute, 2011)

Σχήμα 5.2.1.1: Όγκοι και διαδρομές μεταφοράς CO<sub>2</sub> στην Ευρώπη

(Σενάριο αναφοράς: CO<sub>2</sub> Europe 2050)

Η υλοποίηση των πρώτων έργων το πιθανότερο είναι να στηριχθεί κυρίως ή αποκλειστικά, σε μεταφορές από σημείο σε σημείο μέσω μεμονωμένων αγωγών. Οι εκτιμήσεις σχετικά με τη μελλοντική δυναμικότητα μεταφοράς CO<sub>2</sub> λαμβάνουν υπόψη την ανάπτυξη δικτύων και κόμβων. Ο προσδιορισμός των δυνητικών δικτύων και κόμβων, βασίζεται σε μια εκτεταμένη ανάλυση για τη σύνδεση των πηγών εκπομπής CO<sub>2</sub> και των χώρων αποθήκευσης.

Η ευρείας κλίμακας ανάπτυξη εφαρμογών CCS θα πρέπει να οδηγήσει στη σύνδεση των πλησιέστερων πηγών εκπομπής CO<sub>2</sub>, μέσω κόμβων, με ένα κύριο αγωγό μεταφοράς του CO<sub>2</sub> σε ομαδοποιημένους -με κριτήριο την απόσταση- χώρους αποθήκευσης. Άλλοι μικρότεροι αγωγοί διανομής θα συνδέουν τις επιμέρους πηγές μεταξύ τους και με το κεντρικό δίκτυο μεταφοράς. Ένα απλό δίκτυο θα αναπτύσσεται σαν ένα «δέντρο» όπου, κάθε ένα από τα κλαδιά θα είναι οι αγωγοί τροφοδοσίας CO<sub>2</sub> από τις πηγές των εκπομπών, ο κορμός του δέντρου θα είναι ο κύριος αγωγός του δικτύου μεταφοράς και οι ρίζες, θα είναι οι αγωγοί διανομής του CO<sub>2</sub> στους χώρους αποθήκευσης.

Από μια τέτοια απλή υποδομή θα προκύψουν πολύ σημαντικές οικονομίες κλίμακας. Ένα σύμπλεγμα (clustered transport system) δικτύων αγωγών μεταφοράς CO<sub>2</sub> θα μπορούσε να εξοικονομήσει πάνω από 25% των δαπανών σε σύγκριση με ένα σημείο-προς-σημείο σύστημα, ανάλογα και με το μέγεθος του συμπλέγματος. Επιπλέον, η ανάπτυξη ενός τέτοιου δικτύου μπορεί να μειώσει σημαντικά τα εμπόδια για μελλοντικές επενδύσεις, να ενθαρρύνει τη συμμετοχή πολλών ενδιαφερόμενων φορέων, να διευκολύνει την εύρεση χρηματοδοτών και να ενισχύσει τις μελλοντικές CCS αγορές. Επίσης, τα δίκτυα μπορούν να ενθαρρύνουν και να αυξήσουν το ρυθμό ανάπτυξης εφαρμογών CCS σε μια περιοχή, για παράδειγμα με μείωση του συνολικού αριθμού των αδειών που θα πρέπει να εκδίδονται για την κατασκευή των αγωγών. Ως αποτέλεσμα, η δημιουργία δικτύων μπορεί να μειώσει τους πιθανούς χρηματοοικονομικούς κινδύνους που συνδέονται με έργα CCS και να βελτιώσει τις επιχειρηματικές περιπτώσεις για μεμονωμένα έργα CCS. Επίσης, τα δίκτυα δίνουν την ευκαιρία για τη σύνδεση πηγών εκπομπής CO<sub>2</sub> χαμηλής δυναμικότητας, για τις οποίες η σημείο-προς-σημείο σύνδεση με το χώρο αποθήκευσης, θα είχε μεγάλο κόστος. Παράλληλα αναπτύσσουν την απασχόληση σε περιφερειακό επίπεδο και την εξειδίκευση στις απαραίτητες τεχνολογίες.

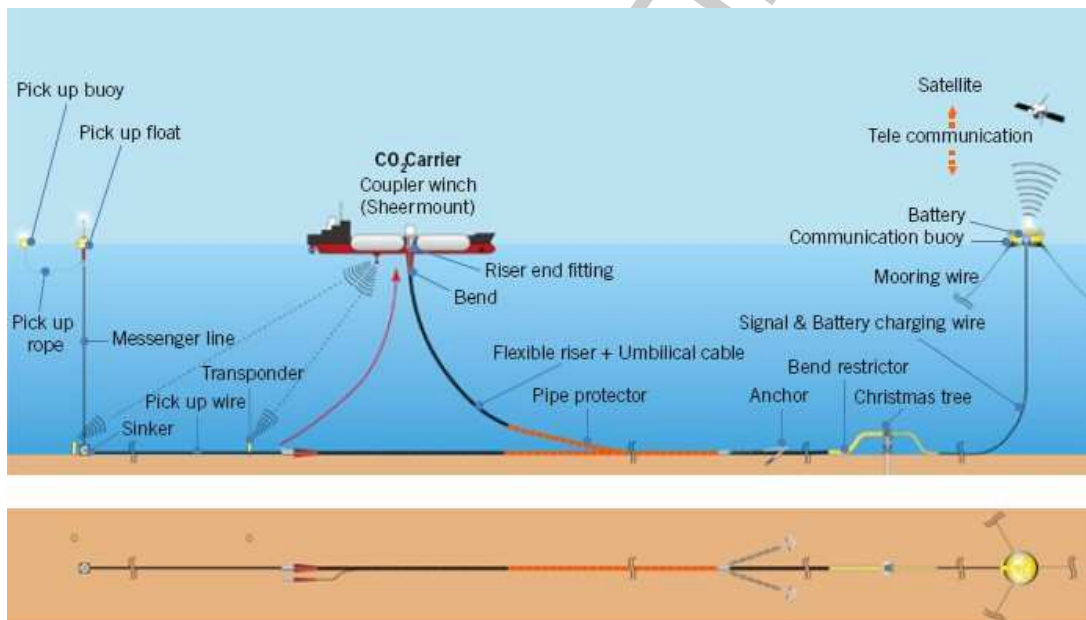
Στην Ευρώπη, το πιο ανεπτυγμένο δίκτυο CCS μέχρι σήμερα βρίσκεται στην περιοχή γύρω από το Ρότερνταμ. Το RCI ξεκίνησε το 2006 και 18 μεγάλες εταιρείες συνεργάζονται για να παράγουν τεχνικές μελέτες σκοπιμότητας για έργα CCS. Το πρόγραμμα στοχεύει στο να συγκεντρώνει CO<sub>2</sub> από πολλές πηγές μέσω ενός ενδιάμεσου κόμβου, να χρησιμοποιεί ένα κοινό δίκτυο μεταφοράς και μέσω αγωγών ή πλοίων να παραδίδει το CO<sub>2</sub> στον τελικό προορισμό. Ως τελικός προορισμός υπολογίζονται διαδικασίες EOR ή χώροι αποθήκευσης σε βαθύς γεωλογικούς σχηματισμούς στη Βόρεια Θάλασσα.

Το δίκτυο θα αναπτυχθεί στην αρχική του φάση επίδειξης, με δέσμευση και αποθήκευση CO<sub>2</sub> μέχρι το 2015 και στοχεύει να διαχειρίζεται 20Mtpa CO<sub>2</sub> μέχρι το 2025. Το δίκτυο αναμένεται ότι θα δημιουργήσει οικονομίες κλίμακας και θα βοηθήσει να μειωθεί το συνολικό κόστος της CCS στην περιοχή του Ρότερνταμ (Global CCS Institute, 2011).

### 5.2.2 Πλοία μεταφοράς CO<sub>2</sub>

Αν και η πλειοψηφία των δικτύων μεταφοράς CO<sub>2</sub> αναμένεται να χρησιμοποιεί αγωγούς, για κάποιες περιπτώσεις η μεταφορά με πλοία θα μπορούσε να αποτελεί εναλλακτική επιλογή.

Η μεταφορά CO<sub>2</sub> εφαρμόζεται ήδη, αλλά σε πολύ μικρή κλίμακα. Προς το παρόν, τέσσερα μικρά πλοία μεταφέρουν CO<sub>2</sub> (περίπου 1.000tn) για χρήση στη βιομηχανία τροφίμων, από τα σημεία που παράγεται, σε παράκτια κέντρα διανομής στην Ευρώπη. Η χρήση πλοίων για μεταφορά μεγάλων όγκων CO<sub>2</sub> έχει πολλά κοινά σημεία με τη μεταφορά υγραερίου (LPG) ή υδροποιημένου φυσικού αερίου (LNG), αντικείμενο στο οποίο υπάρχει τεχνογνωσία για περισσότερο από 70 χρόνια. Ο σχεδιασμός πλοίων που θα είναι ικανά να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες CO<sub>2</sub>, βρίσκεται σε εξέλιξη στη Νορβηγία και την Ιαπωνία. Τα πλοία αυτά, αναμένεται να έχουν παρόμοιο σχεδιασμό με τα πλοία ψυγεία που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά LPG σε θερμοκρασίες των -50°C περίπου. Η δυναμικότητα μεταφοράς τέτοιων πλοίων θα κυμαίνεται από 10.000 έως 40.000m<sup>3</sup>. Στο σχήμα 4.2.2.1 παρουσιάζεται απλοποιημένη η απόθεση CO<sub>2</sub> από πλοίο.



(Πηγή: Global CCS Institute, 2011)

Σχήμα 5.2.2.1: Απόθεση CO<sub>2</sub> από πλοίο

Το πρόγραμμα CO<sub>2</sub>Europipe, εξέτασε τα σχετικά πλεονεκτήματα των αγωγών σε σχέση με τα πλοία για τη μεταφορά του CO<sub>2</sub> και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η ναυτιλία μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο σε δύο περιπτώσεις:

1. Κατά την έναρξη λειτουργίας των εφαρμογών CCS και όσο χρόνο απαιτείται για το σχεδιασμό και την κατασκευή των αγωγών. Όταν οι αγωγοί παραδοθούν προς χρήση, τα πλοία, θα μετασκευαστούν για να χρησιμοποιηθούν σε άλλες εμπορικές δραστηριότητες ή θα λειτουργούν συμπληρωματικά ως προς τους αγωγούς



διασφαλίζοντας την ασφάλεια λειτουργίας των έργων ή θα χρησιμοποιηθούν για την αξιοποίηση χώρων αποθήκευσης μικρότερης δυναμικότητας.

2. Για έργα αποθήκευσης στα οποία η τροφοδότηση με CO<sub>2</sub> μέσω πλοίων είναι η πιο αποδοτική λύση.

Η θέση μιας πηγής εκπομπής είναι σημαντικός παράγοντας για το εάν οι θαλάσσιες μεταφορές μπορούν να συνεισφέρουν στη μεταφορά CO<sub>2</sub> από την συγκεκριμένη πηγή. Οι πηγές θα πρέπει να είναι κοντά:

- Στην ακτή, έτσι ώστε οι εκπομπές του CO<sub>2</sub> να μπορούν να υγροποιούνται αμέσως πριν από την αποθήκευση και τη φόρτωση στα πλοία (όπως στο RCI).
- Σε άλλες πηγές εκπομπών CO<sub>2</sub>, αυξάνοντας την ποσότητα παροχής CO<sub>2</sub> και μειώνοντας τον κίνδυνο τα πλοία να τίθενται σε αδράνεια.
- Σε σημαντική θαλάσσια διαδρομή, όπου πηγές με χαμηλότερες εκπομπές CO<sub>2</sub> που βρίσκονται σε κοντινά νησιά, θα τροφοδοτούν το κυρίως σημείο φόρτωσης των πλοίων με μικρότερα πλοία.

Συγκρίνοντας το μοναδιαίο κόστος μεταφοράς CO<sub>2</sub> μεταξύ πλοίων και αγωγών, φαίνεται ότι οι αγωγοί είναι η πιο οικονομική λύση, όταν οι πηγές και οι χώροι αποθήκευσης βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους. Με την αύξηση της απόστασης, το κόστος των αγωγών (κυρίως κεφαλαιουχικές δαπάνες) αυξάνει σταδιακά και μπορεί να κάνει τη μεταφορά με πλοία μια πιο ανταγωνιστική επιλογή. Επίσης, η μεταφορά με πλοία αποτελεί μια πιο ευέλικτη λύση, διότι μπορεί να εξυπηρετήσει πολλές διαφορετικές πηγές ή/και διαφορετικούς χώρους αποθήκευσης. Στην Ευρώπη η μεταφορά CO<sub>2</sub> με πλοία είναι σημαντική διότι ένα μεγάλο μέρος των χώρων αποθήκευσης είναι παράκτιο, όπως τα σημεία εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου στη Βόρεια Θάλασσα και θα μπορούσε να συνδυάζεται με τη χρήση του CO<sub>2</sub> για EOR διαδικασίες.

Ενώ ένα μεγάλο μέρος της αποθηκευτικής ικανότητας της δυτικής Ευρώπης είναι υπεράκτιο, υπάρχει ήδη ένα εκτεταμένο δίκτυο αγωγών πετρελαίου και αερίου στη Βόρεια Θάλασσα, μέρος του οποίου μπορεί στο μέλλον, να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά CO<sub>2</sub>. Έτσι, ενώ η ναυτιλία μπορεί να διαδραματίσει τελικά σημαντικό ρόλο στον τομέα των μεταφορών CO<sub>2</sub>, το πιθανότερο είναι οι αγωγοί να αποτελούν την πρώτη επιλογή στις περισσότερες περιπτώσεις. Οι αγωγοί όμως, δεν είναι δυνατό να αποτελούν επιλογή σε πολλές χώρες που έχουν σημαντικές πηγές κοντά στην ακτή, αλλά δεν έχουν μεγάλες δυνατότητες αποθήκευσης σε περιοχές κοντά στη θάλασσα. Για παράδειγμα για την Ιαπωνία, η μεταφορά CO<sub>2</sub> με πλοία μπορεί να είναι η καλύτερη επιλογή. (Global CCS Institute, 2011).

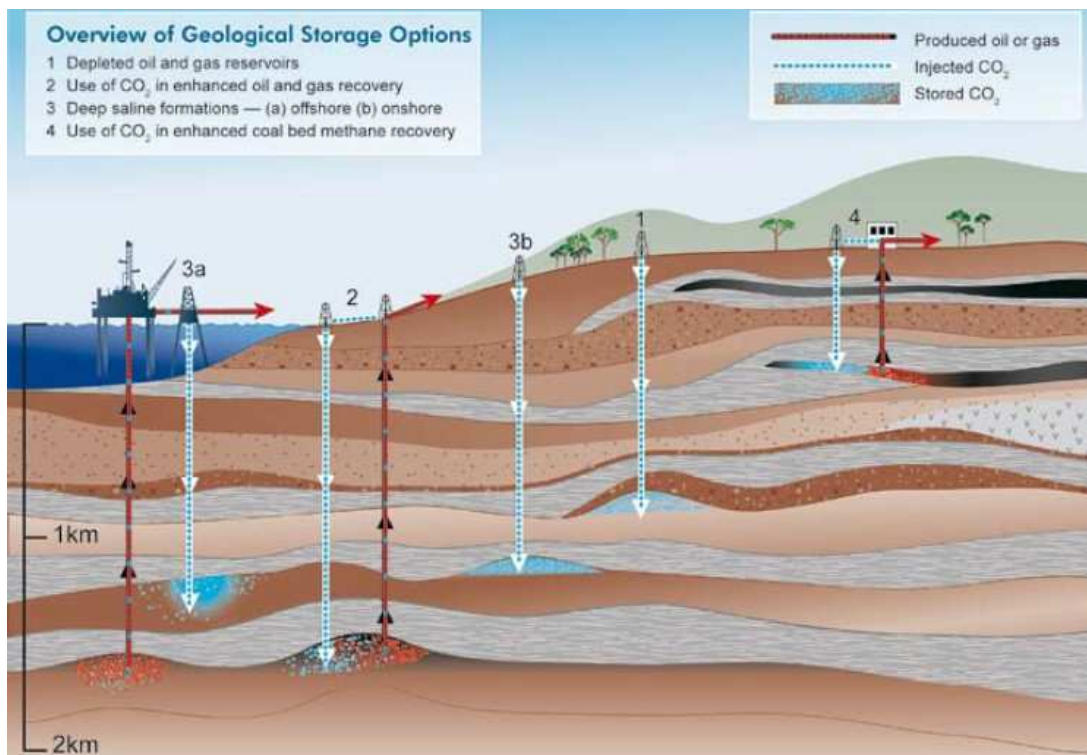
### 5.3 Αποθήκευση CO<sub>2</sub>

Σύμφωνα με μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί, η αποθήκευση του δεσμευμένου CO<sub>2</sub> είναι είναι εφικτή σε ωκεανούς ή υπόγειες φυσικές δεξαμενές και μάλιστα με την υπάρχουσα τεχνολογία. Αυτό το στάδιο της διεργασίας θα είναι σε κάθε περίπτωση πολύ πιο οικονομικό από αυτό της δέσμευσης από το καυσαέριο. Ωστόσο, όλες οι δυνατές επιλογές αποθήκευσης εξαρτώνται σημαντικά από τη γεωγραφική περιοχή και είναι αρκετές οι αβεβαιότητες προς το παρόν, σχετικά με τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Γενικά ισχύει, ότι οι επιλογές αποθήκευσης είναι ανεξάρτητες από το είδος του σταθμού από τον οποίο προέρχεται το CO<sub>2</sub> καθώς και από το είδος της τεχνολογίας δέσμευσης. Για την αποθήκευση απαιτούνται μεγάλες δεξαμενές, γεγονός που αυτόματα στρέφει την προσοχή στη χρήση των φυσικών δεξαμενών (Riemer and Ormerod, 1995).

Όπως έχει αναφερθεί, οι σημαντικότερες επιλογές αποθήκευσης (βλ. σχήμα 4.3.1) είναι:

- Αποθήκευση σε ενεργούς ταμιευτήρες πετρελαίου (EOR).
- Αποθήκευση σε ταμιευτήρες πετρελαίου/φυσικού αερίου που ήδη έχουν εκκενωθεί και σε αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες μεγάλου βάθους.
- Αποθήκευση σε κοιτάσματα μη εξορυγμένου γαιάνθρακα (ECBMR).
- Αποθήκευση σε ωκεανούς μέσω αγωγού ή μέσω πλοίου.
- Αποθήκευση μέσω ορυκτοποίησης (mineralization).

Οι ταμιευτήρες αποθήκευσης CO<sub>2</sub> θα πρέπει να διαθέτουν μεγάλη χωρητικότητα και να παρέχουν ένα αποδεδειγμένα ασφαλές και σίγουρο περιβάλλον αποθήκευσης. Η ιδέα της υπόγειας αποθήκευσης σε ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου ενισχύεται από το πλεονέκτημα της γνωστής γεωλογικής μορφολογίας αφού ήδη έχουν γίνει γεωτεχνικές μελέτες γι' αυτούς. Συνήθως αποτελούνται από πορώδη πετρώματα, έχουν συνήθως σχήμα θόλου και περικλείονται από τέτοια πετρώματα τα οποία απαγορεύουν την μετακίνηση του αερίου σε οποιαδήποτε κατεύθυνση έτσι ώστε να μην υπάρχει διαρροή προς την ατμόσφαιρα. Η χωρητικότητα αυτών των ταμιευτήρων παγκοσμίως έχει εκτιμηθεί με κατάλληλες προσομοιώσεις από διάφορα ινστιτούτα και επιστημονικά εργαστήρια. Έτσι υπολογίστηκε η χωρητικότητα για τους υδροφόρους ορίζοντες περίπου στους 400-10.000Gt CO<sub>2</sub>, για τους ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου περίπου στους 473-1.152Gt CO<sub>2</sub>, ενώ για τα στρώματα κοιτασμάτων μη εξορυγμένου γαιάνθρακα περίπου στους 5-267Gt CO<sub>2</sub>. (Κούκουζας κ.α., 2005).



(Πηγή: IPCC, 2005)

Σχήμα 5.3.1: Επισκόπηση των επιλογών αποθήκευσης CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς

Στον πίνακα 4.3.1 παρουσιάζεται η χωρητικότητα των επιλογών αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> σε παγκόσμιο επίπεδο. Συγκρίνοντας τις τιμές του πίνακα με τις ετήσιες εκπομπές του CO<sub>2</sub> από την καύση ορυκτών καυσίμων στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής -περίπου 24Gt CO<sub>2</sub>/y για το έτος 2001, (Κούκουζας κ.α., 2005)- η αποθήκευση εμφανίζεται να αποτελεί διαθέσιμη επιλογή με ευρύ χρονικό ορίζοντα.

Πίνακας 5.3.1: Παγκόσμια χωρητικότητα γεωλογικών ταμιευτήρων για αποθήκευση CO<sub>2</sub>

(Πηγή: Κούκουζας κ.α., 2005)

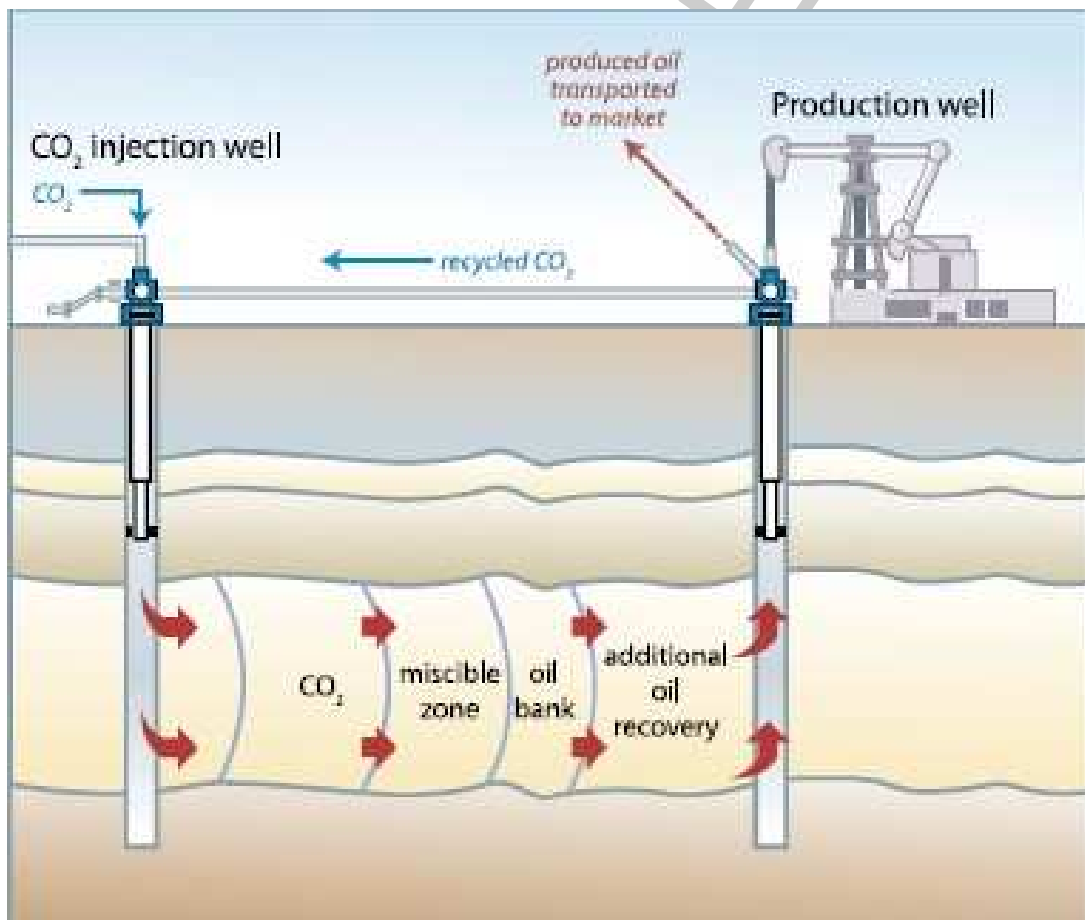
	Turkenburg 1999	Hendriks 1994	IPCC 2001/ ARC 2000	Stevens 2000	ECOFYS, TNO 2004
<b>Κοιτάσματα πετρελαίου</b>	500-1800	385	370	126	242
<b>Κοιτάσματα φυσικού αερίου</b>		1500	1500	800	910
<b>ECBM</b>	na	na	150	na	267
<b>Υδροφόροι ορίζοντες</b>	na	200	4000	na	247

Το μεγάλο εύρος που παρατηρείται στις εκτιμήσεις της χωρητικότητας της κάθε επιλογής αποθήκευσης, αποτελεί έναν ακόμη λόγο για περαιτέρω έρευνα ώστε να μειωθεί η

αβεβαιότητα και να καθοριστούν οι αντίστοιχες χωρητικότητες με μεγαλύτερη ακρίβεια. Με αυτόν τον τρόπο θα είναι τελικά δυνατή η εκτίμηση του ποσοστού στο οποίο μπορεί να γίνει εκμετάλλευση της κάθε μιας από τις επιλογές (Herzog *et al.*, 1997).

### 5.3.1 Αποθήκευση σε ενεργούς ταμιευτήρες πετρελαίου (EOR)

Η τεχνική της βελτιωμένης ανάκτησης πετρελαίου (Enhanced Oil Recovery) χρησιμοποιείται σε ταμιευτήρες που έχουν σχεδόν εκκενωθεί ή σε ταμιευτήρες πετρελαίου υψηλού ιξώδους. Αυτή η τεχνική έχει την δυνατότητα όχι μόνο να αυξάνει την ανάκτηση του πετρελαίου, αλλά να αποθηκεύει στον ταμιευτήρα και την ποσότητα του CO<sub>2</sub> που χρησιμοποιείται.



(Πηγή: IPCC, 2005)

Σχήμα 5.3.1.1: Βελτιωμένη ανάκτηση πετρελαίου χρησιμοποιώντας CO<sub>2</sub>

Πρόκειται για εισαγωγή του CO<sub>2</sub> σε υπερκρίσιμη κατάσταση ( $P > 7.38\text{MPa}$  και  $T > -60^\circ\text{C}$ ) σε ενεργούς ταμιευτήρες η οποία προκαλεί αύξηση της κινητικότητας του πετρελαίου και έχει ως αποτέλεσμα την πιο εύκολη ανάκτηση του. Ένα ποσοστό του εισαγόμενου CO<sub>2</sub> θα ανακτηθεί πάλι μαζί με το πετρέλαιο, θα διαχωριστεί απ' αυτό με την κατάλληλη διεργασία

και θα εισαχθεί και πάλι στον ταμιευτήρα. Υπάρχουν διεργασίες EOR όπου το CO<sub>2</sub> μπορεί να είναι αναμιξιμο ή όχι. Αυτό εξαρτάται κυρίως από την πίεση με την οποία το CO<sub>2</sub> θα εισαχθεί στον ταμιευτήρα. Στην πρώτη περίπτωση το CO<sub>2</sub> αναμιγνύεται με το ακατέργαστο πετρέλαιο, το αναγκάζει να διογκωθεί και μειώνει το ιξώδες του ενώ παράλληλα αυξάνει ή διατηρεί την πίεση του ταμιευτήρα. Ο συνδυασμός αυτός επιτρέπει το πετρέλαιο να κυκλοφορήσει πιο ελεύθερα προς τον αγωγό απ' όπου και θα γίνει η ανάκτηση του. Στην δεύτερη περίπτωση το πεπιεσμένο CO<sub>2</sub> που εισάγεται, χρησιμοποιείται για να αυξήσει την πίεση του ταμιευτήρα στα αρχικά του στάδια και να παρασύρει το ακατέργαστο πετρέλαιο προς τον αγωγό ώστε να ανακτηθεί με μεγαλύτερη ευκολία. Με τη μέθοδο αυτή (CO<sub>2</sub> EOR) η οποία ονομάζεται τριτογενής εξόρυξη, μπορεί να αυξηθεί η παραγωγή του πετρελαίου 10% με 15% κατά προσέγγιση (Κούκουζας κ.α., 2005).

### 5.3.2 Αποθήκευση σε εξαντλημένους ταμιευτήρες πετρελαίου/φυσικού αερίου

Οι ταμιευτήρες πετρελαίου ή φυσικού αερίου που ήδη έχουν εκκενωθεί παρουσιάζονται ως η πιο ελπιδοφόρα επιλογή αποθήκευσης στο προσεχές μέλλον. Αυτό γιατί οι ταμιευτήρες αυτοί έχουν αποδείξει την ικανότητα τους να διατηρούν υγρά ή αέρια σε υψηλές πιέσεις για μεγάλα διαστήματα χρόνου (Κούκουζας κ.α., 2005). Επίσης, το κόστος εξερεύνησής τους είναι αρκετά χαμηλό, η γεωλογία τους είναι γνωστή και υπάρχει η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης τμήματος του εξοπλισμού της παραγωγής υδρογονανθράκων για τη μεταφορά και την έκχυση του CO<sub>2</sub>. (Freund and Ormerod, 1997). Ουσιαστικά εξασφαλίζεται σε αρκετά μεγάλο βαθμό η ασφάλεια της αποθήκευσης που θα πραγματοποιηθεί.

