

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# Κατακράτηση και Εναπόθεση Άνθρακα – Σύγκριση Μεθόδων

Υπεύθυνος:  
Καθ. ΧΡΗΣΤΟΦΗΣ ΚΟΡΩΝΑΙΟΣ

Α.Π.Θ. - ΤΜΗΜΑ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ  
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Αριθμ. Εισαγ.:... 1589  
Ημερομηνία:... 19/4/06

αλ

ΚΟΥΝΤΑΝΗ ΙΩΑΝΝΑ Α.Ε.Μ. 156  
ΟΥΜΠΑΪΛΗΣ ΗΛΙΑΣ Α.Ε.Μ.182

1. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ	2. ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ	3. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ & ΧΡΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	4.
5. Υπεύθυνος: Καθ. Χριστοφής Κορωναίος		6. Αρμόδιος Παρακολούθησης:	
7. Τίτλος εργασίας: ΚΑΤΑΚΡΑΤΗΣΗ ΚΑΙ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ			
8. Ονοματεπώνυμο φοιτητή (-ών): ΚΟΥΝΤΑΝΗ ΙΩΑΝΝΑ ΟΥΜΠΙΑΪΔΗΣ ΗΛΙΑΣ		9. Αριθμός μητρώου: 156 182	
10. Θεματική περιοχή:	11. Ημερομηνία έναρξης:	12. Ημερομηνία παράδοσης:	13. Αριθμός εργασίας:
14. Περιλήψη: Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της κατακράτησης και εναπόθεσης άνθρακα, καθώς και η σύγκριση των διάφορων μεθόδων με τις οποίες επιτυγχάνεται. Αρχικά στο 1 <sup>ο</sup> κεφάλαιο αναφέρονται συνοπτικά οι λόγοι οι οποίοι οδηγούν στην αναγκαιότητα της κατακράτησης και εναπόθεσης του άνθρακα και παρουσιάζονται οι μέθοδοι με τις οποίες θα ασχοληθούμε στην εργασία. Στο 2 <sup>ο</sup> κεφάλαιο εξετάζεται η έννοια της εναπόθεσης, οι λόγοι που την καθιστούν σημαντική, παραθέτονται τα απαραίτητα χαρακτηριστικά ενός συστήματος εναπόθεσης, παρουσιάζονται οι κύκλοι του άνθρακα και συγκρίνεται η μέθοδος εναπόθεσης με άλλες μεθόδους μετριασμού του άνθρακα. Στο 3 <sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέθοδοι διαχωρισμού και κατακράτησης του ανθρωπογενούς CO <sub>2</sub> . Στα κεφάλαια 4, 5, 6, 7 και 8 παρουσιάζονται η ωκεάνια εναπόθεση, η εναπόθεση σε χερσαία οικοσυστήματα, η εναπόθεση σε γεωλογικούς σχηματισμούς, η εναπόθεση μέσω προηγμένων βιολογικών διαδικασιών και η εναπόθεση μέσω προηγμένων χημικών προσεγγίσεων αντίστοιχα. Στη συνέχεια, στο 9 <sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται μια σύγκριση των κύριων μεθόδων εναπόθεσης του άνθρακα με βάση τα πλεονεκτήματα, τις πιθανές προκλήσεις, τη δυνατότητα εφαρμογής, την τεχνική ωριμότητα, τη διαθεσιμότητα των στοιχείων, τη βιομηχανική αποδοχή και τη συμβατότητα με τα συστήματα παραγωγής ενέργειας της κάθε μεθόδου. Επίσης, συγκρίνονται οι κύριες επιλογές της γεωλογικής εναπόθεσης βάση της σχετικής χωρητικότητας, του σχετικού κόστους, της ακεραιότητας της αποθήκευσης και της τεχνικής εφικτότητας της κάθε επιλογής. Συγκρίνονται, ακόμα, οι κύριες επιλογές της ωκεάνιας εναπόθεσης με βάση την ανάπτυξη που απαιτείται, το κόστος, τις περιβαλλοντικές επιδράσεις και τη διαρροή στην ατμόσφαιρα της κάθε επιλογής. Επιπλέον, παρουσιάζονται διάφορα κριτήρια εφικτότητας για την αξιολόγηση των μεθόδων άμεσης χρήσης και συγκρίνεται η αποθήκευση και το κόστος των προγραμμάτων ενέργειας δασών και βιομάζας. Τέλος, στο 10 <sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κόστη της κατακράτησης και εναπόθεσης του άνθρακα από την άποψη τεσσάρων λειτουργιών: της κατακράτησης, της συμπίεσης, της μεταφοράς και της έγχυσης.		15. Στοιχεία εργασίας: Αρ. Σελίδων: 186 Αρ. Εικόνων: 61 Αρ. Διαγραμμάτων: Αρ. Πινάκων: 30 Αρ. Παραρτημάτων: Αρ. Παραπομπών:	
		16. Λέξεις κλειδιά: Ανθρακας Εκπομπές Κατακράτηση Εναπόθεση Προστασία Περιβάλλοντος	
		17. Σχόλια:	
18. Συμπληρωματικές παρατηρήσεις:		19. Βαθμός:	