Οι εξαντλημένες πηγές αερίων αποτελούν αξιόλογη επιλογή αποθήκευσης αφού η πρωταρχική ανάκτηση συμβαίνει σε ποσοστό περίπου 95% και οι περισσότερες είναι κλειστές. Η περίπτωση των ταμιευτήρων πετρελαίου δεν είναι ακριβώς ίδια με αυτή των ταμιευτήρων φυσικού αερίου. Συχνά δεν είναι εξαντλημένοι, αλλά μόνο μέρος του περιεχόμενου πετρελαίου έχει ανακτηθεί (ποτέ δε συμβαίνει σε τόσο μεγάλα ποσοστά όσο η ανάκτηση αερίων και μπορεί να είναι από 5% ως και 75%) με αποτέλεσμα να παραμένει αρκετά μεγάλη η ποσότητα πετρελαίου. Συνήθως η απόρριψη του CO<sub>2</sub> σε εξαντλημένες πηγές πετρελαίου σχετίζεται με διεργασίες ανάκτησης πετρελαίου (CO<sub>2</sub> EOR).

Με σκοπό την πλήρη εκμετάλλευση της χωρητικότητας της δεξαμενής, το CO<sub>2</sub> αποθηκεύεται σε μορφή πυκνής φάσης, δηλαδή πάνω από την υπερκρίσιμη πίεση των 7,38MPa. Οι συνθήκες αυτές εμφανίζονται σε βάθος μεγαλύτερο των 800m. Εκεί η θερμοκρασία είναι

επίσης αρκετά μεγαλύτερη από την τιμή της κρίσιμης (31°C). Περίπου το 80% των παγκοσμίων πετρελαιοφόρων περιοχών βρίσκονται σε βάθος μεγαλύτερο των 800m (IEA, 2001b).

Το κόστος της απόρριψης του CO<sub>2</sub> σε εξαντλημένους ταμιευτήρες είναι πολύ χαμηλότερο από το κόστος της δέσμευσης και της συμπίεσης και περίπου ίσο με το κόστος της αποθήκευσής του σε αλατούχες υδροφόρες κλίνες. Τα επιμέρους κόστη αφορούν στις σωληνώσεις, σε συμπιεστές, σε σύστημα μετρητών και στη διαδικασία γεώτρησης (IEA, 2001a).

Εντούτοις, τα περισσότερα από τα φρεάτια θα έπρεπε να ανοιχτούν πάλι με νέες γεωτρήσεις. Επίσης, η πραγματική ικανότητα είναι αβέβαιη λαμβάνοντας υπόψη τις αλλαγές στον ταμιευτήρα που μπορεί να έχουν εμφανιστεί λόγω εισβολής αλατούχου νερού ή λόγω της γεωδομικής αλλαγής (Κούκουζας κ.α., 2005).

Τα ζητήματα που τίθενται είναι περιβαλλοντικά καθώς και σχετικά με την ασφάλεια τέτοιων έργων. Σε υψηλές τιμές συγκέντρωσης, το CO<sub>2</sub> είναι ασφυξιογόνο κι επειδή είναι βαρύτερο από τον αέρα, παρουσιάζει την τάση να συγκεντρώνεται σε κοιλότητες. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερη προσοχή κατά το σχεδιασμό και την υλοποίηση τέτοιων έργων. Η ύπαρξη προβλήματος στην υπόγεια αποθήκευση του CO<sub>2</sub>, είναι πιθανή είτε λόγω συνεχούς μικρής, είτε λόγω μεγάλης και ξαφνικής διαρροής (όπως έπειτα από σεισμική δραστηριότητα). Αυτό θα πρέπει να μελετάται με σκοπό την πρόληψη, όπως συμβαίνει και στην περίπτωση αποθήκευσης άλλων αερίων, με μελέτη του αποθηκευτικού χώρου και σωστή επιλογή. Αρκετές είναι οι μελέτες που πραγματοποιούνται με σκοπό να γίνει εκτίμηση της πιθανότητας να υπάρξει διαρροή σε ένα τέτοιο έργο, αλλά και των επιπτώσεων που θα είχε αυτό αν συνέβαινε (Herzog and Golomb, 2004).

### 5.3.3 Αποθήκευση σε αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες

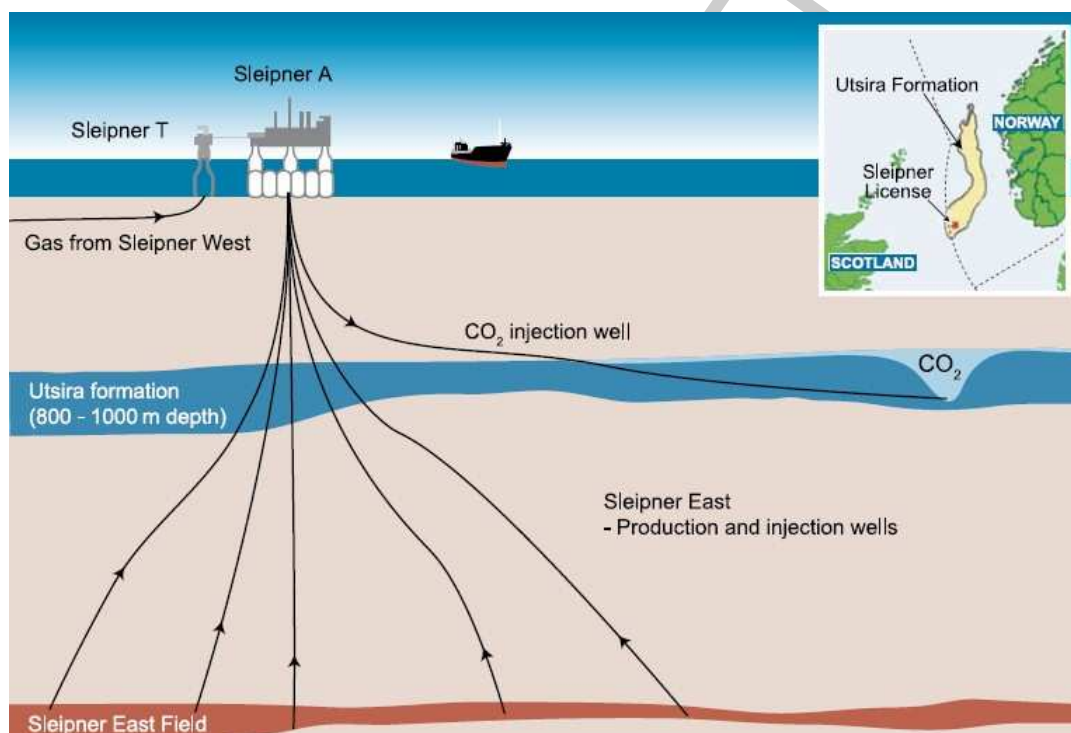
Η βασική αρχή που σχετίζεται με όλες τις επιλογές υπόγειας αποθήκευσης CO<sub>2</sub> είναι ότι πραγματοποιείται αποθήκευσή του σε κάποια γεωλογική δομή όπου αυτό παγιδεύεται και με τον τρόπο αυτό αποτρέπεται η ελευθέρωσή του στην ατμόσφαιρα. Η δομή στην οποία θα γίνει η αποθήκευση πρέπει να αποτελείται από ένα διαπερατό στρώμα, ώστε να επιτρέπεται η είσοδος του CO<sub>2</sub> και ένα μη διαπερατό ώστε να αποτρέπεται στη συνέχεια η διαφυγή του στην ατμόσφαιρα.

Οι αλατούχοι υδροφόροι ορίζοντες αποτελούν ιζηματογενείς λεκάνες όπου περιέχονται

ανθρακικές ενώσεις και σχηματισμοί αμμόλιθων. Το πορώδες του ορυκτού καθορίζει και τη χωρητικότητα αποθήκευσης της κλίνης (IEA, 2001a).

Οι αλατούχοι υδροφόροι ορίζοντες έχουν τη μέγιστη δυνατότητα αποθήκευσης του CO<sub>2</sub>, αφού οι ταμιευτήρες αυτοί είναι οι πιο διαδεδομένοι και έχουν την μεγαλύτερη χωρητικότητα (Κούκουζας κ.α., 2005).

Η υπόγεια αποθήκευση CO<sub>2</sub> σε αλατούχο υδροφόρο ορίζοντα, εφαρμόζεται από την εταιρεία Statoil στη Βόρεια Θάλασσα, περίπου 250Km από τις ακτές της Νορβηγίας. Το έργο Sleipner αποτελεί την πρώτη μεγάλης κλίμακας εμπορική εφαρμογή αποθήκευσης CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς και παρουσιάζεται απλοποιημένα στο 5.3.3.1.



(Πηγή: IPCC, 2005)

Σχήμα 5.3.3.1: Αποθήκευση CO<sub>2</sub> στον αλατούχο υδροφόρο ορίζοντα μεγάλου βάθους Utsira

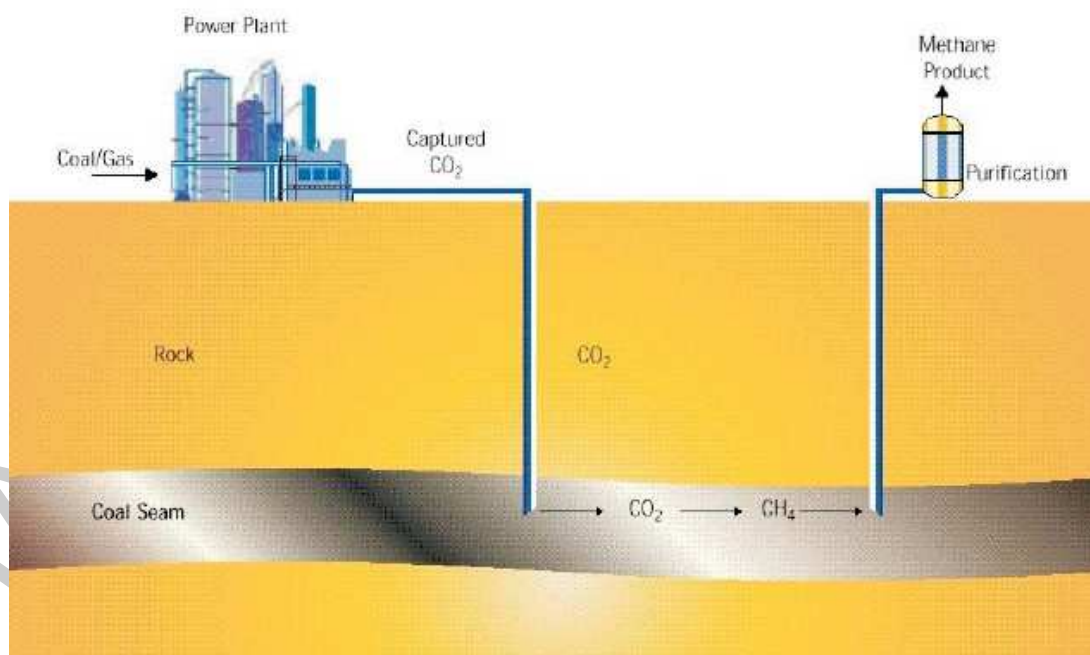
Κατάλληλες περιπτώσεις τέτοιων ταμιευτήρων είναι αυτές που παρουσιάζουν μια σχετικά μικρή πιθανότητα διαρροής λόγω της ύπαρξης μη διαπερατού τοιχώματος. Η έκχυση θα πρέπει να πραγματοποιείται σε βάθος μεγαλύτερο των 800m ώστε να είναι σε πυκνή φάση. Η έκχυση του CO<sub>2</sub> σε τέτοιες περιπτώσεις πραγματοποιείται όπως ακριβώς και στην περίπτωση των εξαντλημένων πηγών φυσικού αερίου και πετρελαίου. Η εμπειρία σε έκχυση CO<sub>2</sub> από τις εφαρμογές ανάκτησης πετρελαίου (EOR), είναι αρκετή ώστε να θεωρείται η επιλογή της αποθήκευσης σε αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες πραγματοποιήσιμη. Παρόλο που τέτοιοι σχηματισμοί παρουσιάζονται σχεδόν παντού, πληροφορίες υπάρχουν μόνο για εκείνους που

περιέχουν υδρογονάνθρακες ή όπου έχουν πραγματοποιηθεί εργασίες εξαγωγής πετρελαίου ή φυσικού αερίου (IEA, 2001b).

Ο χρόνος αποθήκευσης σε τέτοιους σχηματισμούς είναι της τάξης εκατομμυρίων ετών και έτσι είναι δυνατή η ύπαρξη χημικής αντίδρασης μεταξύ του διαλύματος του CO<sub>2</sub> και του υπάρχοντος ορυκτού. Αν το ορυκτό είναι ανθρακική ένωση, η παρουσία CO<sub>2</sub> στο νερό θα οδηγήσει σε αύξηση της διάλυση στο νερό, αλλά αυτό δεν θα αυξήσει σημαντικά τη δεσμευόμενη ποσότητα του CO<sub>2</sub>. Αν το ορυκτό είναι πυριτικό άλας, τότε η δεσμευόμενη ποσότητα CO<sub>2</sub> σχεδόν διπλασιάζεται, με καθίζηση στερεών ανθρακικών ενώσεων που μπορούν να θεωρηθούν ως μόνιμος τρόπος αποθήκευσης CO<sub>2</sub>. Η μέγιστη δέσμευση ποσότητας CO<sub>2</sub> συμβαίνει στην περίπτωση ορυκτού Ca-Mg-Si με καθίζηση ανθρακικού ασβεστίου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η αποθήκευση είναι μόνιμη (IEA, 2001b).

#### 5.3.4 Αποθήκευση σε κοιτάσματα μη εξορυγμένου γαιάθρακα (ECBMR)

Η διαδικασία αφορά την αποθήκευση του CO<sub>2</sub> σε κοιτάσματα άνθρακα τα οποία δεν είναι εκμεταλλεύσιμα εμπορικά. Το CO<sub>2</sub> εισάγεται στα κοιτάσματα, απορροφάται στις επιφάνειες των στρωμάτων άνθρακα ελευθερώνοντας μεθάνιο, το οποίο μπορεί να ανακτηθεί έπειτα σαν αέριο. Η συγκεκριμένη μέθοδος αποθήκευσης παρουσιάζεται απλοποιημένα στο σχήμα 5.3.4.1.



(Πηγή: IEA, 2001a)

Σχήμα 5.3.4.1: Αποθήκευση CO<sub>2</sub> σε κοιτάσματα άνθρακα και ενίσχυση ανάκτησης CH<sub>4</sub>



Ουσιαστικά πρόκειται για αντικατάσταση του μεθανίου που υπάρχει στον άνθρακα. Η διαδικασία εξόρυξης μεθανίου με αποσυμπίεση, εφαρμόζεται αρκετά χρόνια με απόδοση περίπου 50% σε σχέση με το μεθάνιο που υπάρχει στο κοιτάσμα του άνθρακα. Με την εισαγωγή CO<sub>2</sub> στο κοιτάσμα, εξάγεται μεγαλύτερη ποσότητα μεθανίου, ενώ ταυτόχρονα αποθηκεύεται το CO<sub>2</sub>. Ο άνθρακας μπορεί να απορροφήσει διπλάσια ποσότητα CO<sub>2</sub> από το μεθάνιο που ανακτάται με αποτέλεσμα να προκύπτει καθαρή αποθήκευση CO<sub>2</sub>, ακόμα και αν το ανακτώμενο μεθάνιο καίγεται, χωρίς να δεσμεύεται το CO<sub>2</sub> που παράγεται (IEA, 2001a).

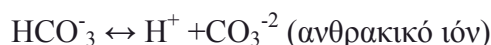
Η διαδικασία μοιάζει με αυτή όπου ενεργός άνθρακας χρησιμοποιείται για απομάκρυνση ακαθαρσιών από αέρα ή νερό. Η εκτεθειμένη ενεργός επιφάνεια του άνθρακα παρουσιάζει τάση προσρόφησης CO<sub>2</sub>, σε σχέση με το μεθάνιο, ίση με 2:1 (Herzog *and* Golomb, 2004).

Ένα ιδιαίτερο πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι τα κοιτάσματα αυτά μπορούν να αποθηκεύσουν πολύ μεγαλύτερες ποσότητες CO<sub>2</sub> από τον ισοδύναμο όγκο ενός συμβατικού ταμιευτήρα λόγω του ότι ο άνθρακας έχει μεγαλύτερες περιοχές επιφάνειας. Υπάρχουν δύο τέτοια προγράμματα (Enhanced Coal-bed Methane Recovery) στο βορειοδυτικό Μεξικό και στο νοτιοδυτικό Κολοράντο των Η.Π.Α. Η εμπειρία που έχει αποκτηθεί από την μελέτη των προγραμμάτων αυτών χρησιμοποιείται για να ελέγξει και να προτυποποιήσει τους μηχανισμούς αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> σε τέτοιους ταμιευτήρες, όπως επίσης και να αξιολογηθεί η δυνατότητα αποθήκευσης σε άλλες λεκάνες τέτοιου είδους (Κούκουζας κ.α., 2005).

Κατάλληλοι σχηματισμοί που μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπάρχουν παγκοσμίως. Αρκετά είναι τα ορυχεία άνθρακα στην Αυστραλία, τη Ρωσία, την Κίνα, την Ινδία και άλλες χώρες, τα οποία εκτιμάται ότι παρουσιάζουν καλές προοπτικές για την δημιουργία μονάδων αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα, και ανάκτησης μεθανίου (Herzog *and* Golomb, 2004).

### 5.3.5 Αποθήκευση σε ωκεανούς

Το CO<sub>2</sub> είναι περισσότερο διαλυτό στο θαλασσινό νερό από ότι στο γλυκό διότι έχει υψηλότερο pH (6-8), ώστε να αποκαθίσταται ισορροπία, με μετακίνηση των αντιδράσεων που πραγματοποιούνται προς τα δεξιά:



Στο θαλασσινό νερό μόνο 1% του CO<sub>2</sub> παραμένει ως μοριακό ενώ περισσότερο από 90%

εμφανίζεται με μορφή δισανθρακικού ιόντος. Το δισανθρακικό με το ανθρακικό ιόν και το ανθρακικό οξύ αποτελούν το διαλυμένο ανόργανο άνθρακα.

Το θερμό νερό της επιφάνειας είναι κορεσμένο σε CO<sub>2</sub> αλλά των βαθύτερων στρωμάτων είναι ακόρεστο και έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα για διάλυση με αποτέλεσμα να υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης επιπλέον CO<sub>2</sub>.

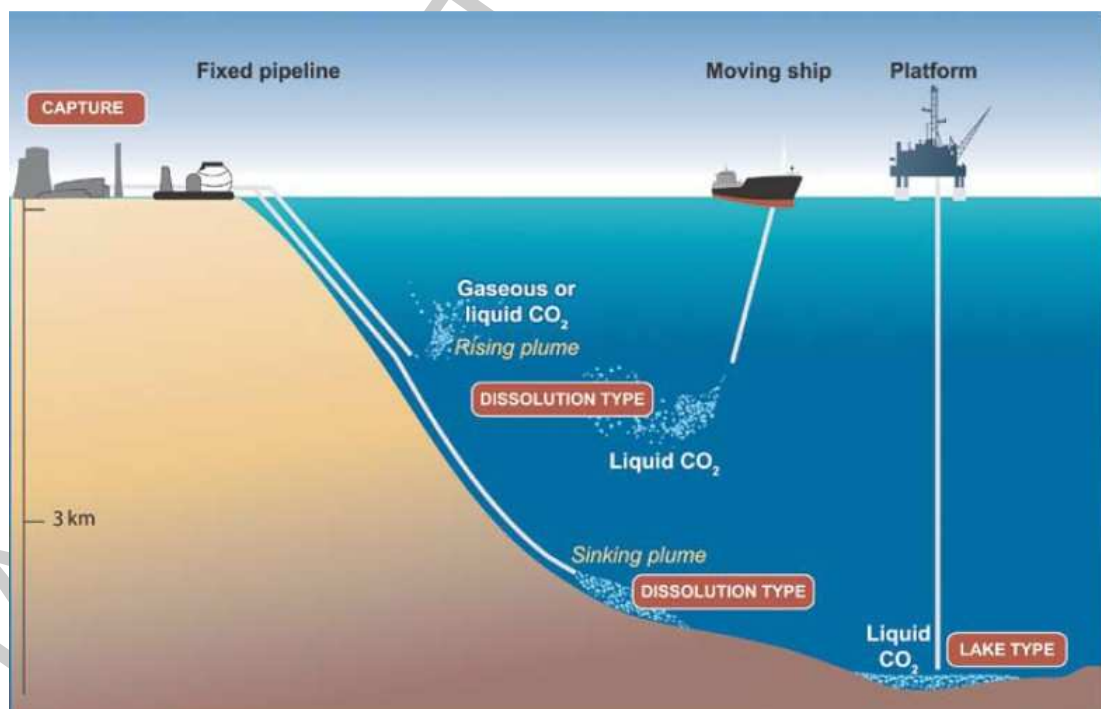
Η μεταφορά του CO<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα στα βάθη των ωκεανών γίνεται με δύο μηχανισμούς. Ο πρώτος σχετίζεται με τη διαλυτότητα όπου η διαφορά τιμής οδηγεί σε μετακίνηση μαζών, ενώ ο δεύτερος με τις διεργασίες ανάπτυξης και αναπαραγωγής του φυτοπλαγκτόν που χρησιμοποιεί για τη φωτοσύνθεση το διαλυμένο στην επιφάνεια CO<sub>2</sub>. Ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση ενός κύκλου διεργασίας για κάθε έναν από τους δύο αυτούς μηχανισμούς μεταφοράς, είναι περίπου 1.000 χρόνια.

Η διαδικασία μετακίνησης από το βάθος ωκεανών στην ατμόσφαιρα είναι επίσης αργή, οπότε το CO<sub>2</sub> μπορεί να μείνει αποθηκευμένο για μεγάλα χρονικά διαστήματα (IEA, 2002).

Για την απόθεση του CO<sub>2</sub> στους ωκεανούς οι σημαντικότερες επιλογές που μελετώνται είναι:

- Διάχυση του CO<sub>2</sub> ενδιάμεσα βάθη από 1.000 έως 2.000m.
- Έκχυση του CO<sub>2</sub> σε βάθος μεγαλύτερο των 3.000m.

Στο σχήμα 5.3.5.1 παρουσιάζονται οι επιλογές απόθεσης του CO<sub>2</sub> στους ωκεανούς καθώς και οι τεχνικές που μπορούν να το επιτύχουν.



(Πηγή: IPCC, 2005)

Σχήμα 5.3.5.1: Επισκόπηση των επιλογών αποθήκευσης CO<sub>2</sub> σε ωκεανό

Στην πρώτη περίπτωση, χρησιμοποιώντας μια συσκευή διάχυσης το CO<sub>2</sub> εισάγεται στον ωκεανό σε βάθη από 1.000 έως 2.000m. Από τα βάθη αυτά, το εισαγόμενο νέφος σταγονιδίων του CO<sub>2</sub> ανέρχεται προς την επιφάνεια και διαλύεται στο νερό προτού φτάσει σε βάθος 500m όπου τα σταγονίδια παίρνουν πλέον μορφή φυσαλίδων οι οποίες θα φτάσουν στην επιφάνεια. Πειράματα τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο, έχουν δείξει ότι μία ταινία ένυδρων ουσιών (hydrate film) μπορεί διαμορφωθεί γύρω από τα σταγονίδια του CO<sub>2</sub> καθιστώντας τα βαρύτερα από το νερό της θάλασσας, προσδίδοντας τους αρνητική άνωση με αποτέλεσμα να κατευθύνονται στον πυθμένα (Heddle *et al.*, 2003).

Για τη μοντελοποίηση του αναρριχόμενου πλουμίου υγρών σταγόνων CO<sub>2</sub> που δημιουργείται κατά τη διάχυση έχουν γίνει αρκετές μελέτες. Προβλέπεται ότι είναι δυνατό, ολόκληρη η ποσότητα του CO<sub>2</sub> να διασπείρεται στο περιβάλλον θαλάσσιο νερό, σε ύψος έως 100m πάνω από το σημείο έκχυσης. Στη συνέχεια, το πλούσιο σε CO<sub>2</sub> νερό θα διαλύεται οριζοντίως, με τη βοήθεια θαλάσσιων ρευμάτων (IEA, 2002).

Στην δεύτερη περίπτωση, το γεγονός ότι η πυκνότητα του υγρού CO<sub>2</sub> είναι μεγαλύτερη από του νερού σε βάθος μεγαλύτερο των 3000m, δημιουργεί τις προϋποθέσεις για δημιουργία μιας λίμνης συσσώρευσης του CO<sub>2</sub> στον πυθμένα του ωκεανού. Η διάλυσή του στα υπερκείμενα στρώματα θα μειώνεται σημαντικά λόγω σχηματισμού ένυδρου διοξειδίου του άνθρακα. Ως αποτέλεσμα και λόγω του μεγάλου βάθους, ο χρόνος συγκράτησης του CO<sub>2</sub> θα είναι ακόμη μεγαλύτερος. Από μοντέλα προσομοίωσης προκύπτει ότι αν εκχύεται σε βάθος μεγαλύτερο των 3.000m, ο χρόνος συγκράτησής του είναι μεγαλύτερος των 1.000 ετών. Με την επιλογή της έκχυσης του CO<sub>2</sub> στο βάθος των ωκεανών εξασφαλίζεται ότι δεν υπάρχει κίνδυνος ξαφνικής καταστροφικής ελευθέρωσής του, εκτός και αν υπάρξει αποτυχία του συστήματος έκχυσης (Riemer *and* Ormerod, 1995).

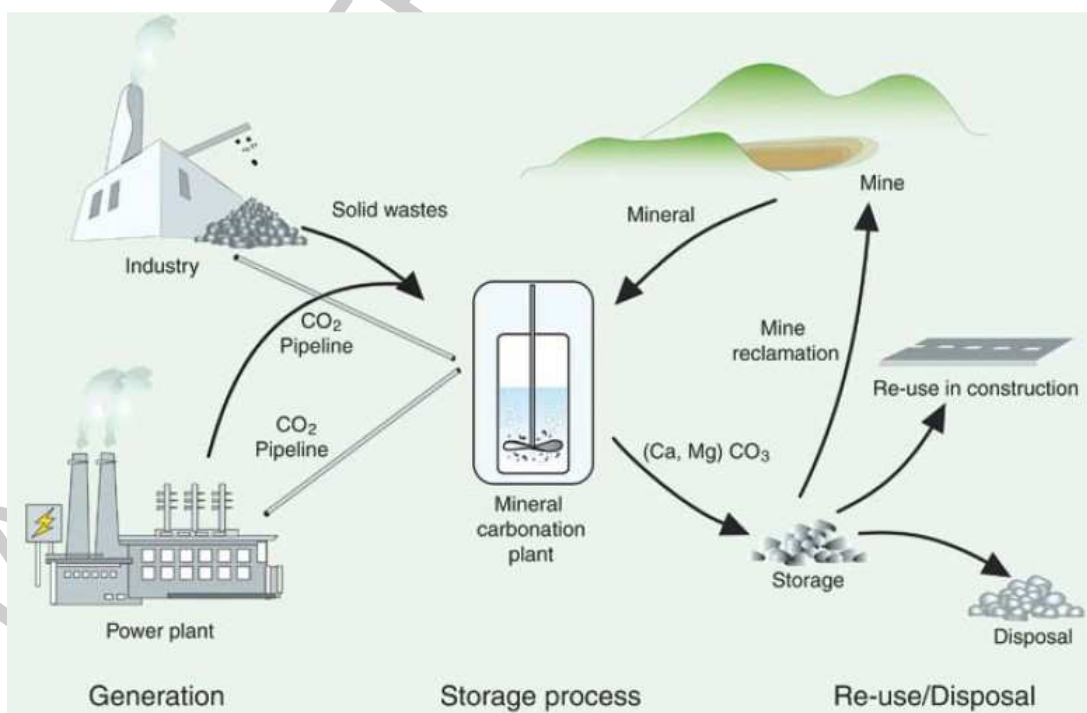
Η ανάγκη για έρευνα και εξόρυξη υποθαλάσσιων κοιτασμάτων πετρελαίου και αερίου έχει οδηγήσει σε αλματώδη πρόοδο τη σχετική τεχνολογία. Εργασίες σε βάθος 2.000m αποτελούν πλέον διαδικασίες ρουτίνας, ενώ όπως έχουν δείξει δοκιμαστικές γεωτρήσεις και άλλα επιστημονικά προγράμματα, εργασίες σε πολύ μεγαλύτερα βάθη που προσεγγίζουν τα 10.000m, είναι δυνατόν να επιτευχθούν στο μέλλον. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν πολλές τεχνικές προκλήσεις για την εγκατάσταση αγωγών σε τόσο μεγάλο βάθος. Έτσι, η καλύτερη επιλογή ως πρώτο βήμα φαίνεται να είναι η απόθεση του CO<sub>2</sub> σε ενδιάμεσα βάθη των 1.000 έως 2.000m. Η τεχνολογία για να υλοποιηθεί αυτή η επιλογή, είναι διαθέσιμη. Υπάρχει όμως έλλειψη πληροφοριών σχετικά με, την επαρκή βελτιστοποίηση του κόστους,

τον καθορισμό της αποτελεσματικότητας της δέσμευσης και της κατανόησης των αλλαγών που προκύπτουν στους βιογεωχημικούς κύκλους των ωκεανών (Heddle *et al.*, 2003).