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
2. ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ.....	6
2.1. Ο Συνολικός και των Απολιθωμένων Καυσίμων, κύκλοι του άνθρακα .....	8
2.2. Κατάσταση που Επικρατεί στην Ελλάδα .....	10
2.3. Προσεγγίσεις για την Εναπόθεση του Άνθρακα .....	15
2.4. Μέθοδοι Εναπόθεσης του Άνθρακα.....	18
3. ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΚΡΑΤΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ	20
3.1. Τρέχουσες και Πιθανές Επιστημονικές και Τεχνολογικές Απαιτήσεις και Ικανότητες .....	24
3.1.1. Χημική και Φυσική Απορρόφηση του CO <sub>2</sub> μέσω Διαλυτών .....	25
3.1.2. Φυσική και Χημική Προσρόφηση του CO <sub>2</sub> σε Στερεά.....	28
3.1.3. Απόσταξη Χαμηλής Θερμοκρασίας.....	29
3.1.4. Μεμβράνες Διαχωρισμού Αερίου.....	30
3.2. Επεξεργασία, Μετατροπή και Μεταφορά Προϊόντων .....	32
3.3. Προηγμένα Σχέδια – Προγράμματα .....	33
3.4. Εξισορρόπηση των Απαιτήσεων και των Ικανοτήτων .....	33
4. ΩΚΕΑΝΙΑ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ .....	35
4.1. Άμεση Έγχυση του CO <sub>2</sub> .....	37
4.2. Ενίσχυση της Φυσικής Εναπόθεσης του Άνθρακα στον Ωκεανό .....	43
4.3. Μακροπρόθεσμα, Καινοτόμα Προγράμματα για Ωκεάνια Εναπόθεση του CO <sub>2</sub> .....	47
4.4. Συμπεράσματα.....	48
5. ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΕ ΧΕΡΣΑΙΑ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	49
5.1. Χερσαία Οικοσυστήματα .....	51
5.2. Δυνατότητες για Εναπόθεση Άνθρακα.....	52
5.3. Σημερινές Ικανότητες.....	56
5.4. Επιστημονικό και Τεχνολογικό Μοντέλο Χερσαίας Εναπόθεσης .....	57
5.4.1. Στόχοι .....	58
5.4.2. Στρατηγικές .....	61
5.4.3. Ανάγκες για Έρευνα και Ανάπτυξη.....	67
6. ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΤΟΥ CO <sub>2</sub> ΣΕ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ .....	72
6.1. Ικανότητα Γεωλογικών Σχηματισμών, Κατάλληλων για Εναπόθεση.....	73
6.2. Αξιολόγηση των Τρεχουσών Ικανοτήτων και των Ερευνητικών Αναγκών ....	76
6.2.1. Δυνατότητες για Εναπόθεση του CO <sub>2</sub> σε Σχηματισμούς Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου .....	76
6.2.2. Η Εναπόθεση του CO <sub>2</sub> σε Υδάτινους Σχηματισμούς.....	83
6.2.3. Ευκαιρίες για Εναπόθεση CO <sub>2</sub> σε Σχηματισμούς Άνθρακα.....	86
6.3. Θεμελιώδεις Ερευνητικές Ανάγκες για τους Γεωλογικούς Σχηματισμούς.....	88
6.4. Προηγμένες Έννοιες για Εναπόθεση στους Γεωλογικούς Σχηματισμούς .....	94
6.5. Γενικές Προτεραιότητες της Έρευνας .....	95
7. ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ .....	97
7.1. Τεχνολογική Υποστήριξη για την Κατακράτηση του Άνθρακα .....	98
7.2. Εναπόθεση στις Μειωμένες Ενώσεις Άνθρακα.....	101
7.3. Αυξανόμενη Φυτική Παραγωγικότητα .....	104
7.4. Εναλλακτικά Ανθεκτικά Υλικά .....	109
7.5. Περίληψη και Συμπεράσματα .....	113
8. ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΧΗΜΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ.....	114
8.1. Χημικές Διαδικασίες για την Εναπόθεση.....	115

8.2. Προώθηση των Χημικών Τεχνολογιών.....	121
8.3. Γενικά .....	123
9. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΤΟΥ CO <sub>2</sub> .....	126
9.1. Γενική Σύγκριση των Μεθόδων Εναπόθεσης του CO <sub>2</sub> .....	126
9.2. Σύγκριση των Επιλογών Αποθήκευσης για Κάθε Μέθοδο Εναπόθεσης .....	136
9.3. Προγράμματα Ενέργειας Δασών και Βιομάζας: Συγκρίσεις της αποθήκευσης και του κόστους του CO <sub>2</sub> .....	149
10. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ.....	165
11. ΣΥΝΟΨΗ .....	172
12. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	184



# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι περισσότερες ανθρωπογενείς (οι σχετιζόμενες με ανθρώπινες δραστηριότητες) εκπομπές άνθρακα στην ατμόσφαιρα είναι αποτέλεσμα της καύσης απολιθωμένων καυσίμων για την οικονομική παραγωγή ενέργειας. Αν οι απαιτήσεις για ενέργεια συνεχίσουν να αυξάνονται, είναι πιθανό ο μόνος τρόπος για να μπορούν τα απολιθωμένα καύσιμα να χρησιμοποιούνται για μεγάλης κλίμακας παραγωγή ενέργειας να είναι μέσω της ανάπτυξης και εφαρμογής της κατακράτησης και εναπόθεσης του άνθρακα.