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την απόρριψη CO<sub>2</sub> σε ωκεανούς σχετίζονται κυρίως με τη μεταβολή του pH. Το CO<sub>2</sub> υπάρχει φυσικά στους ωκεανούς, αλλά με επιπλέον προσθήκη του, μειώνεται το pH λόγω σχηματισμού ανθρακικών και δισανθρακικών ιόντων. Η μεταβολή του pH επηρεάζει έμμεσα το μεταβολισμό των θαλάσσιων οργανισμών. Η βιολογική επίδραση της απόρριψης CO<sub>2</sub> σε ωκεανούς δεν είναι πλήρως γνωστή. Επειδή η πελαγική βιομάζα μειώνεται αρκετά σε μεγάλα βάθη, η έκχυση CO<sub>2</sub> σε βάθη μεγαλύτερα των 1000m, είναι περισσότερο αποδεκτή (Herzog and Golomb, 2004).

### 5.3.6 Αποθήκευση μέσω ορυκτοποίησης

Με τη μέθοδο αυτή το CO<sub>2</sub> αποθηκεύεται υπό μορφή ανθρακικών ορυκτών. Η αντίδραση του CO<sub>2</sub> με οξείδια ώστε να σχηματιστούν ανθρακικά ορυκτά όπως μαγνησίτης ή ασβεστίτης είναι εξώθερμη. Πετρώματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ορυκτοποίηση του CO<sub>2</sub> είναι υπερβασικά πετρώματα πλούσια σε Mg όπως δουνίτες, περιδοτίτες και σερπεντινίτες. Τέτοιες αντιδράσεις εμφανίζονται στη φύση σε γεωλογικούς χρόνους (Κούκουζας κ.α., 2005). Στο σχήμα 5.3.6.1 παρουσιάζονται απλοποιημένα οι ροές των υλικών και τα στάδια της διαδικασίας ορυκτοποίησης.



(Πηγή: IPCC, 2005)

Σχήμα 5.3.6.1: Ροές των υλικών και τα στάδια της διαδικασίας ορυκτοποίησης

Το ενεργό συστατικό στη διεργασία αυτή είναι το οξείδιο του μαγνησίου το οποίο περιέχεται περίπου κατά 30% κ.β. στα ορυκτά αυτά. Οι ανθρακικές ενώσεις που σχηματίζονται αποτελούν καταστάσεις χαμηλότερης ενέργειας σε σχέση με το CO<sub>2</sub>, που σημαίνει ότι ο σχηματισμός τους είναι σταθερός και μόνιμος. Επιπλέον, αφού τα ορυκτά αυτά υπάρχουν στη φύση, είναι δυνατή η χρήση τους σχεδόν παντού (Kohlmann *and* Zevenhoven, 2001).

Οι μελέτες επικεντρώνονται ώστε να επιταχυνθεί το φυσικό ποσοστό αντίδρασης με αποτέλεσμα να μπορεί να είναι οικονομικά βιώσιμη η αποθήκευση CO<sub>2</sub> ως στερεό ορυκτό ανθρακικό άλας. Η αποθήκευση του CO<sub>2</sub> στα ορυκτά είναι πιθανή και ασφαλέστερη από άλλες τεχνολογίες σε υπόγειους ταμιευτήρες ή σε ωκεανούς. Τα οξείδια ασβεστίου και μαγνησίου που απαιτούνται για τη διαμόρφωση των σταθερών ορυκτών ανθρακικών αλάτων είναι διαθέσιμα στη φύση σε μεγάλες ποσότητες (Κούκουζας κ.α., 2005).

Οι επιλογές διάθεσης των ανθρακικών ορυκτών καθορίζονται από τη μάζα του υλικού που παράγεται (βλ. σχήμα 5.3.6.1). Η μεταφορά του παραγόμενου υλικού σε μεγάλες αποστάσεις δεν είναι οικονομικά αποδοτική με αποτέλεσμα, η καλύτερη θέση για τη διάθεση των ανθρακικών ορυκτών να είναι στο χώρο του ορυχείου. Η ποσότητα του υλικού που θα προκύπτει προς διάθεση, αναμένεται να είναι από 50 έως 100% κατ' όγκο περισσότερη από ότι αρχικά εξορύσσεται.

Η αποθήκευση μέσω ορυκτοποίησης δεν αποτελεί ακόμα μια ώριμη τεχνολογία. Οι μελέτες που έχουν εκπονηθεί δεν αρκούν για μία διεξοδική αξιολόγηση της τεχνολογίας όσο αφορά το δυναμικό της, τα απαιτούμενα κόστη και τις επιπτώσεις από την εφαρμογή της. Σαν μέθοδος αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> θα είναι πάντα πιο ακριβή από τις περισσότερες εφαρμογές αποθήκευσης σε γεωλογικούς σχηματισμούς. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά της έναντι των άλλων μεθόδων είναι η σχεδόν απεριόριστη διάρκεια αποθήκευσης και οι ελάχιστες απαιτήσεις παρακολούθησης (IPCC, 2005).

#### **5.4 Χρησιμοποίηση CO<sub>2</sub>**

Ως εναλλακτική της αποθήκευσης του δεσμευμένου CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς, σε ωκεανούς ή μέσω της διαδικασίας ορυκτοποίησης, εξετάζεται η δυνατότητα χρήσης του στη βιομηχανία για παραγωγή προϊόντων (είτε άμεσα σε χημικές διεργασίες, είτε ως πηγή άνθρακα). Το CO<sub>2</sub> που έχει δεσμευθεί με μια από τις μεθόδους που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 3, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι μειώνει τις εκπομπές CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα όταν χρησιμοποιείται στη βιομηχανία, μόνο εάν πληρούνται τα ακόλουθα κριτήρια:

1. Η χρήση του δεσμευμένου CO<sub>2</sub> δεν θα πρέπει απλά να αντικαθιστά μια άλλη πηγή CO<sub>2</sub>, η οποία στη συνέχεια θα διοχετεύεται στην ατμόσφαιρα. Για παράδειγμα, η αντικατάσταση της χρήσης του CO<sub>2</sub> που προέρχεται από ένα ασβεστοκείμενο δεν θα οδηγούσε σε μείωση των εκπομπών του CO<sub>2</sub>. Αντίθετα, η αντικατάσταση της χρήσης του CO<sub>2</sub> που προέρχεται από φυσικές γεωλογικές πηγές (το οποίο πλέον δεν θα διατίθεται), θα είχε ως αποτέλεσμα καθαρή μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Η πλειονότητα των ποσοτήτων CO<sub>2</sub> που χρησιμοποιούνται για διεργασίες ανάκτησης πετρελαίου (EOR) στις ΗΠΑ, προέρχονται από φυσικές γεωλογικές πηγές.
2. Οι ενώσεις που παράγονται χρησιμοποιώντας δεσμευμένο CO<sub>2</sub> θα πρέπει να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής πριν το CO<sub>2</sub> απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα μέσω καύσης ή άλλης διαδικασίας υποβάθμισης.
3. Κατά την εξέταση της χρήσης του δεσμευμένου CO<sub>2</sub> σε μια βιομηχανική διαδικασία, τα όρια του συστήματος θα πρέπει ορίζονται προσεκτικά, ώστε να περιλαμβάνουν τους συντελεστές παραγωγής (υλικά, ορυκτά καύσιμα, ροές ενέργειας) τις εκπομπές, καθώς και τα προϊόντα με την πλήρη αλυσίδα των διαδικασιών που εφαρμόζονται για την παραγωγή μιας μονάδας του προϊόντος. Με τον τρόπο αυτό, θα καθορίζεται η συνολική ποσότητα του CO<sub>2</sub> που «αποθηκεύεται» μέσω της χρησιμοποίησής του.

Το διοξείδιο του άνθρακα εμφανίζεται στη βιομηχανία σε μεγάλο αριθμό εφαρμογών και διαδικασιών. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι χρησιμοποιείται, για την παραγωγή χημικών ουσιών όπως ουρία, σε συστήματα ψύξης και πυρόσβεσης, ως αδρανές αέριο στη συσκευασία τροφίμων και ποτών, σε συστήματα συγκόλλησης, σε διεργασίες επεξεργασίας νερού, στη βιομηχανία χαρτιού και σε πολλές άλλες μικρότερης κλίμακας εφαρμογές (IPCC, 2005).

Ειδικότερα, κατά την ψύξη με χρήση CO<sub>2</sub> πραγματοποιείται μεταφορά θερμότητας σε αυτό, αλλάζοντας τη φάση του από στερεή σε αέρια. Η θερμότητα που η πρόσδοσή της θα προκαλέσει την τήξη και την εξάτμιση του διοξειδίου του στερεού άνθρακα προέρχεται από το υλικό που θα ψυχθεί ή/και από το περιβάλλον. Εκτός και αν η διεργασία πραγματοποιείται σε κλειστό κύκλο το CO<sub>2</sub> θα ελευθερωθεί απευθείας στην ατμόσφαιρα μετά την εξάτμισή του. Ακόμη και σε κλειστού κύκλου διεργασία παρατηρούνται μικρές, αλλά όχι αμελητέες ποσότητες απωλειών του αερίου CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα. Σε αρκετές εφαρμογές το CO<sub>2</sub>, εμποδίζει την πραγματοποίηση ανεπιθύμητων χημικών αντιδράσεων αποκλείοντας τη συμμετοχή του ατμοσφαιρικού οξυγόνου. Σε πυροσβεστήρες προκαλεί ψύξη της φλόγας και αποτρέπει την καύση προκαλώντας έλλειψη οξυγόνου. Στις συγκολλήσεις, εμποδίζει το ατμοσφαιρικό οξυγόνο να έρθει σε επαφή με το τηγμένο υλικό. Σε διεργασίες τροφίμων και

με σκοπό την παρεμπόδιση βακτηριακής δράσης η οποία απαιτεί την παρουσία οξυγόνου, το CO<sub>2</sub> χρησιμοποιείται για την επίτευξη συντήρησης. Σε όλες αυτές τις εφαρμογές, παρεμποδίζει το ατμοσφαιρικό οξυγόνο και έτσι, σε κάθε περίπτωση ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Όσον αφορά στη χρησιμοποίησή του στον κορεσμό υγρών (βιομηχανία τροφίμων, ποτοποιία), η ποσότητα που καταναλώνεται είναι περίπου  $1,0 \cdot 10^6$  τόνοι ετησίως. Στην περίπτωση αυτή, μεγάλη ποσότητα του περιεχόμενου CO<sub>2</sub> ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα με το άνοιγμα της συσκευασίας, ενώ κατά τη διαδικασία της πέψης ελευθερώνεται και η υπόλοιπη. Η χρησιμοποίησή του σε τέτοιες εφαρμογές, δεν αποτελεί και τρόπο αποθήκευσής του λόγω του μικρού κύκλου ζωής των παραγόμενων προϊόντων. Ακριβώς το ίδιο ισχύει και για την περίπτωση χρήσης του CO<sub>2</sub> σε επεξεργασία υγρών αποβλήτων και στη συσκευασία τροφίμων (IEA, 1995).

Όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 5.3.1 σημαντικές ποσότητες CO<sub>2</sub> χρησιμοποιούνται σε EOR διεργασίες, ιδιαίτερα στις Ηνωμένες Πολιτείες.

Η κλίμακα χρήσης του δεσμευμένου CO<sub>2</sub> σε βιομηχανικές διεργασίες είναι πολύ μικρή, η αποθήκευσή του πολλές φορές μικρότερη και το ενεργειακό ισοζύγιο πολύ δυσμενές. Η έρευνα για τη χρήση του CO<sub>2</sub> σε οργανικά πολυμερή και σε πλαστικά παραγωγής συνεχίζεται, αλλά οι κατευθύνσεις αφορούν τη μείωση του κόστους, την εξάλειψη των επικίνδυνων ενδιάμεσων χημικών ενώσεων και την εξάλειψη των τοξικών αποβλήτων, παρά την αποθήκευση του CO<sub>2</sub>. Έτσι, η συμβολή της χρησιμοποίησης του CO<sub>2</sub>, στη μείωση των συγκεντρώσεών του στην ατμόσφαιρα δεν αναμένεται σημαντική τουλάχιστον για τα επόμενα χρόνια (IPCC, 2005).

## **Κεφάλαιο 6**

### **Η περίπτωση της Ελλάδας**

#### **6.1 Εισαγωγή**

Η Ελλάδα τις επόμενες δεκαετίες θα βρεθεί αντιμέτωπη με μια διπλή πρόκληση, απ' τη μια θα πρέπει να ανταποκριθεί στην υποχρέωση (στα πλαίσια εθνικών και κοινοτικών συμφωνιών) για περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει να εφαρμόσει πολιτικές που οδηγούν σε υγιή οικονομική ανάπτυξη, εξασφαλίζοντας την ενεργειακή ασφάλεια της χώρας.

Όπως αναλυτικά παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2, με βάση το Πρωτόκολλο του Κιότο, η Ελλάδα έχει δεσμευθεί να περιορίσει την αύξηση των εκπομπών της στο +25% για το διάστημα 2008-2012 σε σχέση με το έτος βάσης 1990. Για να ανταποκριθεί στη δέσμευσή της αυτή, η χώρα μας εκτόνησε το Εθνικό Πρόγραμμα μείωσης εκπομπών αερίων φαινομένου θερμοκηπίου για την περίοδο 2000-2010.

Στη συνέχεια και για την περίοδο μέχρι το 2020 η Ευρωπαϊκή Ενεργειακή Πολιτική επικεντρώνεται στην επίτευξη συγκεκριμένων επιμέρους στόχων (οι λεγόμενοι στόχοι 20-20-20) για το σύνολο των Κρατών-Μελών, οι οποίοι για την Ελλάδα εξειδικεύονται σε μείωση κατά 4% των εκπομπών αερίων ρύπων του θερμοκηπίου στους τομείς εκτός εμπορίας σε σχέση με τα επίπεδα του 2005 (ΥΠΕΚΑ, 2012).

Με αφετηρία το 1ο Σχέδιο Δράσης για τις ΑΠΕ, η Εθνική Επιτροπή Ενεργειακής Στρατηγικής του Υπουργείου Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής επιμελήθηκε μια σε βάθος και με μακροχρόνιο ορίζοντα ανάλυση του Ελληνικού Ενεργειακού Συστήματος, με στόχο τη διαμόρφωση του Ενεργειακού Χάρτη Πορείας της Ελλάδας για την περίοδο 2020-2050. Η πορεία αυτή θα μπορεί να εντάσσεται στο γενικότερο πλαίσιο των σχεδιασμών της Ε.Ε., που αποβλέπει στην μεγιστοποίηση της δυνατότητας διασυνοριακών συναλλαγών, με τον κατάλληλο σχεδιασμό των δικτύων. Η μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενη ενέργεια, κυρίως μέσω της μεγιστοποίησης της διείσδυσης των ΑΠΕ και της βέλτιστης αξιοποίησης των εγχώριων ενεργειακών πόρων τόσο στην ηλεκτροπαραγωγή, όσο και στους υπόλοιπους τομείς, καθώς και η επίτευξη σημαντικής μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μέχρι το 2050, αποτελούν τους βασικούς άξονες σχεδιασμού. Επιπροσθέτως, ουσιαστική επιλογή είναι η μηδενική αξιοποίηση πυρηνικής ενέργειας, καθώς και η κατά το δυνατό περιορισμένη χρήση της τεχνολογίας



δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCS), λόγω τεχνικοοικονομικών αβεβαιοτήτων που συνδέονται με αυτή την τεχνολογία (ΥΠΕΚΑ, 2012).

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι μετά το 2012, σύμφωνα με την Οδηγία 2009/29/EK, η ηλεκτροπαραγωγή από συμβατικά καύσιμα θα επιβαρύνεται με το κόστος αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών που εκτιμάται ότι θα κυμαίνεται στο ύψος των 20€/MWh, για το ελληνικό σύστημα (ΥΠΕΚΑ, 2010).

Απ' την άλλη πλευρά τα ορυκτά καύσιμα αποτελούν σημαντικό στοιχείο της σύνθεσης των ενεργειακών πηγών στην Ελλάδα, καθώς και σε πολλές άλλες οικονομίες. Έχουν ιδιαίτερη σημασία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και περίπου το 78% της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα, προέρχεται σήμερα από ορυκτά καύσιμα (κυρίως λιγνίτη, φυσικό αέριο και υγρά καύσιμα), (National Inventory Report, 2012).

Όμως, το σύνολο της χρήσης ορυκτών καυσίμων συνεπάγεται εκπομπές CO<sub>2</sub>, που αποτελούν σήμερα την κύρια αιτία αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη, όπως αναλυτικά έχει παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 1. Αν τα ορυκτά καύσιμα συνεχίσουν τον πολύτιμο ρόλο τους στη σύνθεση των ενεργειακών πηγών, θα πρέπει να βρεθούν λύσεις για τον περιορισμό των επιπτώσεων της χρήσης τους σε επίπεδα συμβατά με αειφόρους στόχους για το κλίμα.

Ο λιγνίτης ιδιαίτερα, έχει μεγάλη συμβολή στην ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού της χώρας και εκτιμούμε ότι θα συνεχίσει και στο μέλλον λόγω του ότι μέχρι σήμερα αποτελεί τη μοναδική σχεδόν εγχώρια πηγή ενέργειας. Έτσι, θα πρέπει να προταθούν και κάποιες εναλλακτικές μέθοδοι για την ανάπτυξη της οικονομίας με χαμηλές εκπομπές άνθρακα.

Η διαδικασία της Δέσμευσης και Αποθήκευσης του Άνθρακα (CCS) θεωρείται από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογικές επιλογές για τον περιορισμό των εκπομπών CO<sub>2</sub> από τον τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και από άλλες βιομηχανίες εντάσεως άνθρακα (Serpa *et al.*, 2011).

## **6.2 Εκπομπές Αερίων του Θερμοκηπίου**

Με βάση τα στοιχεία από την τελευταία Εθνική Απογραφή Εκπομπών αερίων του Θερμοκηπίου (2012), οι εκπομπές των GHG (Greenhouse Gases) για το έτος βάσης (1990 για CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> και N<sub>2</sub>O - 1995 για F-αέρια) έχουν υπολογιστεί σε 107,23Mt CO<sub>2</sub> eq. Το 2010, οι εκπομπές GHG ανήλθαν σε 118,29Mt CO<sub>2</sub> eq, παρουσιάζοντας αύξηση 10,27% σε σύγκριση με τις εκπομπές του έτους βάσης (βλ. πίνακα 6.2.1).

Αναλυτικότερα με βάση τα στοιχεία του 2010:

- Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αντιπροσωπεύουν το 82,40% των συνολικών εκπομπών GHG και αυξήθηκαν κατά περίπου 17,01% από το 1990.
- Οι εκπομπές μεθανίου αντιπροσωπεύουν το 8,28% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και μειώθηκαν κατά 5,1% από το 1990.
- Οι εκπομπές του υποξειδίου του αζώτου αντιπροσωπεύουν το 6,22% των συνολικών εκπομπών GHG και μειώθηκαν κατά 28,44% από 1990.
- Τέλος, εκπομπές των F-gases αντιπροσωπεύουν το 3,1% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και αυξήθηκαν κατά 9,02% από το 1995 (έτος βάσης για το F-αέρια), (National Inventory Report, 2012).

Πίνακας 6.2.1: Εκπομπές GHG στην Ελλάδα (σε kt CO<sub>2</sub> eq) για την περίοδο 1990-2010

Πηγή: National Inventory Report, 2012

Έτος	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
CO <sub>2</sub>	83.301,00	83.016,87	84.718,81	84.064,68	86.339,80	86.800,09	88.917,19	93.763,23	98.671,77	98.068,26	103.210,17
CH <sub>4</sub>	10.321,96	10.276,63	10.387,23	10.369,93	10.554,04	10.580,86	10.810,16	10.716,54	10.950,65	10.865,81	10.817,83
N <sub>2</sub> O	10.281,00	9.978,05	9.825,67	8.952,02	8.767,50	9.033,48	9.262,34	9.042,57	8.986,12	8.898,09	8.571,72
HFC	935,06	1.106,82	908,39	1.609,35	2.150,52	3.304,78	3.844,18	4.138,19	4.638,51	5.453,41	4.345,18
PFC	163,37	164,17	161,21	96,98	60,37	53,97	46,14	107,67	133,04	90,32	105,09
SF <sub>6</sub>	3,07	3,16	3,26	3,35	3,45	3,59	3,68	3,73	3,78	3,87	3,99
<b>Σύνολο</b>	<b>105.005,46</b>	<b>104.545,70</b>	<b>106.004,57</b>	<b>105.096,30</b>	<b>107.875,68</b>	<b>109.776,76</b>	<b>112.883,69</b>	<b>117.771,93</b>	<b>123.383,87</b>	<b>123.379,76</b>	<b>127.053,98</b>
Έτος	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	
CO <sub>2</sub>	105.569,73	105.216,19	109.351,32	109.635,71	113.407,80	111.928,39	114.442,27	110.707,29	104.472,44	97.468,85	
CH <sub>4</sub>	10.028,24	10.047,00	10.073,90	10.113,24	10.148,37	10.189,71	10.032,42	9.988,42	9.731,05	9.794,61	
N <sub>2</sub> O	8.395,15	8.313,59	8.236,60	8.244,17	7.942,56	7.728,75	7.911,16	7.514,51	7.058,04	7.357,59	
HFC	3.964,27	4.130,47	3.930,35	4.014,57	4.086,28	2.229,07	2.574,46	2.956,54	3.356,11	3.557,92	
PFC	71,16	69,14	72,47	68,99	69,89	66,35	76,22	89,12	69,87	101,61	
SF <sub>6</sub>	4,06	4,25	4,25	4,47	6,45	8,37	9,92	7,53	5,26	6,14	
<b>Σύνολο</b>	<b>128.032,61</b>	<b>127.780,65</b>	<b>131.668,89</b>	<b>132.081,14</b>	<b>135.661,35</b>	<b>132.150,62</b>	<b>135.046,45</b>	<b>131.263,40</b>	<b>124.692,77</b>	<b>118.286,73</b>	

Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά τομέα και για την περίοδο 1990-2010 παρουσιάζονται στον πίνακα 6.2.2. Στον πίνακα 6.2.3 που ακολουθεί, αποτυπώνονται οι μεταβολές στις εκπομπές των GHG ανά τομέα λαμβάνοντας τις εκπομπές του έτους βάσης ίσες με 100.

Πίνακας 6.2.2: Εκπομπές GHG στην Ελλάδα ανά τομέα (σε kt CO<sub>2</sub> eq) για την περίοδο 1990-2010

Πηγή: National Inventory Report, 2012

Έτος	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Ενέργεια	77.539	77.367	79.105	78.750	81.084	81.045	83.263	87.960	92.786	92.284	97.167
Βιομηχανία	10.101	10.002	9.877	10.163	10.650	12.307	12.967	13.379	13.986	14.707	13.847
Διαλύτες	308	316	314	313	307	300	298	300	300	309	307
Γεωργία	11.483	11.323	11.087	10.220	10.035	10.337	10.481	10.335	10.347	10.194	9.956
Απόβλητα	5.574	5.539	5.622	5.650	5.798	5.788	5.875	5.797	5.965	5.886	5.777
<b>Σύνολο</b>	<b>105.005</b>	<b>104.546</b>	<b>106.005</b>	<b>105.096</b>	<b>107.876</b>	<b>109.777</b>	<b>112.884</b>	<b>117.772</b>	<b>123.384</b>	<b>123.380</b>	<b>127.054</b>
Έτος	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	
Ενέργεια	99.604	99.419	103.379	103.653	106.843	105.592	108.196	104.916	100.491	93.213	
Βιομηχανία	13.329	13.380	13.300	13.374	13.999	11.755	12.015	11.887	10.263	10.542	
Διαλύτες	304	305	306	307	309	312	313	314	316	316	
Γεωργία	9.860	9.829	9.765	9.848	9.555	9.389	9.603	9.223	8.939	9.282	
Απόβλητα	4.936	4.848	4.920	4.900	4.955	5.103	4.919	4.923	4.684	4.934	
<b>Σύνολο</b>	<b>128.033</b>	<b>127.781</b>	<b>131.669</b>	<b>132.081</b>	<b>135.661</b>	<b>132.151</b>	<b>135.046</b>	<b>131.263</b>	<b>124.693</b>	<b>118.287</b>	

Οι εκπομπές από τον τομέα της ενέργειας το 2010 (βλ. σχήμα 6.2.1) αντιπροσωπεύουν το 78,80% των συνολικών εκπομπών GHG και αυξήθηκαν κατά περίπου 20,21% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990. Η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, λόγω της οικονομικής ανάπτυξης της περιόδου 1990-2008, η σημαντική ανάπτυξη του τομέα των υπηρεσιών, η εισαγωγή του φυσικού αερίου στο ελληνικό ενεργειακό σύστημα, αλλά και η οικονομική ύφεση που άρχισε το 2009, αποτελούν τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την εξέλιξη των εκπομπών από τον τομέα της ενέργειας.

Πίνακας 6.2.3: Εκπομπές GHG στην Ελλάδα ανά τομέα (έτος βάσης=100) για την περίοδο 1990-2010

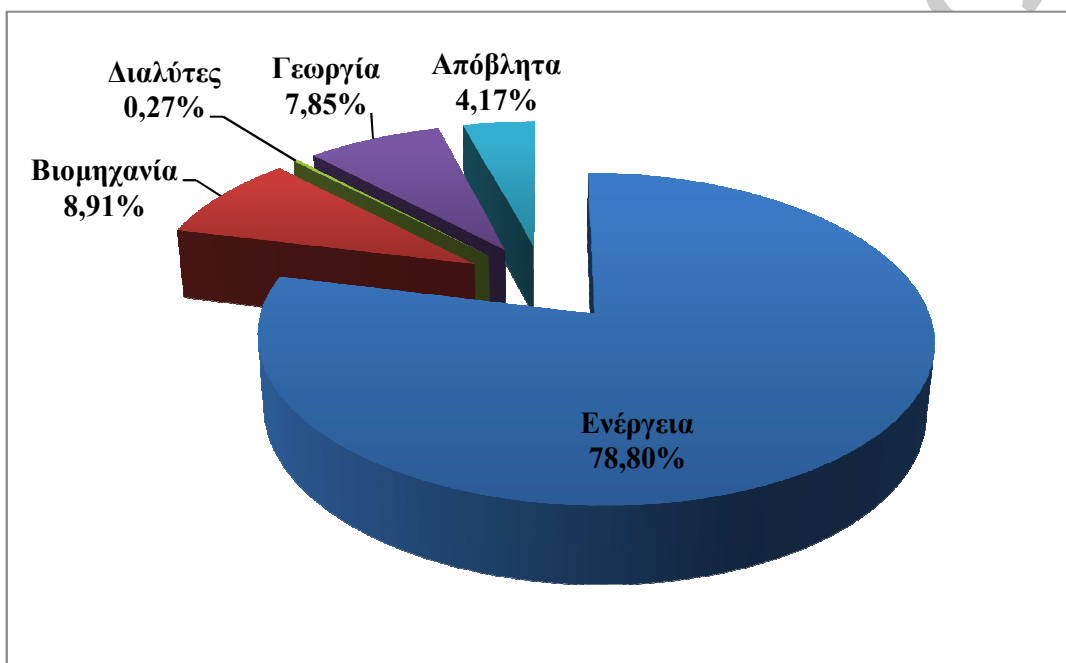
Πηγή: National Inventory Report, 2012

Έτος	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Ενέργεια	100	99,78	102,02	101,56	104,57	104,52	107,38	113,44	119,66	119,02	125,31
Βιομηχανία	100	99,02	97,78	100,61	105,44	121,84	128,37	132,45	138,46	145,6	137,09
Διαλύτες	100	102,33	101,95	101,49	99,69	97,24	96,72	97,36	97,42	100,13	99,44
Γεωργία	100	98,6	96,55	89	87,39	90,02	91,27	90	90,11	88,77	86,7
Απόβλητα	100	99,36	100,86	101,36	104,02	103,84	105,4	104	107	105,59	103,63
<b>Σύνολο</b>	<b>100</b>	<b>99,56</b>	<b>100,95</b>	<b>100,09</b>	<b>102,73</b>	<b>104,54</b>	<b>107,5</b>	<b>112,16</b>	<b>117,5</b>	<b>117,5</b>	<b>121</b>
Έτος	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	
Ενέργεια	128,46	128,22	133,33	133,68	137,79	136,18	139,54	135,31	129,6	120,21	
Βιομηχανία	131,95	132,46	131,67	132,4	138,59	116,37	118,95	117,69	101,6	104,37	
Διαλύτες	98,68	98,96	99,22	99,48	100,31	101,16	101,64	101,88	102,36	102,54	
Γεωργία	85,86	85,59	85,03	85,76	83,21	81,76	83,63	80,32	77,85	80,83	
Απόβλητα	88,56	86,97	88,25	87,9	88,89	91,54	88,25	88,32	84,02	88,5	
<b>Σύνολο</b>	<b>121,93</b>	<b>121,69</b>	<b>125,39</b>	<b>125,79</b>	<b>129,19</b>	<b>125,85</b>	<b>128,61</b>	<b>125,01</b>	<b>118,75</b>	<b>112,65</b>	

Η πλειοψηφία των εκπομπών των θερμοκηπιακών αερίων (56,0%) το 2010, προέρχονταν από τον τομέα παραγωγής ενέργειας, ενώ η συμβολή των μεταφορών, της μεταποίησης και των κατασκευών, εκτιμήθηκε σε 24,7%, 7,3% και 10,6% αντίστοιχα. Το υπόλοιπο 1,5% των εκπομπών από τον τομέα της ενέργειας, αφορούσε εκπομπές από καύσιμα.

Οι εκπομπές από τη βιομηχανία για το 2010 αντιπροσωπεύουν το 8,91% των συνολικών εκπομπών και αυξήθηκαν κατά περίπου 4,37% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990.

Η σημαντική μείωση στον τομέα, η οποία παρατηρείται το 2009 -κυρίως απεικονίζεται στις εκπομπές CO<sub>2</sub>- αποδίδεται στην οικονομική ύφεση, ενώ και το 2010 οι εκπομπές παραμένουν περίπου στα ίδια χαμηλά επίπεδα (National Inventory Report, 2012).



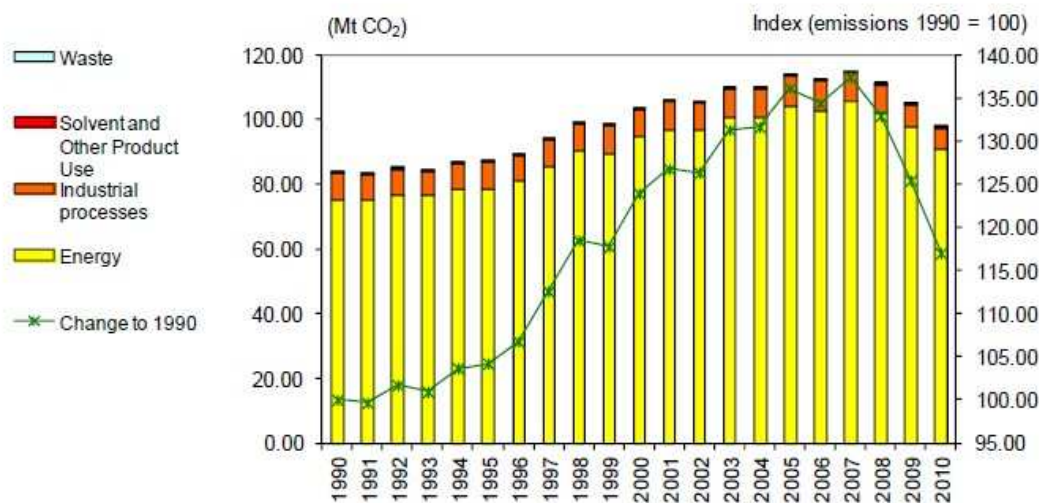
Πηγή: National Inventory Report, 2012

Σχήμα 6.2.1: Σχετική συμβολή των τομέων δραστηριότητας στο σύνολο των εκπομπών GHG το 2010

### 6.2.1 Εκπομπές CO<sub>2</sub>

Οι συνολικές εκπομπές CO<sub>2</sub> αυξήθηκαν από 83,30Mt το 1990 σε 97,47Mt το 2010. Η αύξηση κατά 17,01% που σημειώνεται από το 1990 έως το 2010 αποδίδεται κυρίως στην αύξηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και στην αυξημένη κατανάλωση ενέργειας στον οικιακό τομέα, αλλά και στον τομέα των μεταφορών. Η μείωση για το 2010 αποδίδεται κυρίως στην οικονομική κρίση, ενώ άλλοι λόγοι είναι η αύξηση του μεριδίου του φυσικού αερίου και των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα.

Οι εκπομπές CO<sub>2</sub> από τον τομέα της ενέργειας αυξήθηκαν, από 75,24Mt το 1990 σε 90,86Mt το 2010, παρουσιάζοντας συνολική αύξηση της τάξης του 20,75%. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από το βιομηχανικό τομέα το 2010 εμφανίζονται μειωμένες κατά 18,28% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990. Οι εκπομπές από τον τομέα των διαλυτών και άλλων προϊόντων μειώθηκαν κατά 4,76%, ενώ οι εκπομπές από τον τομέα των απόβλητων εμφανίζουν μια συνεχή αύξηση από το 1990 (Σχήμα 6.2.1.1), (National Inventory Report, 2012).



Πηγή: National Inventory Report, 2012

Σχήμα 6.2.1.1: Εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά τομέα (σε Mt) για τα έτη 1990 - 2010

### 6.2.2 Εκπομπές από την Παραγωγή Ενέργειας

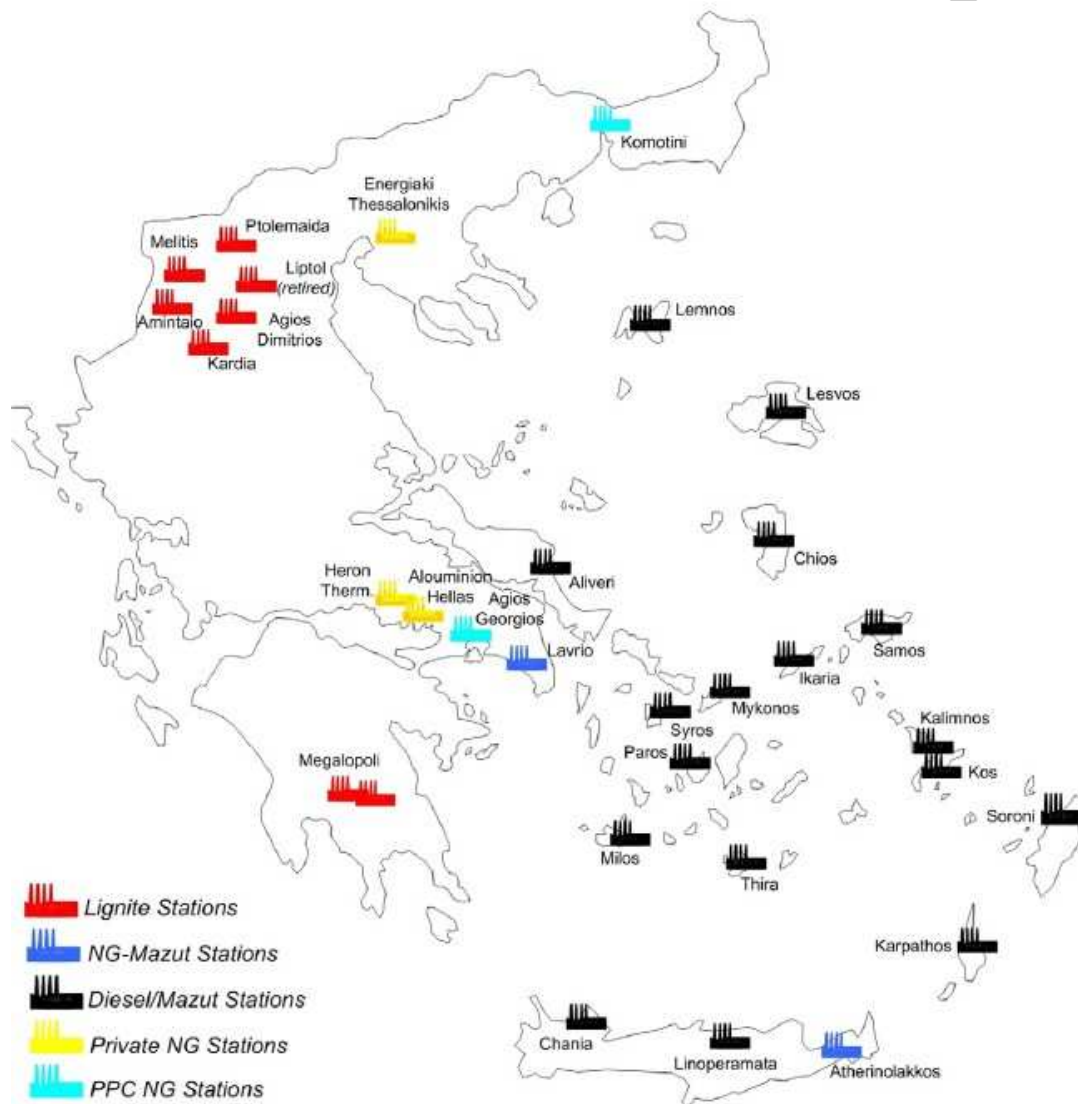
Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα, μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικούς τομείς. Ο ένας τομέας εξυπηρετεί την ηπειρωτική χώρα και ο δεύτερος αποτελείται από υποσυστήματα που εξυπηρετούν τα νησιά. Όσον αφορά το ηπειρωτικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (διασυνδεδεμένο σύστημα), η παραγωγή βασίζεται κυρίως στα εγχώρια αποθέματα λιγνίτη, ενώ στα νησιά υπάρχουν πολλά απομονωμένα ηλεκτρικά δίκτυα (35 αυτόνομοι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας), οι οποίοι χρησιμοποιούν κυρίως εισαγόμενο πετρέλαιο (Kaldellis *et al.*, 2011).

Η Ελλάδα είναι ο πέμπτος μεγαλύτερος παραγωγός λιγνίτη παγκοσμίως και ο δεύτερος μεταξύ των χωρών στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Koukouzas *et al.*, 2009).

Η εξάρτηση της χώρας από τα ορυκτά καύσιμα αποτυπώνεται, από εγκατεστημένο φορτίο 6,1GW ατμοστρόβιλων που καταναλώνουν λιγνίτη και μαζούτ, από 2,3GW σταθμών συνδυασμένου κύκλου που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο και από 1,3GW αεριοστρόβιλων και μηχανών εσωτερικής καύσης, με καύσιμο πετρέλαιο, κυρίως για την εξυπηρέτηση των μη διασυνδεδεμένων νησιών του Αιγαίου (Kaldellis *et al.*, 2011).

Η Ελλάδα έχει οκτώ μεγάλα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής με καύσιμο λιγνίτη, τα οποία εντοπίζονται κυρίως στην Βορειοδυτική Μακεδονία και στην Μεγαλόπολη στην κεντρική Πελοπόννησο, (βλ. σχήμα 6.2.2.1). Ο περισσότερες λιγνιτικές μονάδες παραγωγής ενέργειας είναι παλιές και πολλές από αυτές είναι πάνω από 30 ετών. Όλες οι λιγνιτικές μονάδες

λειτουργούν σήμερα από την Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ), η οποία διατηρεί και το μονοπώλιο στην εξόρυξη του λιγνίτη. Αυτή η de facto μονοπωλιακή πολιτική στην εξόρυξη λιγνίτη αναθεωρήθηκε με το διαγωνισμό που προκηρύχθηκε για την εκμίσθωση των δικαιωμάτων έρευνας και εκμετάλλευσης του δημόσιου λιγνιτωρυχείου Βεύης του Νομού Φλώρινας (Corless *et al.*, 2010).



Πηγή: Kaldellis *et al.*, 2011

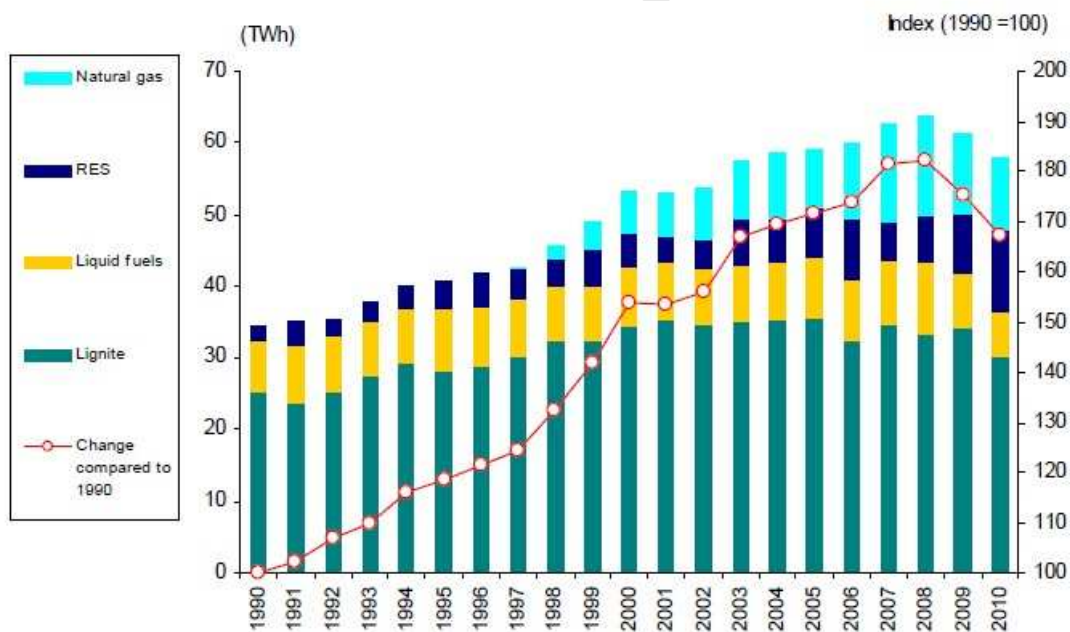
Σχήμα 6.2.2.1: Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίοι εντάσσονται στο Εθνικό Σχέδιο Κατανομής 2008-2012 (ΕΣΚΔΕ-2)

Επί του παρόντος παραμένει αβέβαιο εάν στα πλαίσια των ενεργειών για την απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας, κάποιες από τις εν λειτουργία ή τις νέες σχεδιαζόμενες λιγνιτικές μονάδες θα μισθωθούν ή θα πωληθούν σε ιδιώτες επενδυτές. Από τις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας, στο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής έχουν ενταχθεί μονάδες φυσικού

αερίου με αποτέλεσμα μικρότερες εκπομπές. Η πλειοψηφία αυτών των μονάδων βρίσκονται στην κεντρική Ελλάδα και ανήκουν κυρίως σε ιδιωτικούς φορείς (Corless *et al.*, 2010).

Ο Όμιλος Μυτιληναίου διαχειρίζεται τρεις μονάδες (Αλουμίνιο, Protergia, Korinthos Power), η κοινοπραξία του Όμιλου ΓΕΚ-ΤΕΡΝΑ με την GDF-Suez διαχειρίζεται τη μονάδα Ήρων και η κοινοπραξία των Ελληνικών Πετρελαίων με την Edison διαχειρίζεται δύο μονάδες. Η ΔΕΗ διαχειρίζεται επίσης τρία εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με φυσικό αέριο, (Κομοτηνή, Λαύριο 3, 4, 5 και ΑΗΣΑΓ 8, 9).

Ο τομέας παραγωγής ενέργειας ευθύνεται για την εκπομπή των σημαντικότερων ποσοτήτων CO<sub>2</sub>. Για την περίοδο 1990-2008 η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα αυξανόταν συνεχώς με μέσο ετήσιο ρυθμό 3,4%, ενώ για τα έτη 2009 και 2010, μειώθηκε με μέσο ετήσιο ρυθμό 4%. Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.2.2.2 η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το 2010 (58,6 TWh) ήταν περίπου 67% υψηλότερη σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990.



Πηγή: National Inventory Report, 2012

Σχήμα 6.2.2.2: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (σε TWh) για την περίοδο 1990-2010

Τα ορυκτά καύσιμα συμμετέχουν με περίπου 78% στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το 2010. Συγκεκριμένα, το 52% της ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται από στερεά καύσιμα (κυρίως λιγνίτη), ενώ το μερίδιο των υγρών καυσίμων (πετρέλαιο, μαζούτ και υγραέριο) και του φυσικού αερίου είναι 10% και 17% αντίστοιχα. Η υπόλοιπη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή περίπου 20%, προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως υδροηλεκτρικά, αιολικά και βιοαέριο.

Οι εκπομπές GHG από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκαν το 2010 κατά 19% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990 και με μέσο ετήσιο ρυθμό 1% για την περίοδο 1990-2010.

Η αύξηση οφείλεται στην υψηλή ζήτηση στην Ελλάδα, καθώς και στα διαρθρωτικά χαρακτηριστικά του ελληνικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Πίνακας 6.2.2.1: Εκπομπές CO<sub>2</sub> (σε Mt) από την παραγωγή ηλεκτρισμού για την περίοδο 1990-2010

Πηγή: National Inventory Report, 2012

Έτος	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Υγρά Καύσιμα	5,37	5,8	5,71	5,85	5,73	6,19	6,1	5,91	5,74	5,95	6,37
Στερεά Καύσιμα	35,21	33,59	36,04	35,83	37,74	36,02	35,05	38,51	40,47	39,73	42,21
Αέρια Καύσιμα	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	0,78	1,96	2,87
<b>Σύνολο</b>	<b>40,58</b>	<b>39,39</b>	<b>41,75</b>	<b>41,68</b>	<b>43,47</b>	<b>42,21</b>	<b>41,15</b>	<b>44,52</b>	<b>46,99</b>	<b>47,64</b>	<b>51,45</b>
Έτος	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	
Υγρά Καύσιμα	5,92	5,82	6,38	5,7	6,27	6,42	6,57	6,95	5,33	3,99	
Στερεά Καύσιμα	43,17	42,4	42,89	44,43	44,4	40,73	42,57	41,21	41,18	39,68	
Αέρια Καύσιμα	2,84	3,03	3,37	3,66	3,55	4,24	5,66	5,72	4,17	4,64	
<b>Σύνολο</b>	<b>51,93</b>	<b>51,25</b>	<b>52,64</b>	<b>53,79</b>	<b>54,22</b>	<b>51,39</b>	<b>54,8</b>	<b>53,88</b>	<b>50,68</b>	<b>48,31</b>	

Οι εκπομπές CO<sub>2</sub> το 2010 αντιπροσωπεύουν το 99,65% των συνολικών εκπομπών από την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, ενώ οι εκπομπές από την κατανάλωση στερεών καυσίμων αντιπροσωπεύουν το 82,2% των συνολικών εκπομπών για το ίδιο έτος. Ωστόσο, λόγω της διεύδυσης του φυσικού αερίου και των ΑΠΕ, οι εκπομπές ανά μονάδα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας έχουν πτωτική τάση (National Inventory Report, 2012).

Στον πίνακα 6.2.2.2 παρουσιάζονται οι σημαντικότερες πηγές CO<sub>2</sub> από σταθμούς παραγωγής ενέργειας, καθώς και το καύσιμο που χρησιμοποιούν.

Πίνακας 6.2.2.2: Εκπομπές CO<sub>2</sub> (σε Mt) ανά μονάδα παραγωγής ηλεκτρισμού για το 2010

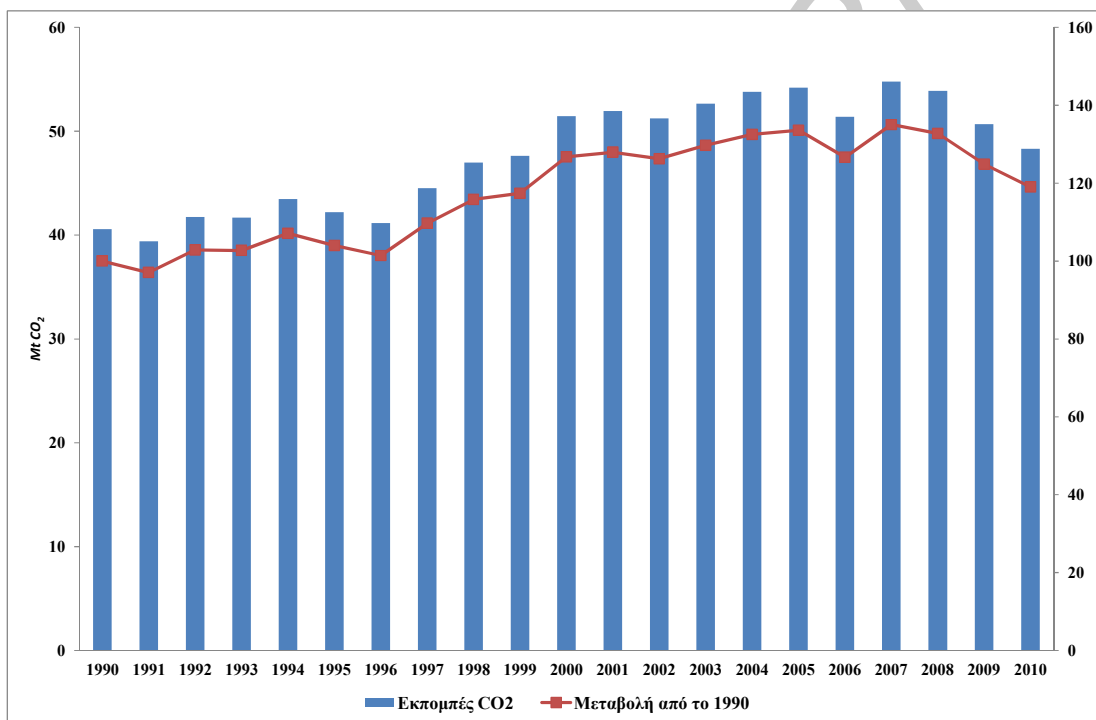
Πηγή: E-PRTR, 2010

ΜΟΝΑΔΕΣ	ΚΑΥΣΙΜΟ	ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO <sub>2</sub> Mt/έτος
ΔΕΗ- ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	14,3
ΔΕΗ- ΚΑΡΔΙΑΣ	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	8,4
ΔΕΗ- ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	4,61
ΔΕΗ- ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑΣ	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	4,20
ΔΕΗ- ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ Α΄	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	3,42
ΔΕΗ- ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ Β΄	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	2,69
ΔΕΗ- ΜΕΛΙΤΗΣ	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	2,20
ΔΕΗ- ΚΕΡΑΤΕΑΣ-ΛΑΥΡΙΟΥ	ΦΥΣ.ΑΕΡ.	1,62
ΔΕΗ-ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΩΝ	ΜΑΖΟΥΤ	0,80
ΔΕΗ- ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΥ	ΜΑΖΟΥΤ	0,75
ELPEDISON-ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ	ΦΥΣ.ΑΕΡ.	0,68
ΔΕΗ-ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΥ	ΦΥΣ.ΑΕΡ.	0,63
ΔΕΗ-ΡΟΔΟΥ	NTIZEΛ	0,55
ΔΕΗ-ΚΟΜΟΤΗΝΗΣ	ΦΥΣ.ΑΕΡ.	0,53
ΔΕΗ-ΧΑΝΙΩΝ	NTIZEΛ	0,44
ΔΕΗ-ΛΕΣΒΟΥ	NTIZEΛ	0,18
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>		<b>46,00</b>



Στο σχήμα 6.2.2.3 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι εκπομπές CO<sub>2</sub> από την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας καθώς και η μεταβολή τους από το έτος βάσης 1990.

Το 2007 αποτελεί το έτος με τις περισσότερες εκπομπές CO<sub>2</sub>, με την αύξηση να φτάνει περίπου στο 35% σε σχέση με το 1990. Το 2010, συνέπεια κυρίως της οικονομικής κρίσης, οι εκπομπές CO<sub>2</sub> εμφανίζονται μειωμένες με την αύξησή τους από το 1990 να ανέρχεται σε 19% περίπου (National Inventory Report, 2012).



Πηγή: National Inventory Report, 2012

Σχήμα 6.2.2.3: Εκπομπές CO<sub>2</sub> (σε Mt) από την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας για την περίοδο 1990-2010 (Δείκτης: Εκπομπές 1990=100)

### 6.2.3 Εκπομπές από την Βιομηχανία

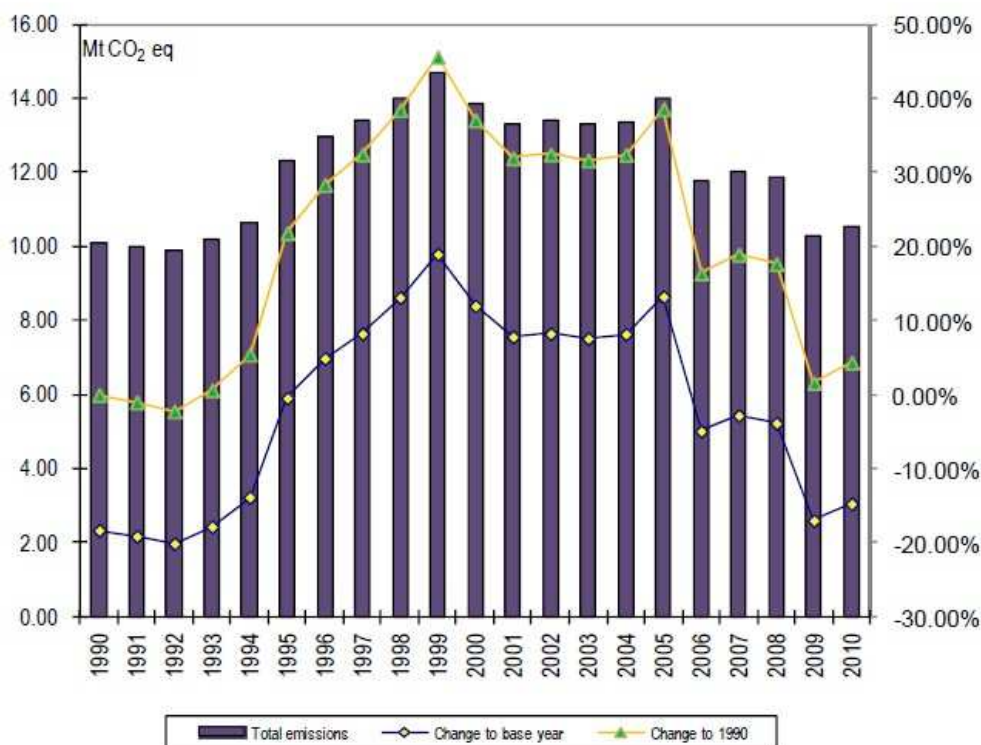
Η Ελλάδα δεν έχει ιδιαίτερα ανεπτυγμένη βαριά βιομηχανία, συνεπώς η ποσότητα του CO<sub>2</sub> που εκπέμπεται, είναι χαμηλότερη σε σχέση με αυτή του ενεργειακού τομέα. Οι βιομηχανίες με τις σημαντικότερες εκπομπές CO<sub>2</sub> είναι οι τσιμεντοβιομηχανίες, τα διυλιστήρια πετρελαίου, μία βιομηχανία παραγωγής αλουμινίου και οι βιομηχανίες παραγωγής σιδηρομεταλλευμάτων. Σχεδόν όλες οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις βρίσκονται κοντά σε μεγάλα αστικά κέντρα και κυρίως κοντά στην Αθήνα και στη Θεσσαλονίκη.

Οι τσιμεντοβιομηχανίες αποτελούν ζωτικό τομέα της ελληνικής οικονομίας, δεδομένου της σημαντικής εγχώριας κατανάλωσης, αλλά και των εξαγωγών τσιμέντου σε ξένες αγορές.

Στην Ελλάδα λειτουργούν τέσσερα διυλιστήρια πετρελαίου. Τα τρία μεγαλύτερα ανήκουν στην εταιρεία Ελληνικά Πετρέλαια και βρίσκονται κοντά στην Αθήνα και Θεσσαλονίκη. Τα διυλιστήρια αυτά αντιπροσωπεύουν το 76% της συνολικής εγχώριας διύλισης του πετρελαίου ενώ η ποσότητα που διυλίζουν προορίζεται κυρίως για εγχώρια κατανάλωση. Η τέταρτη μονάδα διύλισης πετρελαίου που εξάγει και στο εξωτερικό ανήκει στην εταιρεία Motor Oil και το διυλιστήριό της βρίσκεται νότια της Αθήνας στην Κόρινθο.