Δεδομένου του όγκου των ανθρακικών εκπομπών που πρέπει να μειωθεί ώστε να σταθεροποιηθεί η συγκέντρωση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub>, πολλαπλές προσεγγίσεις σχετικά με τον χειρισμό του άνθρακα (βελτιωμένη ενεργειακή αποδοτικότητα και καθαρά ενεργειακά συστήματα) θα χρειαστούν. Όλες οι πιθανές σημαντικές τεχνολογικές επιλογές πρέπει να εξερευνηθούν.

Προβλέψεις για την συνολική ενέργεια η οποία θα χρησιμοποιείται τον επόμενο αιώνα, δείχνουν μια συνεχή αύξηση των ανθρακικών εκπομπών και της περιεκτικότητας του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, εκτός και αν γίνουν τεράστιες αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο παράγεται και χρησιμοποιείται η ενέργεια (συγκεκριμένα, στον τρόπο που χειρίζεται ο άνθρακας). Για παράδειγμα, το «Intergovernmental Panel on Climate Change» (IPCC) προβλέπει στο ενεργειακό σενάριο του 1995, το «business as usual» ότι οι μελλοντικές συνολικές εκπομπές του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα, θα αυξηθούν από 7,4 δισεκατομμύρια τόνους άνθρακα (GtC) το χρόνο (που ήταν το 1997) σε περίπου 26 GtC το χρόνο μέχρι το 2100. Επίσης το IPCC προβλέπει διπλασιασμό της περιεκτικότητας του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα, μέχρι τα μέσα του επόμενου αιώνα και ακόμη μεγαλύτερη αύξηση τα μετέπειτα χρόνια. Μολονότι οι συνέπειες των αυξανόμενων επιπέδων του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα είναι αβέβαιες, πολλοί επιστήμονες συμφωνούν ότι ο διπλασιασμός της περιεκτικότητάς του, μπορεί να έχει πολλές σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Ένας τρόπος για χειρισμό του άνθρακα είναι να χρησιμοποιηθεί η ενέργεια πιο αποτελεσματικά, ώστε να μειωθούν οι ανάγκες για μια τεράστια ανθρακική πηγή απολιθωμένων καυσίμων. Ένας άλλος τρόπος είναι η αύξηση της χρήσης τεχνολογιών καυσίμων με χαμηλή ή καθόλου περιεκτικότητα σε άνθρακα (πυρηνική ενέργεια και ανανεώσιμες πηγές, όπως η ηλιακή ενέργεια, η αιολική και η βιομάζα).

Η τρίτη και νεώτερη «μέθοδος χειρισμού» του άνθρακα είναι η κατακράτηση και η ασφαλής αποθήκευση του άνθρακα που εκπέμπεται από το συνολικό ενεργειακό σύστημα (εναπόθεση του άνθρακα, «carbon sequestration»). Η μέθοδος αυτή είναι πραγματικά ριζοσπαστική για τα υπάρχοντα πλαίσια της τεχνολογίας. Η ανάπτυξη του υπάρχοντος συστήματος βασισμένου στην απολιθωμένη ενέργεια, έχει αρχικά ξεκινήσει από την Βιομηχανική Επανάσταση. Για περίπου 200 χρόνια, η ανάπτυξη της ενεργειακής τεχνολογίας είχε επικεντρωθεί στη μείωση του κόστους και γενικά στην αύξηση της αποτελεσματικότητας, με σκοπό την στήριξη της οικονομικής διαθεσιμότητας και του υψηλού ενεργειακού περιεχομένου των απολιθωμένων καυσίμων. Ο γαιάνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο αποδείχθηκαν ότι είναι ελκυστικές πηγές ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρισμού, για βιομηχανικές διεργασίες, για οχήματα μεταφοράς και για εμπορικές και οικιακές εφαρμογές. Καθώς η χρήση «απολιθωμένης ενέργειας» αυξανόταν και οι δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις γίνονταν εμφανείς, αναπτύχθηκε επίσης ενεργειακή τεχνολογία ώστε να τις ελαχιστοποιήσει. Ωστόσο, αυτή η τεράστια τεχνολογική ανάπτυξη είχε θεωρήσει ότι η ελεύ-

θερη «διαρροή» του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα ήταν περιβαλλοντικά ακίνδυνη. Μόνο πρόσφατα η αυξανόμενη περιεκτικότητα του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα έχει διαπιστωθεί ότι αποτελεί ένα σημαντικό περιβαλλοντικό πρόβλημα. Οι συνέπειες είναι ότι έχει αναπτυχθεί ένα περίπλοκο, στενά συνδεδεμένο ενεργειακό σύστημα, σχεδιασμένο περίπου κατά τη διάρκεια 200 ετών για οικονομία και αποτελεσματικότητα, αλλά όχι για την κατακράτηση και την εναπόθεση του CO<sub>2</sub>.

Ο σκοπός της εναπόθεσης του άνθρακα είναι να συγκρατηθούν οι ανθρωπογενείς εκπομπές του άνθρακα, ώστε να μη φθάσουν στην ατμόσφαιρα. Αυτό γίνεται με την κατακράτηση, την απομόνωση και την ασφαλή αποθήκευσή τους. Κάθε διαδικασία εναπόθεσης του άνθρακα πρέπει να είναι ασφαλής, περιβαλλοντικά αποδεκτή, αποτελεσματική και οικονομική. Επιπροσθέτως, πρέπει να είναι αποδεκτή από το κοινό. Δεδομένου του όγκου του άνθρακα που πρέπει να μειωθεί ώστε να σταθεροποιηθεί η ατμόσφαιρα, η κατακράτηση και η εναπόθεση μπορούν να είναι ένα σπουδαίο εργαλείο για τη μείωση των εκπομπών στην ατμόσφαιρα από τα απολιθωμένα καύσιμα. Στην ουσία, η εναπόθεση μπορεί να είναι αναγκαία για τη συνεχή, μεγάλης κλίμακας χρήση των απολιθωμένων καυσίμων. Θα επιτρέψει μεγαλύτερη ευλυγισία στις μελλοντικές πρωταρχικές πηγές ενέργειας. Επίσης, μπορεί να αποφέρει και άλλα πλεονεκτήματα, όπως η παραγωγή εμπορικών προϊόντων (π.χ. υλικά κατασκευής και πλαστικά), οι βελτιωμένες γεωργικές πρακτικές οι οποίες μπορούν να μειώσουν την ηλιακή διάβρωση και να αυξήσουν την παραγωγή τροφίμων, η αποκατάσταση των υγροτόπων η οποία θα βοηθήσει στην διατήρηση της «άγριας ζωής» και θα προστατέψει τις εστίες, η ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου και μεθανίου και η αύξηση της βιοποικιλίας.

## 2. ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Εναπόθεση του άνθρακα, μπορεί να οριστεί ως η κατακράτηση και ασφαλής αποθήκευση του άνθρακα, ο οποίος σε άλλη περίπτωση θα εκπεμπόταν ή θα παρέμενε στην ατμόσφαιρα. Η ιδέα είναι α) να εμποδιστούν οι εκπομπές του άνθρακα που παράγονται από ανθρώπινες δραστηριότητες να φθάσουν την ατμόσφαιρα κατακρατώντας, απομονώνοντας και αποθηκεύοντάς τις, ή β) να εναποτεθεί ο άνθρακας από την ατμόσφαιρα με ποικίλους τρόπους και να αποθηκευτεί.

Μερικές μέθοδοι περιλαμβάνουν την κατακράτηση του άνθρακα από τη χρήση των απολιθωμένων καυσίμων, πριν φτάσει στην ατμόσφαιρα. Για παράδειγμα, το CO<sub>2</sub> μπορεί να διαχωριστεί από τα καυσαέρια των ενεργειακών μονάδων, από τα απόβλητα των βιομηχανικών διαδικασιών, ή κατά τη διάρκεια της παραγωγής απανθρακωμένων καυσίμων (όπως το παραγόμενο υδρογόνο από υδρογονάνθρακες, όπως το φυσικό αέριο, ή τον γαιάνθρακα). Το CO<sub>2</sub> που κατακρατείται μπορεί να συγκεντρωθεί μέσα σε ένα υγρό ή αέριο ρεύμα, το οποίο μπορεί να μεταφερθεί και να εγχυθεί στον ωκεανό ή μέσα σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς, όπως οι ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου και τα κοιτάσματα γαιάνθρακα. Βιολογικές και χημικές διαδικασίες μπορούν να μετατρέψουν το CO<sub>2</sub> που έχει κατακρατηθεί σε σταθερά προϊόντα. Ο ατμοσφαιρικός άνθρακας μπορεί επίσης να κατακρατηθεί και να εναποτεθεί, αυξάνοντας την ικανότητα των χερσαίων ή θαλάσσιων οικοσυστημάτων να τον απορροφούν φυσικά και να τον αποθηκεύουν υπό μια σταθερή μορφή.

Η εναπόθεση του άνθρακα είναι σημαντική για τους εξής λόγους:

- Η εναπόθεση του άνθρακα μπορεί να γίνει ένα τεράστιο εργαλείο για τη μείωση των ανθρακικών εκπομπών από τα απολιθωμένα καύσιμα. Ωστόσο, πολλή δουλειά πρέπει να γίνει για την κατανόηση της επιστήμης και των μηχανικών δυνατοτήτων των μεθόδων εναπόθεσης του άνθρακα.
- Δεδομένου του μεγέθους της μείωσης των ανθρακικών εκπομπών που πρέπει να γίνει για να σταθεροποιηθεί η συγκέντρωση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub>, πολλαπλές προσεγγίσεις θα χρειαστούν για τον τρόπο χειρισμού του άνθρακα. Η εναπόθεση του άνθρακα πρέπει να εξελιχθεί παράλληλα με την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και την απανθράκωση των καυσίμων.
- Η εναπόθεση του άνθρακα ανταγωνίζεται την ευρεία, μεγάλης κλίμακας χρήση των απολιθωμένων καυσίμων, όπως επίσης και την τεράστια αύξηση των εκπομπών του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα. Πρόσφατες εκτιμήσεις για τις πηγές απολιθωμένων καυσίμων δείχνουν ότι υπάρχουν επαρκείς πόροι για την προμήθεια ενός πολύ μεγάλου μέρους των παγκόσμιων ενεργειακών πηγών, για τον επόμενο αιώνα.
- Ο φυσικός κύκλος του άνθρακα είναι γενικά ισορροπημένος, αλλά «δυναμικός» και ασταθής εάν εξεταστεί για μικρά χρονικά διαστήματα. Η σημερινή αύξηση του ατμοσφαιρικού άνθρακα είναι αποτέλεσμα των ορυχείων και της καύσης του απολιθωμένου άνθρακα και ως εκ τούτου, οι εκπομπές στην ατμόσφαιρα μπορούν να εναποτεθούν από τον άνθρωπο. Αναπτύσσοντας νέες τεχνικές εναπόθεσης και «επιταχύνοντας» τις υπάρχουσες τεχνικές, θα βοηθούσαν η εκκαθάριση της ατμόσφαιρας από τις τεράστιες ποσότητες άνθρακα.