Οι δύο μεγαλύτερες βιομηχανίες αλουμινίου και χάλυβα βρίσκονται βόρεια της Αθήνας στην κεντρική Ελλάδα. Η μονάδα του αλουμινίου βρίσκεται στην περιοχή Άγιος Νικόλαος για την εκμετάλλευση του ντόπιου βωξίτη και την διαχειρίζεται η εταιρεία Αλουμίνιο Ελλάδος του Ομίλου Μυτιληναίου. Η μονάδα του χάλυβα βρίσκεται στη Λάρυμνα και την διαχειρίζεται η εταιρεία Larco S.A. (Corless *et al.*,2010).

Για το 2010, οι εκπομπές GHG από τον τομέα της βιομηχανίας αντιστοιχούν στο 9,12% των συνολικών εκπομπών και έχουν αυξηθεί κατά 4,37% σε σύγκριση με τις εκπομπές του 1990. Οι εκπομπές κατά την περίοδο 1990-2010 χαρακτηρίζονται από έντονες διακυμάνσεις, σημειώνοντας ελάχιστη τιμή 9,88Mt CO<sub>2</sub> eq το 2009 και μέγιστη τιμή 14,71Mt CO<sub>2</sub> eq το 1999. Στο σχήμα 6.2.3.1 παρουσιάζονται οι εκπομπές GHG από τον τομέα της βιομηχανίας καθώς και η μεταβολή τους από το 1990.



Πηγή: National Inventory Report, 2012

Σχήμα 6.2.3.1: Έκπομπές GHG (σε Mt CO<sub>2</sub> eq) από τη βιομηχανία για την περίοδο 1990-2010

Ο τομέας της βιομηχανίας ευθύνεται για εκπομπές, διοξειδίου του άνθρακα, υποξειδίου του αζώτου, μεθανίου και F-αερίων. Το διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί το σημαντικότερο GHG από τις βιομηχανικές διεργασίες, με τη συνεισφορά του να κυμαίνεται από 57,16% ως 79,45%. Συνολικά, οι εκπομπές CO<sub>2</sub> το 2010 μειώθηκαν κατά 18,28% σε σύγκριση με αυτές του 1990. Οι εκπομπές CO<sub>2</sub> που προέρχονται κυρίως από τα ορυκτά προϊόντα και την παραγωγή μετάλλων (National Inventory Report, 2012).

Στον παρακάτω πίνακα 6.2.3.1 παρουσιάζονται οι βιομηχανικές μονάδες με τις μεγαλύτερες εκπομπές CO<sub>2</sub> για το 2010.

Πίνακας 6.2.3.1: Εκπομπές CO<sub>2</sub> (σε Mt) ανά βιομηχανική μονάδα για το 2010  
Πηγή: E-PRTR, 2010

ΜΟΝΑΔΕΣ	ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ	ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO <sub>2</sub> Mt/έτος
ΜΟΤΟΡ ΟΙΛ	ΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΟ	1,88
ΕΛ.ΠΕ.-ΑΣΠΡΟΠΥΡΓΟΣ	ΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΟ	1,56
ΤΙΤΑΝ-ΚΑΜΑΡΙ	ΤΣΙΜΕΝΤΟ	1,55
ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ-ΒΟΛΟΣ	ΤΣΙΜΕΝΤΟ	1,44
† ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	1,39
ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ-ΜΙΛΑΚΙ	ΤΣΙΜΕΝΤΟ	1,20
ΤΙΤΑΝ-ΔΡΕΠΑΝΟ	ΤΣΙΜΕΝΤΟ	0,98
ΤΙΤΑΝ-ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ	ΤΣΙΜΕΝΤΟ	0,79
ΛΑΡΚΟ	ΧΑΛΥΒΑΣ	0,64
ΕΛ.ΠΕ.-ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ	ΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΟ	0,42
ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ-ΧΑΛΚΙΔΑ	ΤΣΙΜΕΝΤΟ	0,36
ΒΦΛ-ΚΑΒΑΛΑ	ΛΙΠΑΣΜΑΤΑ	0,27
ΕΛ.ΠΕ.-ΕΛΕΥΣΙΝΑ	ΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΟ	0,16
ΤΙΤΑΝ-ΕΛΕΥΣΙΝΑ	ΤΣΙΜΕΝΤΟ	0,10
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>		<b>12,75</b>

### 6.3 Χώροι Αποθήκευσης

Το Ι.Γ.Μ.Ε. σε συνεργασία με φορείς από άλλες χώρες (Δανία, Γερμανία, Γαλλία, Ολλανδία, Βέλγιο, Νορβηγία και Ηνωμένο Βασίλειο), συμμετείχε στο πρόγραμμα GESTCO (Geological storage of CO<sub>2</sub> from fossil fuel combustion). Σκοπός του ευρωπαϊκού αυτού προγράμματος, ήταν να αξιολογηθεί εάν η γεωλογική αποθήκευση του CO<sub>2</sub> μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη μέθοδο για εφαρμογές ευρείας κλίμακας. Διερευνήθηκε η δυνατότητα τεσσάρων κύριων τύπων αποθήκευσης σε επιλεγμένες περιοχές.

Οι κύριοι τύποι αποθήκευσης είναι:

1. Σε χερσαία/παράκτια αλατούχα υδροφόρα στρώματα με ή χωρίς παράπλευρο σφράγισμα.
2. Σε γεωθερμικούς ταμιευτήρες χαμηλής ενθαλπίας.
3. Σε κοιτάσματα άνθρακα μεγάλου βάθους που περιέχουν μεθάνιο και σε εγκαταλειμμένα ορυχεία άνθρακα ή άλατος.
4. Σε εξαντλημένους ή σχεδόν εξαντλημένους γεωλογικούς σχηματισμούς υδρογονανθράκων (GESTCO, 2004).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του προγράμματος GESTCO και τα αποτελέσματα μιας προκαταρκτικής αξιολόγησης για τις δυνατότητες γεωλογικής αποθήκευσης CO<sub>2</sub> στην Ελλάδα (Koukouzas *et al.*, 2009) αναγνωρίστηκαν οι χώροι που πληρούν τα ακόλουθα κριτήρια:

- Επαρκής χωρητικότητα και δυνατότητα έγχυσης.
- Μια ικανοποιητική σφράγιση των υπερκείμενων πετρωμάτων ή μία περιοριστική μονάδα.
- Αρκετά σταθερό γεωλογικό περιβάλλον, ώστε να μην τίθενται σε κίνδυνο η ακεραιότητα του χώρου αποθήκευσης.

Οι χώροι αυτοί βρίσκονται στα βαθιά αλατούχα υφάλμυρα πετρώματα, κορεσμένα σε υγρασία, της Μεσοελληνικής αύλακας (ΜΗΤ) και σε ιζηματογενείς Μειοκαινικούς σχηματισμούς στη λεκάνη της Θεσσαλονίκης και στη λεκάνη του Πρίνου (Koukouzas *et al.*, 2011).

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η συνοχή με τη μελέτη που εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος GESTCO, ως δεδομένο για όλους του αποθηκευτικούς χώρους έχει ληφθεί σταθερή πυκνότητα εκπομπών CO<sub>2</sub> ίση 750kg/m<sup>3</sup>, παρά το γεγονός ότι αυτή η τιμή πυκνότητας είναι πιθανά υψηλή με βάση τις γεωθερμικές συνθήκες στην Ελλάδα (Koukouzas *et al.*, 2009).

### **Λεκάνη Πρίνου**

Η Μειοκαινική ιζηματογενής λεκάνη του Πρίνου βρίσκεται στο Βόρειο Αιγαίο και καλύπτει μια έκταση 800km<sup>2</sup>. Το πάχος των ιζημάτων υπερβαίνει τα 6Km. Η λεκάνη του Πρίνου είναι ένα ελεγχόμενο ρήγμα, με ΒΑ-ΝΔ διεύθυνση. Οι ταμιευτήρες στη λεκάνη αποτελούνται από ψαμμίτες και ορισμένους ιλυόλιθους με συνολικό πάχος περίπου 260m. Η συνοχή παρέχεται από το αλάτι και από εξατμίζουσες αποθέσεις, καθώς και από υπερκείμενα ενοποιημένα κλαστικά ιζήματα, τα οποία καλύπτουν το σύνολο της λεκάνης και έχουν πάχος μέχρι

2.300m. Το βάθος από την κορυφή του αλατούχου υδροφόρου ορίζοντα του Πρίνου είναι περίπου 2Km, διασφαλίζοντας της υπερκρίσιμη κατάσταση του CO<sub>2</sub> για μια τέτοια ζεστή λεκάνη. Το μέσο πάχος του ταμιευτήρα εκτιμάται σε 260m. Τα μεσοδιαστήματα της δεξαμενής έχουν κατά μέσο όρο διαπερατότητα της τάξης των 50mD και το πορώδες κυμαίνεται από 15% έως 20%, υποδηλώνοντας επαρκές δυναμικό έγχυσης. Η αποθηκευτική ικανότητα των υφάλμυρων πετρωμάτων στην υπεράκτια λεκάνη του Πρίνου έχει υπολογιστεί σε 1.350Mt CO<sub>2</sub>.

### **Λεκάνη Θεσσαλονίκης**

Η λεκάνη της Θεσσαλονίκης βρίσκεται στα δυτικά της πόλης της Θεσσαλονίκης και καλύπτει μία έκταση 4.200km<sup>2</sup> στην ξηρά και μια υπεράκτια έκταση 4.000km<sup>2</sup>. Η λεκάνη της Θεσσαλονίκης έχει διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ και αποτελεί μια πολύπλοκη τεκτονική τάφρο. Τα ιζήματα αποτελούνται κυρίως από κλαστικές μονάδες (κροκαλοπαγή, άμμο, άργιλο) και σε τοπικό επίπεδο από ασβεστολιθικά ιζήματα (ασβεστόλιθοι, μάρμαρα). Η βάση κάτω από τη λεκάνη περιέχει μεταμορφωμένα πετρώματα (υψηλού βαθμού), κυρίως από τη γεωτεκτονική ζώνη του Αξιού. Το πάχος των υφάλμυρων σχηματισμών των υδροφόρων οριζόντων ψαμμίτη της λεκάνης της Δυτικής Θεσσαλονίκης υπερβαίνει τα 500m, παρέχοντας τη δυνατότητα για αποθήκευση CO<sub>2</sub>. Τα υπερκείμενα ιζήματα περιλαμβάνουν κυρίως φλύσχη της εποχής του Ολιγόκαινου με πάχος γύρω στα 1.200m σχηματίζοντας ως κάλυψη έναν μεγάλο βράχο. Η αναλογία άμμου/πηλού στο σχηματισμό του υδροφόρου, κυμαίνεται μεταξύ 40% και 90% άμμου και επηρεάζεται έντονα από το σχηματισμό των υφάλμυρων δομών. Το βάθος από την κορυφή των υφάλμυρων σχηματισμών ποικίλλει, μεταξύ 900-2.400m (Δυτική Θεσσαλονίκη), βρίσκοντας το βέλτιστο βάθος που μεγιστοποιεί την ικανότητα αποθήκευσης CO<sub>2</sub>, στις κρύες λεκάνες. Η δυνατότητα έγχυσης ποικίλλει από πολύ φτωχή σε φτωχή, με πορώδες που κυμαίνεται από 5% έως 20% και με διαπερατότητα να κυμαίνεται από μερικά mD έως 120 mD. Η συνολική χωρητικότητα αποθήκευσης στο χερσαίο τμήμα της λεκάνης της Θεσσαλονίκης υπολογίζεται σε 605Mt CO<sub>2</sub>.

### **Η Μεσοελληνική αύλακα**

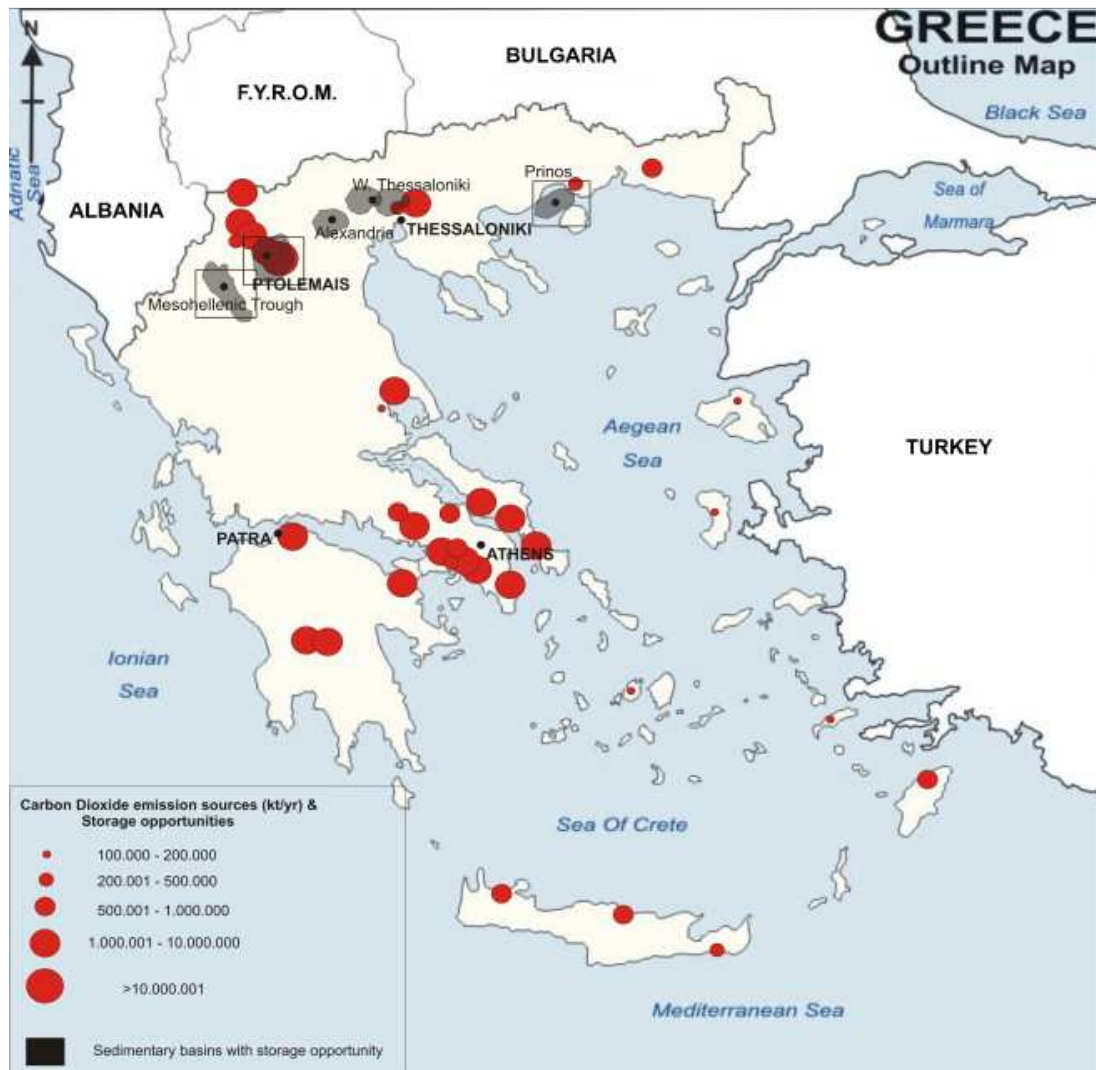
Η Μεσοελληνική αύλακα, η μεγαλύτερη και πιο σημαντική λεκάνη τύπου «molasse» των ελληνίδων, βρίσκεται στα δυτικά σύνορα της κεντρικής ελληνικής ζώνης. Έχει 40km πλάτος και 300km μήκος και εκτείνεται από την Αλβανία προς τη Θεσσαλία με ΒΒΔ-ΝΝΑ κατεύθυνση. Η Τριτογενής λεκάνη φιλοξενεί παχιές ακολουθίες συμπαγών υλικών και ψαμμιτών, η οποία φαίνεται να προσφέρει τον απαραίτητο χώρο και κάλυψη, ώστε να αποθηκευτούν σημαντικές ποσότητες CO<sub>2</sub>. Πιθανές θέσεις αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> υπάρχουν

στους υφάλμυρους αλατούχους σχηματισμούς του Επταχωρίου και του Πενταλόφου της Μεσοελληνικής αύλακας και συγκεκριμένα, ανάμεσα στο ανατολικό όριο της αύλακα και της υπερυψωμένης δομής της Θεοτόκου-Θεόπετρας. Σε αυτή την περιοχή, οι σχηματισμοί είναι στο κατάλληλο βάθος και δεν υπάρχει κανένας κίνδυνος πλευρικής διαφυγής του CO<sub>2</sub>, καθώς έρχεται σε επαφή με αδιαπέρατα πετρώματα (οφιόλιθους και σχιστόλιθους). Ο σχηματισμός Επταχώρι, με πάχος κατ' εκτίμηση 1.200m, αποτελείται από κροκαλοπαγή και ψαμμίτες, ενώ η κάλυψη παρέχεται από θαλάσσιους turbiditic σχιστόλιθους (πάχος περίπου 250m). Η βάση του σχηματισμού του Πενταλόφου, αποτελείται από συμπαγή πετρώματα, ακολουθούμενη από εναλλασσόμενα turbiditic πετρώματα ψαμμιτών και σχιστόλιθων. Το εκτιμώμενο πάχος είναι 2.500m. Το πορώδες των ψαμμιτών στους σχηματισμούς Επταχώρι και Πεντάλοφο κυμαίνεται μεταξύ 15% και 25% ενώ η μέση διαπερατότητα εκτιμάται ότι είναι χαμηλή, υποδεικνύοντας χαμηλό έως μέτριο δυναμικό έγχυσης. Το βάθος από την κορυφή των γεωλογικών δομών ποικίλλει, από 1 έως περισσότερο από 2km, το οποίο είναι επαρκές για να διατηρήσει το CO<sub>2</sub> σε υπερκρίσιμη κατάσταση. Η χωρητικότητα αποθήκευσης CO<sub>2</sub> στον σχηματισμό του Πενταλόφου εκτιμάται περίπου σε 216Mt CO<sub>2</sub> (Koukoulzas *et al.*, 2011). Στον πίνακα 6.3.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι σημαντικότερες θέσεις από πλευράς χωρητικότητας και χαρακτηριστικών, στις οποίες θα μπορούσε να αποθηκευτεί CO<sub>2</sub> στην Ελλάδα.

Πίνακας 6.3.1: Ιδιότητες και δυνατότητες αποθήκευσης CO<sub>2</sub> (σε Mt) σε γεωλογικούς σχηματισμούς  
 Πηγή: (Koukoulzas *et al.*, 2011).

Περιοχή	Θέση	Βάθος (m)	Πάχος (m)	Πορώδες (%)	Δυνατότητα Αποθήκευσης (Mt CO <sub>2</sub> )
Πρίνος	Υπεράκτια	2.400	260	Μ.Ο. 18	1.350
Δυτ. Θεσσαλονίκη	Υπεράκτια	900-2.400	100	Μ.Ο. 10	605
Μεσοελληνική Αύλακα (Πενταλόφος)	Χερσαία	1.000	Μεταβλητό	10	216

Εκτός των κριτηρίων που αναφέρθηκαν παραπάνω και θα πρέπει να πληρεί ένας γεωλογικός σχηματισμός ώστε να θεωρείται κατάλληλος για αποθήκευση CO<sub>2</sub>, πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του, αποτελεί η εγγύτητά του σε μεγάλες πηγές εκπομπής CO<sub>2</sub>. Στο σχήμα 6.3.1 αποτυπώνονται οι σημαντικότερες σταθερές πηγές εκπομπής CO<sub>2</sub> και οι πιθανοί χώροι γεωλογικής αποθήκευσής του.



Πηγή: Koukouzas et al., 2009

Σχήμα 6.3.1: Σταθερές πηγές εκπομπής CO<sub>2</sub> και οι πιθανοί χώροι γεωλογικής αποθήκευσης

Το 2008 ολοκληρώθηκε το ευρωπαϊκό πρόγραμμα GeoCapacity (Assessing European Capacity for Geological Storage of Carbon Dioxide) το οποίο ουσιαστικά αποτέλεσε μια ευρύτερη συνέχεια (συμμετείχαν 26 φορείς από 21 χώρες) και επικαιροποίηση του προγράμματος GESTCO (2004). Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις των προγραμμάτων, κατάλληλα επιλεγμένοι υδροφορείς στην Ελλάδα θα μπορούσαν να αποθηκεύσουν μέχρι 2,2Gt CO<sub>2</sub>. Με βάση τις ετήσιες εκπομπές (69Mt CO<sub>2</sub>) της χώρας από μεγάλες σταθερές πηγές, η αποθήκευση του CO<sub>2</sub> θα ήταν εφικτή για 39 χρόνια (EU GeoCapacity, 2009).

#### **6.4 Εφαρμογή CCS στην Ελλάδα**

Τον Ιούνιο του 2011, το Ίδρυμα Οικονομικών & Βιομηχανικών Ερευνών (ΙΟΒΕ), σε συνεργασία με το Εργαστήριο Υποδειγμάτων Οικονομίας–Ενέργειας–Περιβάλλοντος (E3M-Lab) του ΕΜΠ, δημοσίευσε μελέτη με τίτλο «Μακροχρόνιες ενεργειακές Προοπτικές: Οι προκλήσεις για τον ενεργειακό τομέα στην Ελλάδα με ορίζοντα το 2050».

Η μελέτη λαμβάνοντας ως δεδομένα, το στόχο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για μείωση κατά 80% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου το 2050 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990, τον αντίστοιχο στόχο για την Ελλάδα ο οποίος προσδιορίζεται σε μείωση των εκπομπών κατά 70-75% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990 και το γεγονός ότι ο ενεργειακός τομέας ευθύνεται περίπου για το 80% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ανέπτυξε τρία σενάρια στο πλαίσιο της υπόθεσης περί δραστηκής μείωσης των εκπομπών μέχρι το 2050.

Τα σενάρια διαφοροποιούνται σχετικά με τη μελλοντική διάρθρωση της ηλεκτροπαραγωγής, η οποία και στα τρία σενάρια θα πρέπει να εξελιχθεί ώστε μέχρι το 2050 να έχει σχεδόν μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Τα σενάρια μείωσης των εκπομπών ορίζονται ως εξής:

1. **Σενάριο «ΑΠΕ»:** Το σενάριο προβλέπει μείωση των εκπομπών με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή και ανάπτυξη τεχνικών αποθήκευσης, ενώ δεν χρησιμοποιούνται τεχνολογίες πυρηνικής ενέργειας και τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCS).
2. **Σενάριο «ΑΠΕ και CCS»:** Σύμφωνα με το σενάριο αναπτύσσονται τεχνολογίες CCS με αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα σε γεωλογικούς σχηματισμούς στην Ελλάδα. Η πυρηνική ενέργεια δεν εφαρμόζεται. Οι τεχνολογίες CCS καθώς και το σύστημα μεταφοράς και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα θεωρείται ότι θα είναι διαθέσιμα στην αγορά από το 2025.
3. **Σενάριο «ΑΠΕ και Πυρηνικά»:** Στο σενάριο γίνεται η υπόθεση ότι πυρηνική ενέργεια μπορεί να αναπτυχθεί στην Ελλάδα μετά το 2030 χωρίς όμως να είναι διαθέσιμοι χώροι αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα από CCS.

Παράλληλα, αναπτύχθηκε ένα σενάριο «**Αναφοράς**». Στο σενάριο αναφοράς εφαρμόζεται πλήρως η πολιτική του «20-20-20» έως το 2020, όπως έχει εξειδικευθεί από την Ελληνική Κυβέρνηση, ενώ θεωρείται ότι δεν θα ληφθούν περαιτέρω αποφάσεις στο μέλλον, εκτός της εφαρμογής του μηχανισμού αγοράς δικαιωμάτων εκπομπής (ETS) που αφορά ιδίως την



ηλεκτροπαραγωγή, τις μεγάλες εγκαταστάσεις καύσης και τις αεροπορικές μεταφορές για το οποίο γίνεται υπόθεση επέκτασης μέχρι το 2050.

Για λόγους σύγκρισης και αξιολόγησης της πολιτικής που περιλαμβάνεται στα σενάρια μείωσης των εκπομπών, αναπτύχθηκε και ένα σενάριο στο οποίο θεωρείται ότι δεν εφαρμόζονται πολιτικές για μείωση εκπομπών, περιλαμβανομένων αυτών που αφορούν στην ένταξη των ΑΠΕ και στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Το σενάριο αυτό αντιστοιχεί σε εξέλιξη μόνο με βάση τους μηχανισμούς της αγοράς χωρίς κρατική παρέμβαση και χωρίς στόχους πολιτικής. Το σενάριο αυτό αναφέρεται ως σενάριο «**Καμίας Πολιτικής**» (IOBE, 2011).

#### 6.4.1 Σενάριο Αναφοράς

Το σενάριο «**Αναφοράς**» υποθέτει την εφαρμογή των πολιτικών που έχουν ήδη δρομολογηθεί για την επίτευξη του στόχου μείωσης εκπομπών κατά 20% το 2020 στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Αυτές οι πολιτικές περιλαμβάνουν τα προγράμματα υποστήριξης των ΑΠΕ (επίτευξη συνεισφοράς τουλάχιστον 20% της ακαθάριστης τελικής κατανάλωσης ενέργειας το 2020), το σύστημα αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπής CO<sub>2</sub> από δημοπρασίες οι οποίες γίνονται σε όλη την Ε.Ε. (με μείωση του συνολικού ύψους των δικαιωμάτων και μετά το 2020), τις οδηγίες για την ενεργειακή αποδοτικότητα και την ποιότητα αέρα, κ.α. Μεγάλη σημασία έχει η εφαρμογή της οδηγίας για τις μεγάλες εγκαταστάσεις καύσης η οποία θα οδηγήσει στη σταδιακή απόσυρση του μεγαλύτερου μέρους των υφιστάμενων λιγνιτικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής. Επιπλέον, γίνεται η υπόθεση ότι μέχρι το 2020 υλοποιείται η πρώτη και η δεύτερη φάση του προγράμματος διασύνδεσης των Κυκλάδων, ενώ μετά το 2020 ολοκληρώνεται η διασύνδεση των περισσότερων νησιών, περιλαμβανομένης της Κρήτης και Ρόδου (IOBE, 2011).

Σύμφωνα με το σενάριο «**Αναφοράς**» η τελική κατανάλωση ενέργειας ανέρχεται το 2020 σε 21,9 εκ. toe, μειωμένη κατά 10% συγκριτικά με το σενάριο «**Καμίας Πολιτικής**». Το 2050 η τελική κατανάλωση ενέργειας είναι χαμηλότερη σε σχέση με το σενάριο «**Καμίας Πολιτικής**» κατά 22%. Η πολιτική εξοικονόμησης ενέργειας που περιλαμβάνεται είναι φιλόδοξη και απαιτεί σημαντική προσπάθεια και πόρους για την υλοποίησή της. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας περιορίζεται σε 76TWh το 2020 και 114TWh το 2050, έναντι 93TWh το 2020 και 157TWh το 2050 στο σενάριο «**Καμίας Πολιτικής**». Συγκριτικά μικρότερη είναι και η αιχμή φορτίου (κατά 3,1GW το 2020 και 7,8GW το 2050), φτάνοντας τα 14,1GW το 2020 και τα

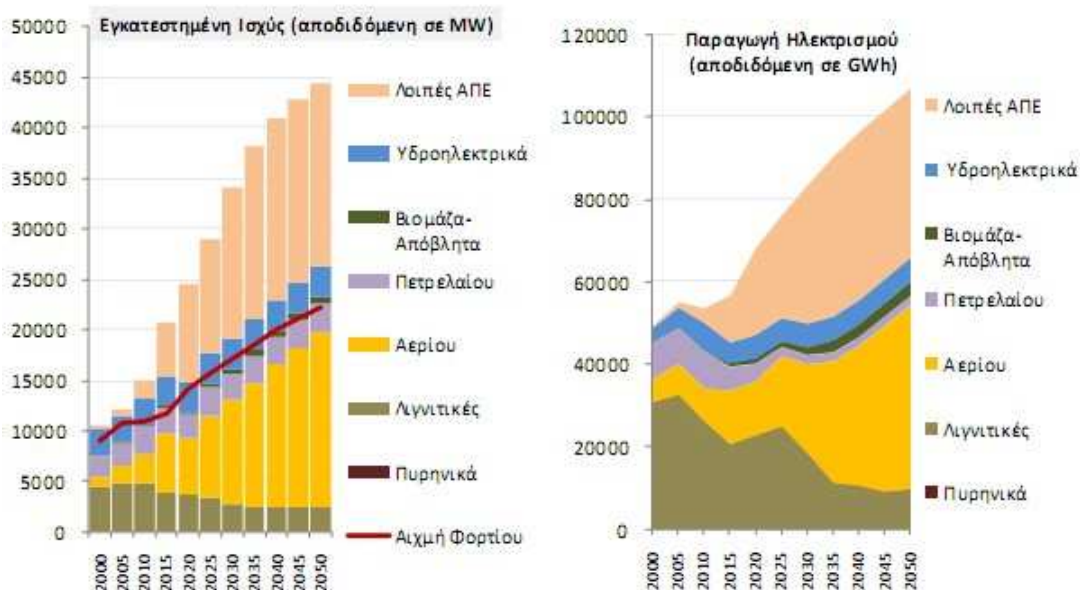
22,2GW το 2050. Αυτή η διαφορά στηρίζεται σε εκτεταμένα μέτρα ενεργειακής αποδοτικότητας.

Παρόλο που οι τιμές<sup>1</sup> του CO<sub>2</sub> προβλέπονται χαμηλές μέχρι το 2020 (17€/t CO<sub>2</sub>), οι επιδράσεις στην ηλεκτροπαραγωγή της Ελλάδας θα είναι σημαντικές λόγω της μεγάλης συμμετοχής της παραγωγής από λιγνίτη. Οι τιμές αυτές δεν αλλάζουν με τη σειρά φόρτισης των μονάδων στην ημερήσια αγορά, μειώνουν όμως την κερδοφορία των λιγνιτικών σταθμών και επηρεάζουν ιδιαίτερα αρνητικά τις προοπτικές επενδύσεων σε νέες λιγνιτικές μονάδες χωρίς τεχνολογία δέσμευσης CO<sub>2</sub>. Τα επόμενα χρόνια το μερίδιο του λιγνίτη στην ηλεκτροπαραγωγή περιορίζεται, πέφτοντας στο 1/3 της συνολικής παραγωγής το 2020 και κάτω από το 10% μετά το 2040, έναντι 60% το 2005. Ο περιορισμός οφείλεται τόσο στην ανάγκη παύσης<sup>2</sup> της λειτουργίας των περισσότερων μονάδων, όσο και στο γεγονός ότι με τις υψηλές τιμές<sup>1</sup> δικαιωμάτων CO<sub>2</sub>, μετά το 2020 (37€/t CO<sub>2</sub>, το 2030 και 50-55€/t CO<sub>2</sub>, μετά) επηρεάζεται η σειρά φόρτισης των μονάδων στην ημερήσια αγορά, γεγονός που αποθαρρύνει νέες επενδύσεις σε συμβατικής τεχνολογίας λιγνιτικές μονάδες. Από τις υφιστάμενες μονάδες, μόνο η μονάδα της Μελίτης προβλέπεται να μείνει σε λειτουργία μετά το 2030. Ωστόσο, ακόμα και υπό αυτές τις υποθέσεις η βέλτιστη ανάπτυξη του συστήματος υποδεικνύει την ένταξη 2400MW νέας ισχύος από συμβατικές μονάδες υπερκρίσιμης τεχνολογίας (χωρίς CCS) με πλήρεις εγκαταστάσεις αποφυγής αερίων ρύπων μέχρι το 2030. Η υψηλή διεϊσδυση των ΑΠΕ στο σενάριο «Αναφοράς» ευνοεί την ένταξη στο σύστημα 2GW επιπλέον υδροηλεκτρικών συστημάτων με άντληση, καθώς και ευέλικτων μονάδων συνδυασμένου κύκλου και αεροστρόβιλων με καύση φυσικού αερίου. Σε αυτό το σενάριο αναπτύσσονται 15,6GW νέας ισχύος μονάδων φυσικού αερίου μέχρι το 2050. Το μεγαλύτερο μέρος αυτών των μονάδων θα πρέπει να διαθέτει τη δυνατότητα παρακολούθησης κυμαινόμενου φορτίου με χαρακτηριστικά ταχείας ανόδου και καθόδου. Οι στόχοι διεϊσδυσης των ΑΠΕ για το 2020 επιτυγχάνονται στο σενάριο «Αναφοράς» με το μερίδιο των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή να ανέρχεται σε 40% το 2020 και στη συνέχεια να σταθεροποιείται σε 50%, έναντι 11,6% το 2005. Το μεγαλύτερο μέρος της νέας ισχύος ΑΠΕ αφορά σε αιολικά πάρκα (6,5GW το 2020 και 10GW μετά το 2030), ενώ πολύ μεγάλη αύξηση σημειώνουν και τα φωτοβολταϊκά συστήματα (2,2GW το 2020 και 6,3GW το 2050). Μικρότερη, αλλά σημαντική, είναι η συνεισφορά των μικρών υδροηλεκτρικών (μέχρι 1,1GW), αλλά και της βιομάζας - αποβλήτων (750 MW το 2050), (IOBE, 2011).

<sup>1</sup>Οι τιμές CO<sub>2</sub> στο μέλλον έχουν υπολογιστεί από το μαθηματικό μοντέλο PRIMES για λογαριασμό της Ευρωπαϊκής Επιτροπής.

<sup>2</sup>Λόγω της Οδηγίας για τις μεγάλες εγκαταστάσεις καύσης οι υφιστάμενες λιγνιτικές θα πρέπει να παύσουν τη λειτουργία τους σταδιακά μετά το 2016 και μέχρι το 2027, με μικρές μόνο εξαιρέσεις.

Στο σχήμα 6.4.1.1 παρουσιάζεται η δομή της ηλεκτροπαραγωγής στο μέλλον όπως προσομοιώνεται στο σενάριο «Αναφοράς».



Πηγή: IOBE, 2011

Σχήμα 6.4.1.1: Δομή της Ηλεκτροπαραγωγής στο σενάριο «Αναφοράς»

Ο μετασχηματισμός του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στο σενάριο «Αναφοράς» οδηγεί σε αύξηση του μέσου κόστους που κυμαίνεται μεταξύ 17% και 24% συγκριτικά με το σενάριο «Καμίας Πολιτικής». Η αύξηση των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας προβλέπεται να είναι μικρότερη στα τιμολόγια για την ενεργοβόρο βιομηχανία (μεταξύ 10 και 16% συγκριτικά με το σενάριο «Καμίας Πολιτικής») και μεγαλύτερη στα λοιπά τιμολόγια.

Στον πίνακα 6.4.1.1 παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις του συνολικού κόστους του ενεργειακού συστήματος.

Πίνακας 6.4.1.1: Διαμόρφωση του κόστους των ενεργειακών υπηρεσιών

Πηγή: IOBE, 2011

Σενάριο "Αναφοράς"	εκατ. € του 2008							σωρευτικά 2010-2050	διαφορές από σενάριο "Καμίας Πολιτικής"
	2005	2010	2020	2030	2040	2050			
Βιομηχανία	2.943	2.798	2.961	3.199	3.289	3.617	126.644	693	
Οικιακός τομέας	7.601	9.853	15.267	18.404	19.141	20.254	685.900	39.733	
Υπηρεσίες & Γεωργία	3.916	4.738	7.333	9.303	9.959	11.041	349.009	-15.271	
Μεταφορές	7.839	9.832	18.044	24.176	27.642	30.198	905.290	262.896	
Σύνολο κόστους									
Με πληρωμή δικαιωμάτων ETS	22.299	27.220	43.610	55.087	60.033	65.112	2.066.953	288.159	
Χωρίς πληρωμή δικαιωμάτων ETS	22.299	27.220	42.946	53.605	58.119	63.016	2.014.900	236.106	
Πληρωμές δικαιωμάτων ETS	0	0	663	1.483	1.913	2.097	52.053	52.053	
ως % του ΑΕΠ	10,7	12,5	16,5	16,5	14,7	13,1	15,2	1,8	
GHG (εκατ. t CO <sub>2</sub> eq)	127,5	109,3	97,3	95,2	90,2	95,1	3.809	-1.466	
<b>Σενάριο "Καμίας Πολιτικής"</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>	<b>σωρευτικά 2010-2050</b>		
Σύνολο κόστους	22.299	27.015	38.965	47.065	50.097	53.994	1.778.794		
ως % του ΑΕΠ	10,7	12,4	14,9	14,5	12,7	11,2	13,4		

Οι ενεργειακές υπηρεσίες που παρέχονται στο πλαίσιο του σεναρίου «Αναφοράς» κοστίζουν, σωρευτικά για την περίοδο 2010-2050, 236 δισεκ. €'08 περισσότερο από ότι στο σενάριο «Καμίας Πολιτικής» που αντιστοιχεί σε 1,8% του σωρευτικού ΑΕΠ σε σταθερές τιμές.

Οι πληρωμές για αγορά δικαιωμάτων εκπομπής CO<sub>2</sub>, μη περιλαμβανομένων των δωρεάν δικαιωμάτων που χορηγούνται σε βιομηχανικούς κλάδους, ανέρχονται σε 52 δισεκ. €'08, σωρευτικά για τη χρονική περίοδο μέχρι το 2050. Οι πληρωμές αυτές εκτιμάται ότι θα ανέλθουν στα 663 εκατ. €'08 το 2020 και θα αυξηθούν στη συνέχεια λόγω της αναμενόμενης αύξησης των τιμών των δικαιωμάτων στην πανευρωπαϊκή αγορά. Διαφορετικές εκτιμήσεις για την έκταση και διάρκεια της οικονομικής κρίσης στην Ελλάδα έχουν περιορισμένη επίδραση στις εκτιμήσεις για το κόστος της μετάβασης (IOBE, 2011).

Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) στο πλαίσιο του σεναρίου «Αναφοράς» είναι σημαντικά χαμηλότερες των εκπομπών του σεναρίου «Καμίας Πολιτικής» κατά 1,5 δισεκ. t CO<sub>2</sub> eq, σωρευτικά κατά τη χρονική περίοδο 2010 - 2050 (28% μείωση σωρευτικά). Οι εκπομπές σταθεροποιούνται μεταξύ 90 και 95 t CO<sub>2</sub> eq, σε όλη τη χρονική περίοδο μετά το 2020, επίπεδο το οποίο είναι 25-30% χαμηλότερο των εκπομπών του 2005. Ο πίνακας 6.4.1.2 παρουσιάζει τις προβολές του μαθηματικού μοντέλου σχετικά με τις εκπομπές των GHG.

Πίνακας 6.4.1.2: Εκπομπές Αερίων του Θερμοκηπίου (GHG)

Πηγή: IOBE, 2011

	εκατ. t CO <sub>2</sub> eq	% Μεριδία	εκατ. t CO <sub>2</sub> eq			διαφορές από σενάριο "Καμίας Πολιτικής"		
			2005	2020	2030	2050	2020	2030
Βιομηχανία	8,2	6,4	4,1	3,9	4,5	-32%	-30%	-31%
Οικίες & Κτίρια	11,2	8,8	11,3	12,3	10,7	-7%	-15%	-29%
Μεταφορές	23,9	18,7	23,9	25,0	27,7	-13%	-17%	-21%
Ηλεκτροπαραγωγή	46,3	36,3	31,9	28,6	25,5	-35%	-45%	-64%
Άλλοι Τομείς	37,9	29,7	26,0	25,5	26,8	-8%	-12%	-12%
<b>Σύνολο GHG</b>	<b>127,5</b>	<b>100</b>	<b>97,3</b>	<b>95,2</b>	<b>95,1</b>	<b>-21%</b>	<b>-27%</b>	<b>-39%</b>

Η αναδιάρθρωση του ηλεκτρικού τομέα που περιγράφεται στο σενάριο «Αναφοράς» επιτυγχάνει σημαντική μείωση των εκπομπών συγκριτικά με το 2005 αλλά και συγκριτικά με το σενάριο «Καμίας Πολιτικής». Η μείωση των εκπομπών οφείλεται στις ΑΠΕ και στην υποκατάσταση της λιγνιτικής παραγωγής από ΑΠΕ και φυσικό αέριο. Η εξοικονόμηση ενέργειας αλλά και οι υποκαταστάσεις μέσω ηλεκτρικής ενέργειας και ΑΠΕ, εξηγούν τη σημαντική μείωση των εκπομπών στους τομείς ζήτησης ενέργειας συγκριτικά με το σενάριο «Καμίας Πολιτικής». Οι εκπομπές από άλλους τομείς κυρίως αφορούν εκπομπές αερίων του

θερμοκηπίου για μη ενεργειακές δραστηριότητες. Οι εκπομπές αυτές μειώνονται σχετικά λίγο επειδή το σενάριο «Αναφοράς» δεν περιλαμβάνει σημαντικά μέτρα για τους τομείς αυτούς. Σύμφωνα με τη μελέτη του IOBE και την ανάλυση στο πλαίσιο των υποθέσεων του σεναρίου «Αναφοράς», προκύπτει ως οικονομικά σκόπιμη η αντικατάσταση μέρους της λιγνιτικής ισχύος από νέες συμβατικές μονάδες υπερκρίσιμης τεχνολογίας (χωρίς CCS) με πλήρεις εγκαταστάσεις αποφυγής αερίων ρύπων. Επίσης προκύπτει η σκοπιμότητα παύσης λειτουργίας όλων των παλαιών μονάδων πετρελαίου και φυσικού αερίου του διασυνδεδεμένου συστήματος προ του 2020, με εξαίρεση τις μονάδες συνδυασμένου κύκλου και τους αεριοστρόβιλους. Για τη βέλτιστη ανάπτυξη του συστήματος, η ανάλυση υποδεικνύει την ανάπτυξη νέας ισχύος μονάδων φυσικού αερίου. Το μεγαλύτερο μέρος των νέων μονάδων φυσικού αερίου θα πρέπει να διαθέτει δυνατότητα ευέλικτης λειτουργίας για την παρακολούθηση κυμαινόμενου φορτίου με χαρακτηριστικά ταχείας ανόδου και καθόδου φορτίου. Η διασύνδεση των νησιών θα επιτρέψει τη σταδιακή μείωση της χρήσης πετρελαίου στην ηλεκτροπαραγωγή. Το βέλτιστο πρόγραμμα περιλαμβάνει διασύνδεση της Κρήτης με το ηπειρωτικό σύστημα και τη διατήρηση συμπληρωματικών και εφεδρικών μονάδων στη νήσο, καθώς και παρόμοιο πρόγραμμα για τα Δωδεκάνησα αλλά σε πιο μακροχρόνια προοπτική. Στο σενάριο «Αναφοράς» γίνεται η υπόθεση ότι δεν θα αναπτυχθεί ηλεκτροπαραγωγή από πυρηνική ενέργεια και ότι δεν θα αναπτυχθούν χώροι αποθήκευσης CO<sub>2</sub> στην Ελλάδα. Χωρίς τις επιλογές αυτές, οι τιμές CO<sub>2</sub> σε μακροχρόνια προοπτική αποτελούν σχετικά επαρκές κίνητρο για την ανάπτυξη των ΑΠΕ (IOBE, 2011).

Παρά τις σημαντικές αλλαγές στον ενεργειακό τομέα (κυρίως στην ηλεκτροπαραγωγή) που περιγράφονται στο σενάριο «Αναφοράς», τη μεγάλη μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub> που φαίνεται να επιτυγχάνεται και το αξιοσημείωτο κόστος που τις συνοδεύει, τα μέτρα που περιλαμβάνει το σενάριο δεν επαρκούν για τη μετάβαση προς μια οικονομία χαμηλών εκπομπών. Οι εκπομπές GHG στην Ελλάδα σταθεροποιούνται σε επίπεδα κατά 25-30% χαμηλότερα από το 2005 μετά το 2020, απέχοντας σημαντικά από τη μείωση που απαιτείται στα πλαίσια του παγκόσμιου στόχου για περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας της Γης μέχρι 2°C. Για το σκοπό αυτό θα απαιτείτο η Ελλάδα να μειώσει τις εκπομπές μεταξύ 65 και 75% μέχρι το 2050 συγκριτικά με τα επίπεδα του 2005 (IOBE, 2011).

#### 6.4.2 Σενάριο ΑΠΕ και CCS

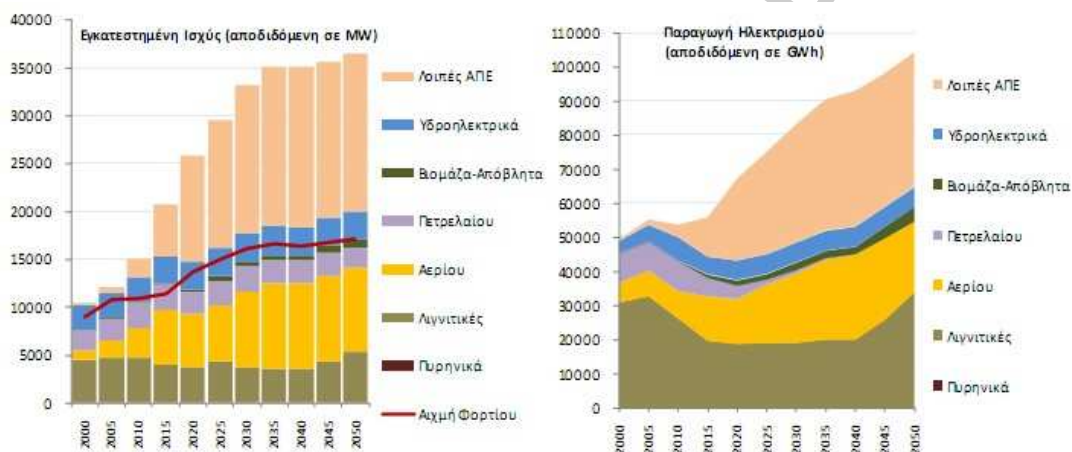
Το σενάριο αυτό υποθέτει διαθεσιμότητα αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα σε γεωλογικούς σχηματισμούς (στη Βόρεια Ελλάδα και ειδικότερα στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας και στην περιοχή του Πρίνου όπως αναλυτικά περιγράφεται στην παράγραφο 6.3), καθώς και εμπορική ωρίμανση των τεχνολογιών δέσμευσης CO<sub>2</sub> σε μεγάλους σταθμούς καύσης ορυκτών καυσίμων.

Στο πλαίσιο του σεναρίου «ΑΠΕ και CCS» γίνεται η υπόθεση ότι το 2025 εντάσσονται στο σύστημα 2.500MW (αποδιδόμενη ισχύς) λιγνιτικών μονάδων με χρήση τεχνολογίας CCS, οι οποίες αντικαθιστούν παλιές μονάδες. Με τον τρόπο αυτό, η συνολική ισχύς των λιγνιτικών μονάδων το 2025, επανέρχεται περίπου στα επίπεδα του 2000. Στη συνέχεια η συνολική ισχύς μειώνεται στα 3.500MW λόγω παύσης λειτουργίας παλαιών μονάδων. Πριν το 2045 το σενάριο προβλέπει ένταξη νέας λιγνιτικής ισχύος με CCS της τάξης των 1.000MW και κατόπιν πριν το 2050 την ένταξη νέας μονάδας 1.100MW με CCS. Για το 2050, το σενάριο προβλέπει λειτουργία λιγνιτικής ισχύος 5.450 MW εκ των οποίων 4.500MW με CCS.

Οι επενδυτικές αυτές αποφάσεις οδηγούνται κυρίως από την τιμή των δικαιωμάτων εκπομπής CO<sub>2</sub> στον μηχανισμό ETS, η οποία διαμορφώνεται στα 38€/t CO<sub>2</sub> για το 2025 (στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού σεναρίου προς την οικονομία χαμηλών εκπομπών). Η τιμή αυτή είναι οριακή σχετικά με την ανταγωνιστικότητα της επιλογής μονάδων με CCS, η οποία όμως ευνοείται από το χαμηλό κόστος του λιγνίτη στην Ελλάδα. Η τιμή των δικαιωμάτων διαμορφώνεται άνω των 60€/t CO<sub>2</sub> πριν το 2030 και μετά, οπότε η τεχνολογία CCS γίνεται περισσότερο ανταγωνιστική. Ακόμα και αν η ένταξη της νέας ισχύος λιγνιτικών μονάδων με CCS δεν γίνει πριν το 2025, θα γίνει αμέσως μετά, στο πλαίσιο των υποθέσεων του σεναρίου «ΑΠΕ και CCS». Στο σενάριο που παρουσιάζεται και σε αντίθεση με το σενάριο «Αναφοράς», η παραγωγή από λιγνίτη διατηρεί σημαντικό μερίδιο στη συνολική ηλεκτροπαραγωγή. Το μερίδιο αυτό διατηρείται περίπου μεταξύ 22 και 25% στο διάστημα 2025-2045, έναντι 51% το 2011, και φθάνει το 32,6% το 2050.

Στο καθιερωμένο από την Ευρωπαϊκή Ένωση πλαίσιο με στόχο το μηδενισμό των εκπομπών από την ηλεκτροπαραγωγή, η στρατηγική διατήρησης των λιγνιτών στο μέλλον είναι δυνατή μόνο εφόσον γίνει αποδεκτή η αποθήκευση CO<sub>2</sub> και αναπτυχθεί η τεχνολογία CCS. Για το σκοπό αυτό θα απαιτηθεί η απόσυρση όλων των υφισταμένων σήμερα μονάδων και η κατασκευή στο μέλλον μονάδων σχεδόν αποκλειστικά με τη τεχνολογία CCS (IOBE, 2011).

Το μερίδιο των μονάδων CCS στη συνολική ακαθάριστη ηλεκτροπαραγωγή προβλέπεται να κυμανθεί μεταξύ 28% έως 38% κατά το χρονικό διάστημα 2025-2050. Στο σενάριο «ΑΠΕ και CCS» περίπου 23 εκατ. τόνοι CO<sub>2</sub> θα αποθηκεύονται το χρόνο από το 2025 και μετά, με μικρή άνοδο μακροχρόνια μέχρι τους 36 εκατ. τόνους το 2050. Κατά την περίοδο 2025-2050 εκτιμάται ότι θα αποθηκευθούν συνολικά περίπου 710 εκατ. τόνοι CO<sub>2</sub>. Στο σχήμα 6.4.2.1 παρουσιάζεται η δομή της ηλεκτροπαραγωγής στο μέλλον όπως προσομοιώνεται στο σενάριο «ΑΠΕ και CCS».



Πηγή: IOBE, 2011

Σχήμα 6.4.2.1: Δομή της Ηλεκτροπαραγωγής στο σενάριο «ΑΠΕ και CCS»

Οι ΑΠΕ εξακολουθούν να έχουν πολύ σημαντικό ρόλο στο σενάριο αυτό, αλλά η συμμετοχή τους στην ηλεκτροπαραγωγή μόλις ξεπερνά το 51% (το 2035), ενώ το 2050 μειώνεται ελαφρά στο 47,5% λόγω της επέκτασης των μονάδων με CCS. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ στο σενάριο χαμηλών εκπομπών «ΑΠΕ και CCS» είναι παρόμοια σε μέγεθος και δομή με το σενάριο «Αναφοράς». Τα αιολικά προβλέπεται να φθάσουν τα 7,4GW το 2020 και να υπερβούν τα 10GW μακροχρόνια. Τα ηλιακά συστήματα προβλέπεται να υπερβούν τα 5GW μακροχρόνια από 2,5GW το 2020. Επίσης, στο σενάριο αυτό προβλέπεται σημαντική ανάπτυξη μονάδων βιομάζας και αποβλήτων καθώς και γεωθερμίας. Οι μονάδες φυσικού αερίου επιτελούν σημαντικό ρόλο για την ευστάθεια του συστήματος και την κάλυψη των διακυμάνσεων του φορτίου. Η ηλεκτροπαραγωγή από φυσικό αέριο διατηρεί μερίδιο γύρω στο 20% σε ολόκληρη τη χρονική περίοδο της προβολής. Η κατανάλωση φυσικού αερίου στην ηλεκτροπαραγωγή παραμένει σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, συγκριτικά με το σενάριο «Αναφοράς». Η ισχύς των μονάδων φυσικού αερίου στο πλαίσιο του σεναρίου «ΑΠΕ και CCS» είναι μικρότερη από αυτή του σεναρίου «Αναφοράς» κατά 2.300MW το 2030 και κατά 8.500MW μικρότερη το 2050. Επειδή οι μονάδες φυσικού αερίου είναι αυτές

που χρησιμοποιούνται κυρίως για εφεδρεία, λόγω ευελιξίας και χαμηλού κόστους επένδυσης, η εξομάλυνση των διακυμάνσεων της καμπύλης φορτίου καθώς και η εξοικονόμηση ενέργειας που λαμβάνουν χώρα στα σενάρια χαμηλών εκπομπών επιτρέπουν την ανάπτυξη μικρότερης ισχύος μονάδων φυσικού αερίου συγκριτικά με το σενάριο «Αναφοράς».

Η τεχνολογία CCS συμβάλλει στη διατήρηση της στρατηγικής που βασίζεται στους εγχώριους λιγνίτες, ενώ όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 6.4.1 δεν συμβαίνει το ίδιο στο σενάριο «Αναφοράς» (IOBE, 2011).

### 6.4.3 Σύγκριση των Σεναρίων

Τα αποτελέσματα της μελέτης του IOBE (σύμφωνα με το πρότυπο PRIMES), για τις εκπομπές GHG και για τα τρία σενάρια που αναπτύχθηκαν στην παρούσα, παρουσιάζονται στον πίνακα 6.4.3.1.

Πίνακας 6.4.3.1: Εκπομπές GHG στα σενάρια με το πρότυπο PRIMES (εκατ. t CO<sub>2</sub> eq)

Πηγή: IOBE, 2011

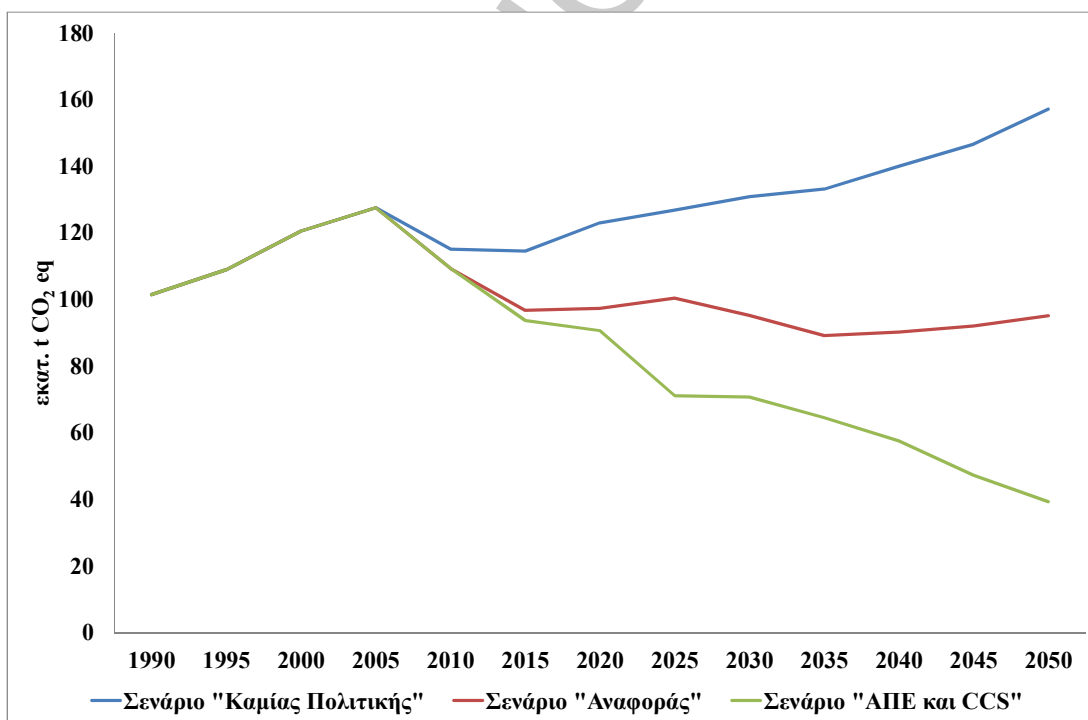
Σενάριο "Καμίας Πολιτικής"	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Σύνολο Εκπομπών GHG	101,4	108,9	120,5	127,5	115,1	114,5	123	126,8	130,8	133,1	139,9	146,6	157,1
Σενάριο "Αναφοράς"	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Εκπομπές από καύση ορυκτών καυσίμων	71,1	78,0	88,9	95,8	84,4	74,6	76,2	79,1	74,7	68,8	69,7	70,8	73,5
Βιομηχανία	9,3	9,8	9,9	8,2	6,0	5,0	4,1	4,0	3,9	3,9	4,0	4,2	4,5
Οικιακός τομέας	4,6	4,8	7,5	9,7	9,7	9,3	9,8	10,4	10,7	10,4	10,0	9,6	8,9
Υπηρεσίες	0,6	0,6	0,8	1,5	1,4	1,3	1,6	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7	1,7
Γεωργία	2,7	2,6	2,6	2,7	2,7	2,6	2,6	2,5	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9
Μεταφορές	17,2	19,1	21,3	23,9	23,0	23,3	23,9	24,9	25,0	25,2	25,9	26,7	27,7
Ηλεκτροπαραγωγή	34,1	39,0	43,9	46,3	38,7	30,4	31,9	33,4	28,6	22,8	23,2	23,5	25,5
Λοιπός ενεργειακός τομέας	2,4	2,2	3,1	3,5	2,8	2,6	2,4	2,4	2,4	2,3	2,3	2,3	2,3
Εκπομπές από μη ενεργειακές δραστηριότητες	30,3	30,8	31,6	31,8	25,0	22,2	21,0	21,2	20,5	20,3	20,6	21,2	21,7
Εκπομπές CO <sub>2</sub> από βιομηχανικές διεργασίες	6,9	7,5	7,9	8,0	6,1	5,0	5,5	5,9	6,3	6,6	6,7	7,0	7,2
Λοιπές Εκπομπές CO <sub>2</sub>	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Εκπομπές λοιπών GHG	23,1	23,2	23,5	23,5	18,7	16,9	15,3	15,1	14,1	13,6	13,7	14,1	14,3
Σύνολο Εκπομπών GHG	101,4	108,9	120,5	127,5	109,3	96,7	97,3	100,4	95,2	89,1	90,2	92,0	95,1
Σενάριο "ΑΠΕ και CCS"	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Εκπομπές από καύση ορυκτών καυσίμων	71,1	78,0	88,9	95,8	84,3	73,0	70,2	50,7	51,6	46,7	41,6	33,9	26,6
Βιομηχανία	9,3	9,8	9,9	8,2	6,0	5,1	4,0	3,8	3,8	3,5	3,2	2,6	2,0
Οικιακός τομέας	4,6	4,8	7,5	9,7	9,7	9,1	9,3	9,8	10,0	9,1	7,6	6,1	4,0
Υπηρεσίες	0,6	0,6	0,8	1,5	1,4	1,3	1,5	1,4	1,3	1,2	0,8	0,5	0,3
Γεωργία	2,7	2,6	2,6	2,7	2,7	2,5	2,4	2,4	2,3	2,2	2,0	1,6	0,7
Μεταφορές	17,2	19,1	21,3	23,9	23,0	23,3	23,4	23,5	23,6	20,2	17,4	13,1	11,1
Ηλεκτροπαραγωγή	34,1	39,0	43,9	46,3	38,7	29,2	27,2	7,6	8,5	8,8	9,1	8,6	7,4
Λοιπός ενεργειακός τομέας	2,4	2,2	3,1	3,5	2,8	2,6	2,3	2,2	2,1	1,8	1,6	1,4	1,2
Εκπομπές από μη ενεργειακές δραστηριότητες	30,3	30,8	31,6	31,8	25,0	20,6	20,4	20,4	19,1	17,7	15,9	13,3	12,7
Εκπομπές CO <sub>2</sub> από βιομηχανικές διεργασίες	6,9	7,5	7,9	8,0	6,1	5,0	5,5	5,9	6,0	5,1	3,5	0,9	0,6
Λοιπές Εκπομπές CO <sub>2</sub>	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
Εκπομπές λοιπών GHG	23,1	23,2	23,5	23,5	18,7	15,4	14,7	14,4	13,0	12,6	12,3	12,3	12,1
Σύνολο Εκπομπών GHG	101,4	108,9	120,5	127,5	109,3	93,7	90,6	71,1	70,7	64,5	57,5	47,2	39,3

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα, στο σενάριο «Καμίας Πολιτικής» οι εκπομπές GHG στην Ελλάδα θα αυξάνονταν συνεχώς και θα έφθαναν το 2050 να είναι 55% υψηλότερα των εκπομπών του 1990. Η εξέλιξη αυτή θα ήταν πλήρως ασύμβατη με την παγκόσμια προσπάθεια αποφυγής της κλιματικής αλλαγής.