Κάθε βιώσιμο σύστημα για εναπόθεση του άνθρακα πρέπει να έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

*Ικανότητα και ανταγωνιστικό κόστος.* Οι πρακτικές και οι τεχνολογίες για εναπόθεση του άνθρακα πρέπει να είναι αποτελεσματικές και οικονομικά ανταγωνιστικές.

*Περιβαλλοντικά ασφαλή.* Πρέπει να εξετάζονται προσεκτικά οι περιβαλλοντικές επιδράσεις που έχει η εναπόθεση του άνθρακα. Για παράδειγμα, οι μακροπρόθεσμες συνέπειες της εναπόθεσης στο έδαφος ή στη βλάστηση πρέπει να κατανοηθούν. Μέχρι πρόσφατα, η διάλυση στην ατμόσφαιρα θεωρούταν αποδεκτή. Μεγάλες ποσότητες εκπομπών έχουν απελευθερωθεί. Η ασφάλεια του προϊόντος και η αποθήκευση πρέπει να εξεταστούν.

*Σταθερότητα.* Ο άνθρακας πρέπει να αποθηκεύεται για σχετικά μεγάλη χρονική διάρκεια.

Οι γενικές συστάσεις-προτάσεις που αφορούν θέματα στρατηγικής για την ανάπτυξη ενός περιεκτικού προγράμματος εναπόθεσης του άνθρακα είναι:

- Η έρευνα και ανάπτυξη της εναπόθεσης του άνθρακα αναμένεται να βελτιώσουν υπάρχουσες δραστηριότητες – όπως η έγχυση CO<sub>2</sub> κατά τη διάρκεια της δευτερογενούς ανάκτησης πετρελαίου – και συχνά παρέχουν δευτερεύοντα πλεονεκτήματα, όπως βελτιωμένα οικοσυστήματα κατά τη διάρκεια αναδάσωσης.
- Μερικές επιλογές διαχωρισμού του άνθρακα, όπως βελτιωμένες γεωργικές πρακτικές, είναι σχεδόν άμεσα διαθέσιμες. Εξετάζοντας τις τρέχουσες έρευνες διαχωρισμού τοπικής κλίμακας σε χερσαία, γεωλογικά και θαλάσσια συστήματα μπορεί να αποκτηθεί σημαντική εμπειρία για τον σχεδιασμό των απαραίτητων ερευνητικών περιβαλλοντικών προγραμμάτων.
- Μερικές μέθοδοι εναπόθεσης οι οποίες έχουν περιορίσει τη χωρητικότητα ή σχετικά μειώσει την περίοδο «παραμονής» του άνθρακα, μπορεί να έχουν σημαντική βραχυπρόθεσμη συμβολή κατά τη διάρκεια της μετάβασης, έναντι των μακροπρόθεσμων μεθόδων «χειρισμού» του άνθρακα. Ενώ άλλες μέθοδοι εναπόθεσης του άνθρακα μπορεί να έχουν συγκεκριμένες μακροπρόθεσμες συνεισφορές.
- Για να γίνει η εναπόθεση του άνθρακα μια βιώσιμη επιλογή, πρέπει να είναι ασφαλής, προβλέψιμη, αξιόπιστη, μετρίσιμη και εξακριβώσιμη. Επίσης πρέπει να είναι ανταγωνιστική σε σχέση με άλλες μεθόδους χειρισμού του άνθρακα, όπως τα ενεργειακά αποτελεσματικά συστήματα και οι ενεργειακές τεχνολογίες απανθράκωσης.
- Η εναπόθεση του άνθρακα προς το παρόν αποτελεί ένα πεδίο «ανώριμο», γι' αυτό χρειάζονται πολλές θεμελιώδεις ερευνητικές προσεγγίσεις για να δικαιολογηθεί και αναμένονται σημαντικές ανακαλύψεις.
- Περιοδικά πρέπει να γίνονται ολοκληρωμένες αναλύσεις για την εναπόθεση του άνθρακα, ώστε να εκτιμηθούν οι πιθανές συνεισφορές, τα κόστη και τα πλεονεκτήματα των πολλαπλών μεθόδων που υπάρχουν.
- Οι πληροφορίες του ερευνητικού και αναπτυξιακού προγράμματος πρέπει να δίδονται στους πολιτικούς, ώστε να τους βοηθήσουν στην ανάπτυξη πολιτικής και στην επιλογή των περισσότερο αποτελεσματικών και αποδοτικών λύσεων για τα θέματα της αλλαγής κλίματος.

*Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»*

*A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)*

## 2.1. Ο Συνολικός και των Απολιθωμένων Καυσίμων, κύκλοι του άνθρακα

Η εναπόθεση του άνθρακα είναι στενά συνδεδεμένη με δύο κύκλους άνθρακα – τον φυσικό και τον κύκλο των απολιθωμένων καυσίμων. Η κατανόηση των πτυχών και των δύο κύκλων, είναι σημαντική για την ανάπτυξη μεθόδων εναπόθεσης άνθρακα.

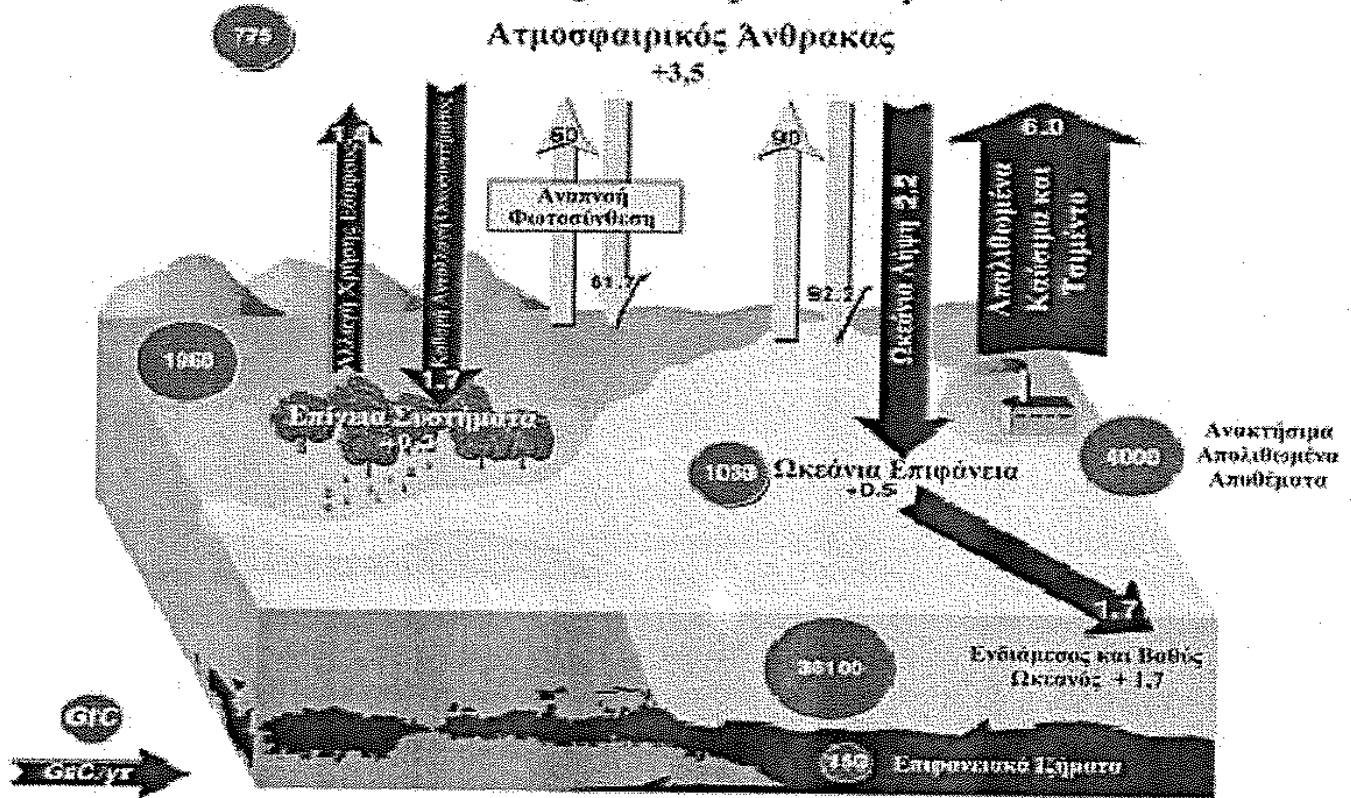
### A) Ο Συνολικός (φυσικός) Κύκλος Άνθρακα

Η κατανόηση, του κύκλου του άνθρακα, των ροών του και των δεξαμενών του είναι στενά συνδεδεμένη με την επιτυχημένη εφαρμογή των τεχνολογιών εναπόθεσης άνθρακα. Οι συγκεντρώσεις του CO<sub>2</sub>, (μειώνοντας τις εκπομπές του CO<sub>2</sub> ή αλλάζοντας το μέγεθος των ροών μεταξύ των δεξαμενών) ελέγχονται από την ποσότητα του άνθρακα μιας δεξαμενής. Από την άποψη της εναπόθεσης του άνθρακα, κύρια πρόκληση αποτελεί η κατανόηση της δυνατότητας για αλλαγή της ποσότητας του άνθρακα μέσω των τεχνολογιών εναπόθεσης, ώστε να μειωθούν οι μελλοντικές ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις του.