Επίσης, παρά τις φιλόδοξες πολιτικές που ενσωματώνονται στο σενάριο «Αναφοράς» ιδίως για το χρονικό ορίζοντα του 2020, η μη αποτύπωση πρόσθετων πολιτικών για το κλίμα καθιστά το σενάριο αυτό ανεπαρκές στο πλαίσιο της προσπάθειας αποφυγής της κλιματικής αλλαγής. Στο σενάριο «Αναφοράς» οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου μειώνονται το 2050 μόνο κατά 6% συγκριτικά με τα επίπεδα του 1990, έναντι στόχου μείωσης κατά 65-70% το 2050 όπως έχει υιοθετηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Κατά συνέπεια απαιτούνται πρόσθετες πολιτικές για το κλίμα, σε μεγάλη έκταση και ιδίως στη περίοδο μετά το 2020, ώστε οι εκπομπές της Ελλάδας να εισέλθουν σε τροχιά συμβατή με τον στόχο περιορισμού της αύξησης της θερμοκρασίας της Γης στους 2°C.

Μια εναλλακτική πρόσθετης πολιτικής περιγράφηκε στο σενάριο «ΑΠΕ και CCS» με δράσεις κυρίως στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του σεναρίου, η μείωση του συνόλου των εκπομπών GHG που επιτυγχάνεται είναι περίπου 61% το 2050 σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Η μείωση αυτή είναι περίπου 64% συγκριτικά με τα επίπεδα εκπομπών του 2010, (Σχήμα 6.4.3.1).

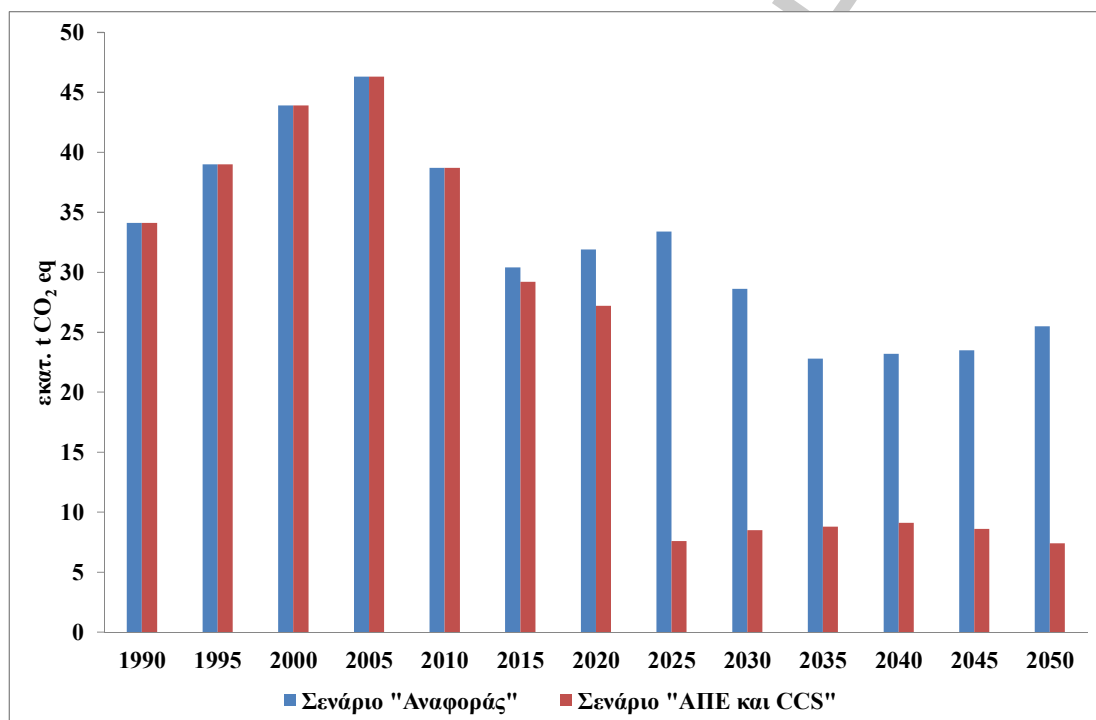


Πηγή: IOBE, 2011

Σχήμα 6.4.3.1: Η εξέλιξη του συνόλου των εκπομπών GHG (κατ. t CO<sub>2</sub>) στα τρία σενάρια

Σύμφωνα με τα δεδομένα και τα αποτελέσματα του σεναρίου «ΑΠΕ και CCS», οι εκπομπές GHG που προέρχονται από την ηλεκτροπαραγωγή, ανέρχονται σε 34% του συνόλου των εκπομπών GHG το 1990, σε 35% και 19% το 2010 και το 2050 αντίστοιχα. Η μείωση των εκπομπών GHG που προέρχονται από την ηλεκτροπαραγωγή, ανέρχεται το 2050 σε περίπου

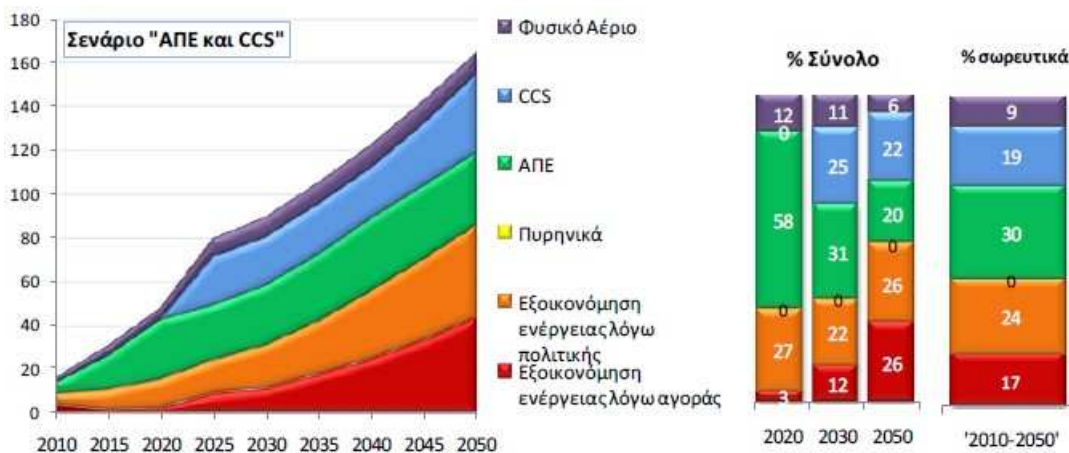
78%, σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 και σε περίπου 81% σε σχέση με τα επίπεδα του 2010 σύμφωνα με το σενάριο «ΑΠΕ και CCS». Στο σχήμα 6.4.3.2 φαίνεται η σημαντική μείωση που επέρχεται στις εκπομπές GHG (κυρίως CO<sub>2</sub>) στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής από την εφαρμογή των προβλεπομένων στο σενάριο «ΑΠΕ και CCS». Όπως παρατηρείται στο σχήμα, η διαφορά στις εκπομπές μεταξύ των σεναρίων «Αναφοράς» και «ΑΠΕ και CCS» γίνεται ιδιαίτερα σημαντική μετά το 2025. Η παρατήρηση ερμηνεύεται λόγω της υπόθεσης του σεναρίου «ΑΠΕ και CCS», για εφαρμογή των τεχνολογιών CCS μετά το 2025 (IOBE, 2011).



Πηγή: IOBE, 2011

Σχήμα 6.4.3.2: Η εξέλιξη των εκπομπών GHG (εκατ. t CO<sub>2</sub>) από τον τομέα της Ηλεκτροπαραγωγής στα Σεναρία: «Αναφοράς» και «ΑΠΕ και CCS»

Στο σχήμα 6.4.3.3 παρουσιάζεται η μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> από τον ενεργειακό τομέα συγκριτικά με τις εκπομπές του έτους 2005. Η μείωση αυτή κατανέμεται μεταξύ των διαφόρων τρόπων μείωσης των εκπομπών σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μαθηματικού υποδείγματος για το σενάριο «ΑΠΕ και CCS». Παρατηρείται ότι η συνεισφορά των εφαρμογών CCS εμφανίζεται περίπου το 2025, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω και μέχρι το 2030 συνεισφέρει σε ποσοστό 25% στη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> από τον ενεργειακό τομέα σε σχέση με τις εκπομπές του 2005. Σωρευτικά για την περίοδο 2010-2050 η συνεισφορά της δέσμευσης και αποθήκευσης CO<sub>2</sub> φθάνει το 19% της συνολικής μείωσης των εκπομπών.



Πηγή: IOBE, 2011

Σχήμα 6.4.3.3: Η συνεισφορά διαφόρων μέσων στη μείωση των εκπομπών του ενεργειακού τομέα από το επίπεδο του 2005 (εκατ. t CO<sub>2</sub>) στο σενάριο «ΑΠΕ και CCS»

Το σενάριο «ΑΠΕ και CCS» όπως αναλυτικά έχει παρουσιαστεί στις προηγούμενες παραγράφους, αποτελεί ένα σύνολο δράσεων με στόχο τη σημαντική μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου μέχρι το 2050. Τα επιμέρους μέσα συνεισφέρουν στο στόχο ως εξής:

- Η εξοικονόμησης ενέργειας ευθύνεται σωρευτικά για την περίοδο 2005-2050 για περίπου 41% της συνολικής μείωσης.
- Οι ΑΠΕ συνεισφέρουν κατά 30%, ενώ η σημασία τους έχει αναγνωριστεί και από την υφιστάμενη πολιτική της χώρας στο πλαίσιο της ευρωπαϊκής πολιτικής του «20-20-20».
- Το φυσικό αέριο, υποκαθιστώντας άλλα ορυκτά καύσιμα συνεισφέρει περίπου κατά 9% στη συνολική μείωση των εκπομπών. Πέρα από το ποσοστό της συνεισφοράς του στην προσπάθεια για μείωση των εκπομπών, το φυσικό αέριο έχει στρατηγική σημασία λόγω της ευελιξίας που παρουσιάζει στα ζητήματα εφεδρείας και εξομάλυνσης των φορτίων αιχμής (IOBE, 2011).

Από οικονομικής πλευράς και σύμφωνα με τα αποτελέσματα των σεναρίων, όπως αναπτύχθηκαν στη μελέτη του IOBE (με βάση το μαθηματικό μοντέλο PRIMES), το κόστος της ενέργειας αναμένεται αυξημένο τις επόμενες δεκαετίες. Το συνολικό ετήσιο κόστος για την παροχή των ενεργειακών υπηρεσιών (όπως ωφέλιμη ενέργεια, θέρμανση, ψύξη, ηλεκτρικές χρήσεις, κ.α.) υπολογίζεται ότι θα είναι μεγαλύτερο στο σενάριο «ΑΠΕ και CCS» συγκριτικά με το σενάριο «Αναφοράς», το οποίο με τη σειρά του εμφανίζει υψηλότερο κόστος συγκριτικά με το σενάριο «Καμίας Πολιτικής». Ο πίνακας 6.4.3.2 παρουσιάζει τα

αποτελέσματα σχετικά με το συνολικό κόστος των ενεργειακών υπηρεσιών το οποίο επωμίζονται οι τελικοί καταναλωτές ενέργειας.

Πίνακας 6.4.3.2: Διαμόρφωση του συνολικού κόστους του ενεργειακού συστήματος  
Πηγή: IOBE, 2011

Συνολικό κόστος ενεργειακών υπηρεσιών συμπεριλαμβανομένων πληρωμών για αγορά δικαιωμάτων CO <sub>2</sub>						
	Ετήσιο κόστος (δισ. € του 2008)				Σωρευτικό Κόστος (δισ. € του 2008)	Διαφορά από σενάριο "Καμίας Πολιτικής" (δισ. € του 2008)
	2010	2020	2030	2050		
Σενάριο "Καμίας Πολιτικής"		39,0	47,1	54,0	1.779	
Σενάριο "Αναφοράς"		43,6	55,1	65,1	2.067	288
% διαφορές από σενάριο "Καμίας Πολιτικής"	27,2	12%	17%	21%	16%	
Σενάριο "ΑΠΕ και CCS"		44,8	54,7	77,0	2.186	407
% διαφορές από σενάριο "Καμίας Πολιτικής"		15%	16%	43%	23%	
Πληρωμές για δικαιώματα εκπομπής CO <sub>2</sub> (δισ. € του 2008)						
		2020	2030	2050	2010-2050	% μεταβολές από σενάριο "Αναφοράς"
Σενάριο "Αναφοράς"		0,66	1,48	2,10	52,05	
Σενάριο "ΑΠΕ και CCS"		0,89	1,23	2,01	43,05	-17,3%

Η υλοποίηση των τρεχουσών πολιτικών που αποτυπώνονται στο σενάριο «Αναφοράς» οδηγεί σε επιπλέον σωρευτικό κόστος της τάξης των 288 δισ. € '08 για την περίοδο 2010-2050 συγκριτικά με το σενάριο «Καμίας Πολιτικής». Το σενάριο «Αναφοράς» όπως έχει αναφερθεί αντιστοιχεί σε υφιστάμενες δεσμεύσεις στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης και παρά το αυξημένο του κόστος, δεν επαρκεί για να οδηγήσει τις εκπομπές στα επίπεδα των στόχων που έχουν τεθεί. Το σενάριο «ΑΠΕ και CCS» προβλέπει επιπλέον κόστος για τις ενεργειακές υπηρεσίες κατά 119 δισ. € '08 για την περίοδο 2010-2050 από το κόστος του σεναρίου «Αναφοράς» (IOBE, 2011).

Το σενάριο «Αναφοράς» περιλαμβάνει πολύ χαμηλότερη τιμή για δικαιώματα εκπομπής CO<sub>2</sub> αλλά εκπέμπει πολύ μεγαλύτερες ποσότητες στους τομείς που εντάσσονται στο μηχανισμό ETS, συγκριτικά με το σενάριο «ΑΠΕ και CCS». Οι σωρευτικές πληρωμές για δικαιώματα την περίοδο 2010-2050 είναι περίπου 17% χαμηλότερες στο σενάριο «ΑΠΕ και CCS» συγκριτικά με τις πληρωμές στο σενάριο «Αναφοράς».

Η αναδιάρθρωση του τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας στα σενάρια που παρουσιάστηκαν, εκτός του σεναρίου «Καμίας Πολιτικής», προϋποθέτει εκτεταμένες επενδύσεις υψηλής εντάσεως κεφαλαίου. Τέτοιες επενδύσεις αποτελούν οι μονάδες ΑΠΕ, οι μονάδες εφεδρείας και αποθήκευσης, τα δίκτυα για τις προβλεπόμενες διασυνδέσεις, οι μονάδες CCS κ.α. Η αύξηση του κόστους εξυπηρέτησης του κεφαλαίου είναι όμως μεγαλύτερη από τη μείωση του μεταβλητού κόστους και κατά συνέπεια το συνολικό κόστος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται τόσο στο σενάριο «Αναφοράς» συγκριτικό με το σενάριο «Καμίας Πολιτικής», όσο και στο σενάριο «ΑΠΕ και CCS» συγκριτικά με το σενάριο «Αναφοράς».

Σημαντική συνιστώσα του επιπλέον κόστους αποτελούν οι πληρωμές για δικαιώματα εκπομπής που εμφανίζονται στα σενάρια που παρουσιάστηκαν χωρίς να υπεισέρχονται στο σενάριο «Καμίας Πολιτικής». Οι δαπάνες για αγορά δικαιωμάτων εκπομπής μειώνονται όταν μειώνονται οι εκπομπές. Μέρος του επιπλέον κόστους του ηλεκτρικού συστήματος στα σενάρια αντισταθμίζεται από τη μείωση των δαπανών για αγορά δικαιωμάτων (IOBE, 2011).

Πίνακας 6.4.3.3: Διαμόρφωση των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας

Πηγή: IOBE, 2011

Τιμές καταναλωτή για την ηλεκτρική ενέργεια (€'2008/MWh)								
Σενάριο "Αναφοράς"						% μεταβολές από σενάριο "Καμίας Πολιτικής"		
	2005	2010	2020	2030	2050	2020	2030	2050
<b>Μέση Τιμή</b>	88,3	114,9	147,1	157,3	135,4	17%	23%	24%
Βιομηχανία	55,9	76,3	97,2	103,0	93,0	10%	17%	21%
Νοικοκυριά	93,7	129,5	169,3	179,3	151,9	21%	25%	26%
Υπηρεσίες	111,6	129,8	151,0	157,9	133,7	18%	23%	25%
Σενάριο "ΑΠΕ και CCS"						% μεταβολές από σενάριο "Αναφοράς"		
	2005	2010	2020	2030	2050	2020	2030	2050
<b>Μέση Τιμή</b>	88,3	115,0	154,7	159,4	155,5	5%	1%	15%
Βιομηχανία	55,9	75,9	100,1	101,7	90,2	3%	-1%	-3%
Νοικοκυριά	93,7	130,0	178,6	181,2	174,9	6%	1%	15%
Υπηρεσίες	111,6	129,8	158,5	159,1	148,8	5%	1%	11%

Λόγω του υψηλότερου κόστους προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας, οι τιμές καταναλωτή αυξάνουν σε όλα τα σενάρια συγκριτικά με το σενάριο «Καμίας Πολιτικής». Η αύξηση αυτή είναι της τάξης του 20% για το σενάριο «Αναφοράς» συγκριτικά με το σενάριο «Καμίας Πολιτικής» (βλ. πίνακα 6.4.3.3). Σύμφωνα με το σενάριο «ΑΠΕ και CCS» οι μέσες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας δεν διαφοροποιούνται σημαντικά μέχρι το 2030 σε σχέση με το σενάριο «Αναφοράς» αλλά εμφανίζονται αυξημένες κατά 15% περίπου το 2050.

Οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας όπως υπολογίζονται από το μαθηματικό υπόδειγμα, περιλαμβάνουν την πλήρη ανάκτηση κάθε είδους κόστους στην παραγωγή και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και ανάκτηση όλων των μορφών επιδότησης για τις ΑΠΕ, το κόστος αυξημένης εφεδρείας ανάλογο με το ποσοστό των στοχαστικών ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, κλπ. (IOBE, 2011).

## **Κεφάλαιο 7**

### **Συμπεράσματα – Προτάσεις**

#### **7.1 Συμπεράσματα**

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί γεγονός, με μέση αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη ήδη κατά 0,8°C απ' ότι στην προβιομηχανική εποχή και με τάση αύξησης μεταξύ 1,8-4°C κατά τον τρέχοντα αιώνα. Η παρατηρούμενη και αναμενόμενη αύξηση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας συνοδεύεται από την άνοδο της στάθμης της θάλασσας σαν αποτέλεσμα της τήξης των πολικών παγετών και σε πολλές περιοχές από μια τάση αύξησης της συχνότητας εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων.

Το φαινόμενο της υπερθέρμανσης οφείλεται κυρίως στην ανθρωπογενή δραστηριότητα και στις τεράστιες ποσότητες ενέργειας οι οποίες παράγονται με κατανάλωση ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, φυσικό αέριο και άνθρακα) με υψηλά επίπεδα εκπομπών CO<sub>2</sub>.

Η αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής απαιτεί λήψη μέτρων περιορισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και προσαρμογής σε παγκόσμιο και περιφερειακό επίπεδο. Υπάρχει ευρεία επιστημονική και πολιτική συναίνεση, ότι για να μη φθάσει η κλιματική αλλαγή σε επικίνδυνα επίπεδα, η υπερθέρμανση του πλανήτη πρέπει να συγκρατηθεί κάτω από το όριο των 2°C. Επίσης, έχει εκτιμηθεί ότι το κόστος της κλιματικής αλλαγής σε χρονικό ορίζοντα μέχρι το 2100 θα είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με το απαιτούμενο κόστος για τη μείωση των εκπομπών.

Η Ελλάδα απειλείται από την κλιματική αλλαγή με την αναμενόμενη άνοδο της μέσης στάθμης της θάλασσας, τις ακραίες κυματικές καταστάσεις και τα ακραία καιρικά φαινόμενα γενικότερα, καταστάσεις που αφορούν πολλούς κλάδους της οικονομίας (τουρισμός, μεταφορές κ.α.).

Η ριζική αλλαγή του τρόπου παραγωγής και χρήσης της ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής. Απ' την άλλη πλευρά το υφιστάμενο σύστημα ενέργειας βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα (56% της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη), οι επενδύσεις που έχουν γίνει υπάρχει απαίτηση να συνεχίσουν να αποδίδουν, τα αποθέματα εξασφαλίζουν ενέργεια για δεκάδες χρόνια ακόμα, καθώς επανειλημμένα ανακαλύπτονται νέα κοιτάσματα ή προκύπτουν νέες επιλογές όπως το σχιστολιθικό φυσικό αέριο, η πυρηνική ενέργεια συνοδεύεται από σημαντικά προβλήματα κοινωνικής αποδοχής και ασφάλειας (31% της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη), σε συνδυασμό με το υψηλό

κόστος και την περιορισμένη συνεισφορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (13% της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη), συνηγορούν στο συμπέρασμα ότι το ενεργειακό σύστημα θα εξακολουθεί να στηρίζεται κατά ένα μεγάλο μέρος στα ορυκτά καύσιμα τουλάχιστον μέχρι το 2030.

Μια από τις εναλλακτικές επιλογές με στόχο την απαλλαγή του ενεργειακού συστήματος από τις ανθρακούχες εκπομπές αποτελεί η δέσμευση και αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα (CCS). Οι διαθέσιμες τεχνολογίες CCS είναι δυνατό να εξασφαλίσουν οικονομικότερους τρόπους μείωσης των εκπομπών, επιτρέποντας ταυτόχρονα τη χρήση των ορυκτών καυσίμων. Η εμπειρία εφαρμογής των τεχνολογιών αυτών, κυρίως στη βιομηχανία του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, αποδεικνύει ότι η εφαρμογή τους με σκοπό την απομάκρυνση του άνθρακα αποτελεί μια επιλογή τεχνικά εφικτή. Ο βασικότερος ανασταλτικός παράγοντας στην εφαρμογή των διαθέσιμων τεχνολογιών CCS είναι αυτός του αυξημένου κόστους. Με τις σημερινές τιμές της τεχνολογίας, οι αρχικές επενδύσεις για εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας με CCS είναι περίπου 30-70% υψηλότερες σε σχέση με συμβατικές μονάδες. Επίσης, τα λειτουργικά είναι 25-75% περισσότερα σε μονάδες με CCS έναντι των συμβατικών, κυρίως λόγω των απωλειών απόδοσης και του κόστους δέσμευσης και μεταφοράς του CO<sub>2</sub>. Αυτό ισχύει για κάθε τύπο σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και αποτελεί εμπόδιο στην ευρύτερη χρήση των τεχνολογιών δέσμευσης, αφού την καθιστά οικονομικά απαγορευτική. Ωστόσο, τόσο η βιομηχανία, όσο και ανεξάρτητοι εμπειρογνώμονες συμφωνούν, ότι με τιμές δικαιωμάτων εκπομπών CO<sub>2</sub> στα 35€/t CO<sub>2</sub> περίπου και υποθέτοντας την πλήρη αναγνώριση της CCS στο Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπής (ΣΕΔΕ) της Ευρωπαϊκής Ένωσης, (θα θεωρείται δηλαδή ότι δεν έχει υπάρξει καθόλου εκπομπή του CO<sub>2</sub> που δεσμεύεται, μεταφέρεται και αποθηκεύεται με ασφάλεια) οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής με CCS θα είναι ανταγωνιστικοί μετά το 2020. Αυτό θα συμβαίνει, διότι το κόστος της αποφυγής CO<sub>2</sub> μέσω CCS, θα είναι τουλάχιστον ίσο αν όχι χαμηλότερο από το κόστος αγοράς δικαιωμάτων εκπομπής.

Η τιμή των δικαιωμάτων εκπομπής CO<sub>2</sub> για το 2025, την οποία η μελέτη του IOBE θεωρεί οριακή σε σχέση με την ανταγωνιστικότητα της επιλογής μονάδων με CCS για την Ελλάδα, διαμορφώνεται στα 38€/t CO<sub>2</sub>, η οποία όμως ενοείται από το χαμηλό κόστος του λιγνίτη στη χώρα.

Σχετικά με τη μεταφορά του δεσμευμένου CO<sub>2</sub> ενώ η ναυτιλία μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο ιδιαίτερα στα αρχικά στάδια εφαρμογής των τεχνολογιών CCS λόγω της

ευελιξίας που διαθέτει, το πιθανότερο είναι οι αγωγοί να αποτελούν την πρώτη επιλογή στις περισσότερες περιπτώσεις για οικονομικούς λόγους.

Από τις δυνατές επιλογές αποθήκευσης που παρουσιάστηκαν όλες εξαρτώνται σημαντικά από τη γεωγραφική περιοχή και εμφανίζουν αρκετές αβεβαιότητες σχετικά με τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι ταμιευτήρες πετρελαίου ή φυσικού αερίου που ήδη έχουν εκκενωθεί εμφανίζουν τις καλύτερες προοπτικές αποθήκευσης και η χρήση τους είναι δυνατό να συμβάλει σε αυξημένη ανάκτηση πετρελαίου. Οι ταμιευτήρες αυτοί έχουν αποδείξει την ικανότητα τους να διατηρούν υγρά ή αέρια σε υψηλές πιέσεις για μεγάλα διαστήματα χρόνου, το κόστος εξερεύνησής τους είναι αρκετά χαμηλό, η γεωλογία τους είναι γνωστή και υπάρχει η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης τμήματος του εξοπλισμού της παραγωγής υδρογονανθράκων για τη μεταφορά και την έκχυση του CO<sub>2</sub>. Οι αλατούχοι υδροφόροι ορίζοντες έχουν τη μέγιστη δυνατότητα αποθήκευσης του CO<sub>2</sub>, αφού οι ταμιευτήρες αυτοί είναι οι πιο διαδεδομένοι και έχουν την μεγαλύτερη χωρητικότητα, ενώ σε τέτοιου τύπου γεωλογικούς σχηματισμούς εφαρμόζονται τα πρώτα έργα αποθήκευσης CO<sub>2</sub> (Sleipner & In Salah).