Η ανθρώπινες δραστηριότητες κατά τη διάρκεια του πρώτου μισού του 1990, έχουν συμβάλει σε μια μέση ετήσια εκπομπή στην ατμόσφαιρα περίπου 7,4 GtC (Σχήμα 2.1.). Οι περισσότερες από αυτές τις εκπομπές προήλθαν από την καύση απολιθωμένων καυσίμων. Το καθαρό αποτέλεσμα αυτών των εκπομπών κατά τη διάρκεια του πρώτου μέρους της δεκαετίας του '90, ήταν μια καθαρή ετήσια αύξηση των εκπομπών στην ατμόσφαιρα, 3,5 GtC. Η αποθήκευση του άνθρακα μέσα σε χερσαία συστήματα, λόγω της φωτοσύνθεσης και της ανάπτυξης των φυτών ήταν 1,7 GtC. Ένα 2,2 GtC τον χρόνο απορροφούταν από τους ωκεανούς.

Οι ροές άνθρακα μεταξύ της ατμόσφαιρας και των ωκεάνιων και χερσαίων δεξαμενών είναι αρκετά μεγάλες (εκατοντάδες GtC ετησίως), ενώ η καθαρή ανταλλαγή άνθρακα είναι κατά μια τάξη μεγέθους μικρότερη. Για παράδειγμα, ο μέσος όρος της καθαρής συσσώρευσης στο οικοσύστημα, από τη χερσαία βιόσφαιρα ήταν 0,3 GtC ανά έτος (1,7 GtC ετησίως καθαρή παραγωγή οικοσυστήματος, μειωμένη κατά 1,4 GtC ετησίως λόγω του καθαρισμού του εδάφους), ενώ τα χερσαία οικοσυστήματα φωτοσυνθέτουν σταθερά 61,7 GtC ετησίως – η φωτοσυνθετική λήψη αντισταθμίζεται από 60 GtC ετησίως λόγω της αναπνοής των φυτών / εδάφους. Ομοίως, η καθαρή ωκεάνια λήψη των 2,2 GtC ανά έτος, είναι η διαφορά των ροών ωκεανού / ατμόσφαιρας που η κάθε μια υπερβαίνει τα 90 GtC ετησίως. Η σημασία της κατανόησης αυτών των περίπλοκων ανταλλαγών άνθρακα είναι, ότι αναπτύσσοντας την ικανότητα μετατροπής αυτών των τεράστιων ετήσιων ανταλλαγών του συνολικού κύκλου του άνθρακα, μέσω των τεχνολογιών εναπόθεσης του άνθρακα, θα αυξηθεί η καθαρή αποθήκευση άνθρακα στις τεράστιες δεξαμενές και έτσι θα μειωθούν οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις του άνθρακα.

# Συνολικός Κύκλος του Άνθρακα



Σχήμα 2.1. Προκληθείσες από τον άνθρωπο αλλαγές στον συνολικό κύκλο του άνθρακα, ως αποτέλεσμα των αυξήσεων της καύσης απολιθωμένων καυσίμων και των μεταβαλλόμενων χρήσεων του εδάφους. Τα βέλη στο έδαφος, δείχνουν το μέσο μέγεθος της διαταραχής των ροών του άνθρακα και το μέλλον του άνθρακα, ως αποτέλεσμα αυτών των δραστηριοτήτων που υπολογίζονται κατά μέσο όρο για το πρώτο μισό της δεκαετίας του '90. Οι καθαρές ροές (μαύρα βέλη) και οι ακαθάριστες ροές (γκρίζα βέλη) είναι δισεκατομμύρια τόνοι άνθρακα ετησίως. Οι ετήσιες καθαρές προσθήκες του άνθρακα (που παρουσιάζονται ως + αριθμοί) στην ατμόσφαιρα, τα ωκεάνια οικοσυστήματα και τα χερσαία οικοσυστήματα, από ανθρωπογενείς πηγές είναι δισεκατομμύρια τόνοι άνθρακα ετησίως. Οι τιμές των κύκλων παρουσιάζονται σε δισεκατομμύρια τόνους άνθρακα.

Πηγή: Technology Opportunities to Reduce U.S. Greenhouse Gas Emissions, modified from IPCC 1995