Η Ελλάδα έχει δεσμευθεί στα πλαίσια του Πρωτοκόλλου του Κιότο να περιορίσει την αύξηση των εκπομπών της στο +25% για το διάστημα 2008-2012 σε σχέση με το έτος βάσης 1990. Σύμφωνα με την τελευταία Εθνική Απογραφή Εκπομπών αερίων του Θερμοκηπίου (+12,65% για το έτος 2010) και λαμβάνοντας υπόψη την οικονομική ύφεση στην οποία βρίσκεται η χώρα, ο στόχος μάλλον θα επιτευχθεί.

Τα επόμενα χρόνια όμως ο ενεργειακός τομέας της χώρας και πιο συγκεκριμένα ο τομέας της ηλεκτροπαραγωγής θα πρέπει να μετασχηματιστεί προς ένα σύστημα πολύ πιο αποδοτικό ενεργειακά και με ελάχιστες εκπομπές CO<sub>2</sub>. Ο Εθνικός σχεδιασμός στοχεύει σε μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 60-70% έως το 2050 σε σχέση με το 2005. Βασικός άξονας για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, είναι η ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ να φθάσει σε ποσοστό 85-100% αξιοποιώντας όλες τις εμπορικά ώριμες τεχνολογίες. Ταυτόχρονα, η χρήση της τεχνολογίας δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCS) λόγω τεχνικοοικονομικών αβεβαιοτήτων προτείνεται από τον Εθνικό σχεδιασμό για πολύ περιορισμένη χρήση. Απ' την άλλη πλευρά, ο λιγνίτης αποτελεί σχεδόν τη μόνη εγχώρια ενεργειακή πηγή ορυκτών καυσίμων, εμφανίζει σημαντικά ακόμα αξιοποιήσιμα αποθέματα (περίπου 4Gt) και συμβάλει στην ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού της Ελλάδας. Για να συνεχίσει ο λιγνίτης να αποτελεί βασικό καύσιμο στην ηλεκτροπαραγωγή θα πρέπει να εφαρμοστεί τεχνολογία CCS. Σύμφωνα με το σενάριο «ΑΠΕ και CCS» της μελέτης του



IOBE, θα επιτυγχανόταν μείωση των GHG κατά 61% το 2050 σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, με τη συμβολή των τεχνολογιών CCS στη μείωση να ανέρχεται σε 19% σωρευτικά για την περίοδο 2010-2050. Το συνολικό κόστος εφαρμογής του σεναρίου «ΑΠΕ και CCS» για την περίοδο 2010-2050, εκτιμάτε σε 119 δις. € '08 περισσότερα, από το σενάριο «Αναφοράς» που ενσωματώνει τις υφιστάμενες δεσμεύσεις στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αλλά 33 δις. € του 2008 λιγότερα από το σενάριο «ΑΠΕ» το οποίο προβλέπει υψηλή διείσδυση ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή και ανάπτυξη τεχνικών αποθήκευσης. Έτσι, ένα μελλοντικό σύστημα που συνδυάζει την εκμετάλλευση του εγχώριου λιγνίτη με χρήση τεχνολογιών CCS για κάλυψη μέρους της ισχύος βάσης, ΑΠΕ και φυσικό αέριο για εξισορρόπηση φορτίου και εφεδρείες, φαίνεται να είναι και οικονομικά αποτελεσματικό και τεχνικά αξιόπιστο. Η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζεται να αυξάνεται σημαντικά μέχρι το 2050 σε όλα τα σενάρια. Το σενάριο «Αναφοράς» έχει ως αποτέλεσμα αυξημένη τιμή κατά 24% σε σχέση με το σενάριο «Καμίας Πολιτικής», ενώ από το σενάριο «ΑΠΕ και CCS» προκύπτει επιπλέον αύξηση των τιμών κατά 15% από το σενάριο «Αναφοράς» το 2050.

Σε ότι αφορά τους πιθανούς χώρους αποθήκευσης εντός της ελληνικής επικράτειας, αυτοί εντοπίζονται στη Βόρεια Ελλάδα και σε μικρή σχετικά απόσταση από λιγνιτικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με μελέτες που έχουν εκπονηθεί, κατάλληλα επιλεγμένοι χώροι στην Ελλάδα θα μπορούσαν να αποθηκεύσουν μέχρι 2,2Gt CO<sub>2</sub>. Με βάση τα αποτελέσματα του προγράμματος GESTCO, η αποθήκευση εκπομπών CO<sub>2</sub> από μεγάλες σταθερές πηγές θα ήταν εφικτή για 39 χρόνια. Εξαιτίας των υψηλών επιπέδων σεισμικότητας της χώρας, η ενίσχυση της έρευνας για την ικανότητα αποθήκευσης θα πρέπει να αποτελεί άμεση προτεραιότητα.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι εφαρμογές τεχνολογιών CCS συνδέονται με σημαντικές αβεβαιότητες. Σημαντικό ζήτημα αποτελεί η ασφάλεια της γεωλογικής αποθήκευσης CO<sub>2</sub>, ο βαθμός διασφάλισης από μια πιθανή διαρροή την περίοδο λειτουργίας, αλλά και στο μέλλον, δεδομένου ότι η αποθήκευση εκτείνεται σε βάθος χρόνου, καθώς και οι πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Επίσης, σημαντικές είναι οι αβεβαιότητες στον οικονομικό τομέα, καθώς έπειτα από την οικονομική κρίση των τελευταίων ετών, οι αναπτυσσόμενες χώρες δεν εμφανίζονται διατεθειμένες να συμβάλουν σε πολιτικές «πράσινης οικονομίας», θεωρώντας ότι με τον τρόπο αυτό απειλούνται οι προοπτικές τους για ανάπτυξη. Η αποδοχή των κοινωνιών σε εφαρμογές τέτοιου τύπου θα πρέπει να διερευνηθεί, διότι πέραν των ανησυχιών για θέματα ασφάλειας, εκφράζονται προβληματισμοί ότι η ανάπτυξη τεχνολογιών

CCS προωθείται από τη βιομηχανία του άνθρακα με σκοπό τη συνέχιση εκμετάλλευσης των ορυκτών καυσίμων.

Όσον αφορά τα σενάρια για τη χρήση τεχνολογιών CCS στην Ελλάδα, αυτά αναπτύχθηκαν με βάση το μοντέλο PRIMES, για το οποίο υπάρχει κριτική ότι εμφανίζει σημαντικές αβεβαιότητες. Πρόκειται για ένα πολύπλοκο μαθηματικό μοντέλο το οποίο δεν είναι σίγουρο ότι προσεγγίζει τις μελλοντικές προοπτικές καλύτερα από ότι ένα απλό. Υποθέτει χαμηλές τιμές άνθρακα το 2030 έναντι των σημερινών, με αποτέλεσμα να ενισχύεται η ανταγωνιστικότητα της τεχνολογίας CCS, σε σύγκριση για παράδειγμα με τις ΑΠΕ, υπερεκτιμώντας το μελλοντικό ρόλο της τεχνολογίας. Επίσης, το μοντέλο δεν υπολογίζει κάποιο εξωτερικό κόστος πέραν της απασχόλησης, η οποία λογίζεται ως θετική εξωτερικότητα (η μη εφαρμογή CCS εκτιμάται ότι θα οδηγήσει σε απώλεια 300.000 θέσεων εργασίας στην Ευρώπη, από το κλείσιμο των ορυχείων και των υψηλότερων τιμών ενέργειας), (Bryngelsson and Hansson, 2009).

Η περαιτέρω ερευνητική προσπάθεια, είναι αναγκαία για να προκύψουν απαντήσεις στα παραπάνω θέματα.

## 7.2 Προτάσεις

Οι πολιτικές και τα μέτρα της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την επίτευξη των ενεργειακών στόχων για το 2020 είναι φιλόδοξες. Εκτιμάται ότι θα συνεχίσουν να έχουν αποτελέσματα και μετά το 2020 συμβάλλοντας στη μείωση των εκπομπών κατά περίπου 40% έως το 2050, αλλά δεν επαρκούν για την επίτευξη του στόχου που έχει τεθεί για μείωση των εκπομπών - έως το 2050-, κατά 80-95% συγκριτικά με τα επίπεδα του 1990.

Για την Ελλάδα το πλαίσιο της πολιτικής «20-20-20» εξειδικεύεται στο τμήμα των εκπομπών με στόχο, +10% σε σχέση με το έτος βάσης (108εκατ. t) ή -12% σε σχέση με το 2005 (134εκατ. t) ή -30% σε σχέση με την αναμενόμενη εξέλιξη το 2020 (175 εκατ. t).

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων μέχρι το 2020, αλλά και για μια καλύτερα προετοιμασμένη χώρα για την μετέπειτα εποχή διατυπώνονται οι παρακάτω προτάσεις:

- Αποτελεί κοινή διαπίστωση ότι η εξοικονόμηση ενέργειας και παράλληλα η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης είναι η πιο οικονομική μορφή μείωσης των εκπομπών. Οι βασικές συνιστώσες για την επίτευξη εξοικονόμησης ενέργειας είναι, η μεταβολή της καταναλωτικής συνείδησης του πολίτη ώστε να μην σπαταλά ενέργεια και οι επενδύσεις για την αναβάθμιση του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού, με στόχο

μικρότερη κατανάλωση ή/και αποδοτικότερη χρήση της ενέργειας. Οι προσπάθειες για εξοικονόμηση ενέργειας εμφανίζουν δυσκολίες διότι στηρίζονται σε μεμονωμένες δράσεις, με αποτέλεσμα αφενός να είναι μικρής κλίμακας και αφετέρου να απαιτούν μεγαλύτερες οικονομικές δαπάνες για την επίτευξή τους. Για την άρση των δυσκολιών προτείνεται η ενίσχυση της παρέμβασης της Κυβέρνησης με προγράμματα οικονομικής ενίσχυσης (όπως για παράδειγμα το Εξοικονομώ κατ' οίκον) και ενημέρωσης, καθώς η αναβάθμιση του θεσμικού πλαισίου ώστε να ευνοείται η λειτουργία Εταιρειών Ενεργειακών Υπηρεσιών (ESCO) οι οποίες θα αναλαμβάνουν (ή ακόμα και θα χρηματοδοτούν επωφελούμενες από την επιτυγχανόμενη εξοικονόμηση) την υλοποίηση των ενεργειακών παρεμβάσεων.

- Θα πρέπει να θεσπιστούν κίνητρα για την προσέλκυση ιδιωτικών κεφαλαίων για έργα ΑΠΕ μεγάλης κλίμακας, ενώ παράλληλα θα πρέπει να εξορθολογιστεί η τιμολογιακή πολιτική, αλλά και το πλαίσιο επιδοτήσεων ώστε να εξασφαλιστεί η βιωσιμότητά του.
- Λόγω των σημαντικών αποθεμάτων λιγνίτη της χώρας και της συμβολής του στην ενεργειακή ασφάλεια, θα πρέπει να αναθεωρηθεί ο Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός ώστε να αναβαθμιστούν οι επιλογές εφαρμογών τεχνολογιών CCS.
- Η Ευρωπαϊκή Ένωση πρόκειται να επενδύσει περίπου 1 δισ. ευρώ έως και το 2020 σε δραστηριότητες Έρευνας και Ανάπτυξης για τη βελτίωση των υφιστάμενων τεχνολογιών CCS (απόδοση-κόστος), καθώς και στην έρευνα νέων τεχνολογιών. Η Ελλάδα έχει αναπτύξει σημαντική ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα, έχει λόγω των κοιτασμάτων λιγνίτη άμεσο ενδιαφέρον και θα ήταν σημαντικό να αξιοποιήσει τα ευρωπαϊκά κονδύλια.
- Η ενσωμάτωση της Οδηγίας 2009/31/ΕΚ σχετικά με την αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα σε γεωλογικούς σχηματισμούς στο εθνικό δίκαιο. Πέραν του ότι η ενσωμάτωση αποτελεί υποχρέωση της χώρας (η προθεσμία έληξε στις 25/6/2011), με τη θέσπιση του νομικού πλαισίου για την περιβαλλοντικά ασφαλή αποθήκευση του CO<sub>2</sub>, διασφαλίζονται οι προϋποθέσεις για την έρευνα της καταλληλότητας των χώρων αποθήκευσης στην ελληνική επικράτεια.
- Μια ενδιαφέρουσα προοπτική για την Ελλάδα αποτελεί η μεταφορά και αποθήκευση των εγχώρια παραγόμενων ποσοτήτων CO<sub>2</sub> στο εξωτερικό. Η μεταφορά θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί είτε μέσω ενός διακρατικού δικτύου αγωγών ή από ειδικά διαμορφωμένα πλοία. Οι θαλάσσιες μεταφορές CO<sub>2</sub> θα μπορούσαν να μετατραπούν σε μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα υπόθεση για την ελληνική ναυτιλία δημιουργώντας

νέες αγορές. Η Ρουμανία για παράδειγμα θα μπορούσε να αποτελεί χώρα αποθήκευσης CO<sub>2</sub> μέσω αγωγών, διότι εμφανίζει σημαντικές δυνατότητες αποθήκευσης λόγω των εξαντλημένων κοιτασμάτων υδρογονανθράκων που διαθέτει.

- Η Ελλάδα έχει συμμετάσχει σε αρκετά ερευνητικά προγράμματα με αντικείμενο τις τεχνολογίες CCS, καθώς και θέματα που αφορούν τους χώρους αποθήκευσης. Θα ήταν σημαντική η σύσταση ενός ερευνητικού φορέα υπό την αιγίδα της Πολιτείας με συμμετοχή ερευνητικών κέντρων, πανεπιστημίων και εταιρειών με ενδιαφέρον στο αντικείμενο. Ο φορέας θα συγκέντρωνε τα αποτελέσματα και την εμπειρία από τη συμμετοχή της χώρας στα διάφορα προγράμματα, θα μπορούσε να συμμετάσχει σε νέα, θα διεξήγαγε έρευνα στην Ελλάδα και θα αποτελούσε το συμβουλευτικό όργανο της Πολιτείας. Το ρόλο του φορέα θα μπορούσε να αναλάβει το Ινστιτούτο Τεχνολογίας & Εφαρμογών Στερεών Καυσίμων (Ι.Τ.Ε.Σ.Κ.) το οποίο έχει σημαντική εμπειρία στο συγκεκριμένο τομέα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Audus H., «Technologies for CO<sub>2</sub> Emission reduction», IEA Greenhouse Gas R&D Programme, presented at the International Conference on Sustainable Future of the Global System, Tokyo (1999).
- Barker T., I. Bashmakov, L. Bernstein, J. E. Bogner, P. R. Bosch, R. Dave, O. R. Davidson, B. S. Fisher, S. Gupta, K. Halsnæs, G.J. Heij, S. Kahn Ribeiro, S. Kobayashi, M. D. Levine, D. L. Martino, O. Masera, B. Metz, L. A. Meyer, G.-J. Nabuurs, A. Najam, N. Nakicenovic, H. -H. Rogner, J. Roy, J. Sathaye, R. Schock, P. Shukla, R. E. H. Sims, P. Smith, D. A. Tirpak, D. Urge-Vorsatz, D. Zhou,; «Technical Summary. In: Climate Change 2007: Mitigation». Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (2007).
- Biggs S., «Sequestering Carbon from Power Plants: The Jury is Still Out». M.S. Thesis, Technology and Policy Program, MIT, (2000).
- Bryngelsson Mårten and Hansson Anders. «Energy policy on shaky ground? A study of CCS-scenarios». Energy Procedia 1 (2009) 4673–4680
- Burchell T.D., Judkins R.R., «Passive CO<sub>2</sub> Removal using a Carbon Fiber Composite Molecular Sieve», Energy Convers. Mgmt. 37, (1996).
- Corless Virginia, Erlend Fjøsna, Jan Havlik, Eivind Hoff, Derek Taylor, Gøril Tjetland, Ilias Vazaios. «A bridge to a greener Greece. A realistic assessment of CCS potential». Bellona Environmental CCS Team (BEST). The Bellona Foundation, Athens, Greece (2010).
- David J. «Economic Evaluation of Leading Technology Options for Sequestration of Carbon Dioxide», M.S. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2000.
- EU GeoCapacity. Vangkilde-Pedersen Thomas, GEUS (Editor). «Assessing European Capacity for Geological Storage of Carbon Dioxide». WP2 Report, Storage capacity.. Geological Survey of Denmark and Greenland. (2009)
- Figueroa D. Jose, Timothy Fout, Sean Plasynski, Howard McIlvried, Rameshwar D. Srivastava. «Advances in CO<sub>2</sub> capture technology. The U.S. Department of Energy's Carbon Sequestration Program». International journal of greenhouse gas control 2 (2007).
- Freund P. «Technological Responses to Climate Change in the Energy Sector», IEA Greenhouse Gas R&D Programme. World Energy Council. 18th Congress, Buenos Aires,

October, 2001.

- Freund P., Ormerod W.G., «Progress towards Storage of Carbon Dioxide», *Energy Convers. Mgmt.* 38 (Suppl.), pp. S199-S204 (1997)
- GESTCO Project: «Geological Storage of CO<sub>2</sub> from Combustion of Fossil Fuel», 2004. European Union Fifth Framework Programme for Research & Development, second ed. Project No. ENK-CT-1999-00010. Summary Report.
- Global CCS Institute 2011, «The global status of CCS: 2011», Canberra, Australia.
- Heddle, G., Herzog, H., Klett, M., Massachusetts Institute of Technology, Laboratory for Energy and Environment, «The Economics of CO<sub>2</sub> Storage» August 2003.
- Herzog H., Drake E., Adams E., «CO<sub>2</sub> Capture, Reuse, and Storage Technologies for Mitigating Global Climate Change - A White Paper». Massachusetts Institute of Technology, Energy Laboratory Report, 1997.
- Herzog H., Eliasson B., Kaarstad O. «Capturing greenhouse gases». *Scientific American* 282(2):72-79 (2000).
- Herzog, H.J. and D. Golomb, «Carbon Capture and Storage from Fossil Fuel Use», in C.J. Cleveland (ed.), *Encyclopedia of Energy*, Elsevier Science Inc., New York, pp 277-287, (2004).
- International Energy Agency (IEA). «CO<sub>2</sub> Emissions from fuel combustion Highlights». IEA Publications, Luxembourg (2011a).
- International Energy Agency (IEA). «Key World Energy Statistics». Paris (2011b).
- International Energy Agency (IEA). Greenhouse Gas R&D Programme «Carbon Dioxide Disposal from Power Plants», 2001b.
- International Energy Agency (IEA). Greenhouse Gas R&D Programme, «Carbon Dioxide Capture and Storage, Department of Trade and Industry». September (2000).
- International Energy Agency (IEA). Greenhouse Gas R&D Programme. «Carbon Dioxide Utilisation» (1995).
- International Energy Agency (IEA). Greenhouse Gas R&D Programme. «Putting Carbon back into the Ground». 2001a.
- International Energy Agency (IEA). Greenhouse Gas R&D Programme. «Ocean storage of CO<sub>2</sub>» (2002).
- IPCC, 2001: «Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change»

[Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.

- IPCC, 2005: «IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage». Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.
- IPCC, 2007: «Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change» [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Kaldellis J.K., N. Mantelis, D. Zafirakis., «Evaluating the ability of Greek power stations to comply with the obligations posed by the second National Allocation Plan concerning carbon dioxide emissions». Fuel 90 (2011) 2884–2895.
- Khan Iftikhar. «CO<sub>2</sub> Storage Technologies Overview». Boilers and Combustion Team. RWE Power International. (August 2006)
- Kohlmann J., Zevenhoven R., «The removal of CO<sub>2</sub> from flue gases using magnesium silicates, in Finland», Presented at the 11<sup>th</sup> International Conference on Coal Science (ICCS-11), San Francisco, September 2001.
- Koljonen T., Siikavirta H., Zevenhoven R. «CO<sub>2</sub> Capture, Storage and Utilization in Finland. VVT Processes. Systems and Models». Climtech Programme (2002).
- Koukouzas N., F. Ziogou, V. Gemeni. «Preliminary assessment of CO<sub>2</sub> geological storage opportunities in Greece». International Journal of Greenhouse Gas Control 3 (2009) 502–513.
- Koukouzas N., Ziogou F., Gemeni V. «Cost of pipeline-based CO<sub>2</sub> transport and geological storage in saline aquifers in Greece». Energy Procedia 4 (2011) 2978–2983
- Marion John, Nsakala ya Nsakala, Griffin Timothy, Bill Alain. «Controlling Power Plant CO<sub>2</sub> Emissions: A Long Range View». Power Plant Laboratories. USA (2000).
- Meisen A., Shuai X. «Research and Development issues in CO<sub>2</sub> Capture». Energy Convers. Mgmt. 38. pp. 37 - 42 (1997)
- National Inventory Report 2012. «Annual Inventory Submission under the Convention and the Kyoto Protocol for Greenhouse and other Gases for the years 1990-2010». Ministry of Environment Energy and Climate Change. April 2012.

- Pachauri R.K. and Reisinger, A. (Eds.), Core Writing Team. «Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change». IPCC, Geneva, Switzerland. pp 104. The AR4 Synthesis Report (2007).
- Riemer P.W., Ormerod W.G. «International perspectives and the results of carbon dioxide capture disposal and utilisation studies», Energy Convers. Mgmt. 36, No 6-9, pp. 813-818 (1995)
- Riemer P., W., «Greenhouse Gas Mitigation Technologies. An Overview of the CO<sub>2</sub> Capture, Storage and Future Activities of the IEA Greenhouse Gas R&D Programme», Energy Convers. Mgmt. 37 (1996). .
- Serpa J, Morbee J, Tzimas E. «Technical and economic characteristics of a CO<sub>2</sub> transmission pipeline infrastructure». European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy, 2011.
- Singh D., Croiset E., Douglas P.L., Gouglas M.A., «Techno-economic study of CO<sub>2</sub> capture from an existing coal-fired power plant: MEA scrubbing vs. O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> recycle combustion», Energy Convers. Mgmt., 44 (2003).
- Skovholt Otto, «CO<sub>2</sub> Transportation system». Statoil R&D Centre. Norway. Energy Convers. Mgmt Vol. 34, No. 9-11, pp. 1095-1103, 1993.
- Spliethoff H., «Power Generation from Solid Fuels», Springer , 2010.
- Svensson Rickard, Odenberger Mikael, Johnsson Filip, Stromberg Lars. «Transportation systems for CO<sub>2</sub>—application to carbon capture and storage». Energy Conversion and Management 45, 2343–2353 (2004).
- Thambimuthu K., Davison J., Gupta M., «CO<sub>2</sub> Capture and reuse». IPCC workshop on carbon dioxide capture and storage (2009).
- Turkenburg W.C. «Sustainable development, climate change and carbon dioxide removal (CDR)». Convers. Mgmt. 38 (1997).
- Turkenburg W.C., Hendriks C.A., «Fossil Fuels in a sustainable energy supply: the significance of CO<sub>2</sub> removal». A memorandum at the request of the Ministry of Economic Affairs, The Hague, Utrecht, 1999.
- U.S. Energy Information Administration (EIA). «International Energy Outlook 2011» (IEO2011).
- UK Department of Trade and Industry, Advanced Power Generation Technology Forum, «Carbon Dioxide Capture and Storage». Report of DTI International Service Mission to the USA and Canada, 2002.



- Vatalis I. Konstantinos, Aatto Laaksonenb, George Charalampidesa, Nikolas P. Benetisa. «Intermediate technologies towards low-carbon economy. The Greek zeolite CCS outlook into the EU commitments». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 3391–3400.
- Walsh J., «The Future of the Fossil fuels», presented at the Annual General Meeting of the Canadian Association for the Club of Rome', June 1999, published in the proceedings of the Association, Series 2, No. 2. (1999)
- Wilson P., Mould S., Davison J., «Reducing CO<sub>2</sub> emissions from existing Power Stations», IEA Greenhouse Gas R&D Programme (2009)
- Wong S. and Bioletti R. «Carbon Dioxide Separation Technologies». Carbon & Energy Management, Alberta Research Council Inc.: Edmonton, Alberta, 2002
- Wood Sam and Cowie Annette. Research and Development Division, State Forests of New South Wales. IEA Bioenergy Task 38. «A Review of Greenhouse Gas Emission Factors for Fertiliser Production» (2004).
- Bill A., Griffin T, Marion, J. and Nsakala N., «Controlling Power Plant CO<sub>2</sub> Emissions: A Long range View», Conference Proceedings, Power Gen., Brussels, Belgium, 2001.
- Επιτροπή Μελέτης των Επιπτώσεων της Κλιματικής Αλλαγής (ΕΜΕΚΑ). «Οι περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην Ελλάδα». Τράπεζα της Ελλάδος (2011).
- Ευρωπαϊκή Επιτροπή. «Ενεργειακός χάρτης πορείας για το 2050». Βρυξέλλες. 15.12.2011.
- Ίδρυμα Οικονομικών & Βιομηχανικών Ερευνών (IOBE) - Εργαστήριο Υποδειγμάτων Οικονομίας – Ενέργειας – Περιβάλλοντος (E3M-Lab) του ΕΜΠ. «Μακροχρόνιες ενεργειακές Προοπτικές: Οι προκλήσεις για τον ενεργειακό τομέα στην Ελλάδα με ορίζοντα το 2050». Ιούνιος 2011.
- Κακαράς Ε., Δουκέλης Α, Γιαννακόπουλος Δ., Κουμανάκος Α. «Τεχνολογικές Δυνατότητες Μείωσης των Εκπομπών CO<sub>2</sub> Στον Τομέα της Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ορυκτά Καύσιμα». Heleco '05, ΤΕΕ, Αθήνα 3-6 Φεβρουαρίου 2005.
- Κούκουζας Ν. «Τεχνολογικό δυναμικό για τη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα-δυνατότητες-προοπτικές των ελληνικών επιχειρήσεων». Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, Ινστιτούτο Τεχνολογίας & Εφαρμογών Στερεών Καυσίμων. Πτολεμαΐδα (2007).
- Κούκουζας Ν., Στογιάννης Π., Κλήμαντος Π., Κακαράς Εμ.: «Αποθήκευση Διοξειδίου του Άνθρακα σε Υπόγειους Γεωλογικούς Σχηματισμούς», Εθνικό Κέντρο Έρευνας και

Τεχνολογικής Ανάπτυξης, Ινστιτούτο Τεχνολογίας και Εφαρμογών Στερεών Καυσίμων. Σύγχρονη Τεχνική Επιθεώρηση, 164, 52-57 (2005).

- Κουμανάκος Κ. Αντώνιος. «Θερμικά κυκλώματα με διατάξεις δέσμευσης του CO<sub>2</sub> για θερμοηλεκτρικούς σταθμούς που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα». ΕΜΠ. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. Διδακτορική διατριβή. Αθήνα (2009).
- ΟΔΗΓΙΑ 2009/31/ΕΚ της 23ης Απριλίου 2009, σχετικά με την αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα σε γεωλογικούς σχηματισμούς και για την τροποποίηση της οδηγίας 85/337/ΕΟΚ του Συμβουλίου, των οδηγιών του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου 2000/60/ΕΚ, 2001/80/ΕΚ, 2004/35/ΕΚ, 2006/12/ΕΚ και 2008/1/ΕΚ, και του κανονισμού (ΕΚ) αριθ. 1013/2006.
- Προύντζου Α. Αναστασία. «Διερεύνηση Αποδοτικότητας Μέτρων για την Αντιμετώπιση της Κλιματικής Αλλαγής». Διπλωματική Εργασία. Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα, Μάρτιος 2012.
- ΥΠΕΚΑ. «Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός. Οδικός Χάρτης για το 2050». Μάρτιος 2012.
- ΥΠΕΚΑ. «Ο Σχεδιασμός για την Επίτευξη των Στόχων του 20-20-20: ΑΠΕ». Δελτίο Τύπου. Αθήνα, 21 Ιουνίου 2010.

Διαθέσιμο στην: <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=389&sni%5B524%5D=388>

## ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

- European Pollutant Release and Transfer Register (E-PRTR).  
Διαθέσιμο στην: <http://prtr.ec.europa.eu/PollutantReleases.aspx>
- UNEP/GRID-Arendal. Greenhouse effect. UNEP/GRID-Arendal Maps and Graphics Library. 2002.  
Διαθέσιμο στην: [http://maps.grida.no/go/graphic/greenhouse\\_effect](http://maps.grida.no/go/graphic/greenhouse_effect).
- ΥΠΕΚΑ. ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ. 2009.  
Διαθέσιμο στην: <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=226&language=el-GR>

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