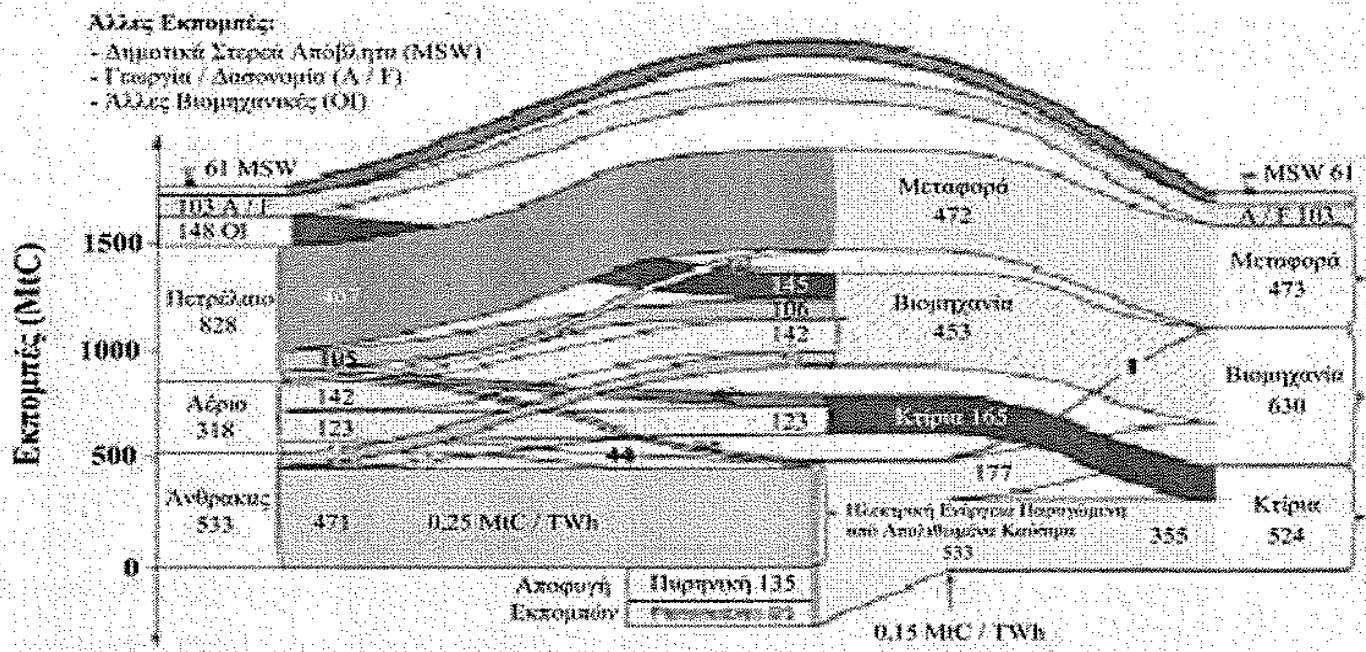
## B) Ο Κύκλος των Απολιθωμένων Καυσίμων

Περίπου το 75% της παγκόσμιας εμπορικής ενέργειας προέρχεται από τα απολιθωμένα καύσιμα και περίπου το 84% της ενέργειας που χρησιμοποιείται στις ΗΠΑ, προέρχεται από τα απολιθωμένα καύσιμα (EIA 1998, PCAST 1997). Λαμβάνοντας υπόψη τα «έμφυτα» πλεονεκτήματα των απολιθωμένων καυσίμων, όπως η οικονομική ανταγωνιστικότητά τους, η διαθεσιμότητά τους, η ευκολία μεταφοράς και αποθήκευσής τους και τα μεγάλα αποθέματά τους, γίνεται κατανοητό ότι τα απολιθωμένα καύσιμα θα παραμείνουν σημαντικός φορέας του παγκόσμιου ενεργειακού σχεδιασμού, για τουλάχιστον τον επόμενο αιώνα.

Το Σχήμα 2.2. παρουσιάζει τις ενεργειακές ροές της οικονομίας των ΗΠΑ από απολιθωμένα και άλλα καύσιμα. Αυτό το διάγραμμα βοηθάει στον προσδιορισμό των θέσεων όπου το CO<sub>2</sub> μπορεί να διαχωριστεί και να κατακρατηθεί, αλλά υπάρχουν ενεργειακές και οικονομικές επιπτώσεις που πρέπει να εξεταστούν (Hoffert et al. 1998).

Στο κοντινό μέλλον, το περισσότερο CO<sub>2</sub> είναι πιθανό να προέρχεται από την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από απολιθωμένα καύσιμα, επειδή μεγάλες ποσό-

τητές του θα μπορούσαν να επεξεργαστούν σε προκαθορισμένες θέσεις. Εντούτοις, στο προσεχές μέλλον θα υπάρχουν και άλλες δυνατότητες. Τα απολιθωμένα καύσιμα, τα στερεά απόβλητα ή η βιομάζα, μπορούν να απανθρακωθούν ώστε ένα μεγαλύτερου ενεργειακού περιεχομένου και περιβαλλοντικά «ήπιο» καύσιμο να διαχωριστεί από το CO<sub>2</sub>. Για παράδειγμα, είτε μια απολιθωμένη πηγή ενέργειας είτε μια άλλη πηγή άνθρακα, όπως τα στερεά απόβλητα ή η βιομάζα, θα μπορούσαν να επεξεργαστούν εκ των προτέρων για να παράγουν υδρογόνο και CO<sub>2</sub>. Αυτές οι κεντρικές εγκαταστάσεις προ-επεξεργασίας θα μπορούσαν να αποτελέσουν νέες πηγές για κατακράτηση άνθρακα.



Σχήμα 2.2. Ροές άνθρακα στο ενεργειακό σύστημα και πηγές εκπομπών στις ΗΠΑ το 1995 (μετρημένα σε εκατομμύρια τόνους). Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την καύση απολιθωμένων καυσίμων αναμένεται να παραμείνει σημαντικός συνεισφέρων στις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου.

Πηγές: EIA 1998a,b.

## 2.2. Κατάσταση που Επικρατεί στην Ελλάδα

Η διεθνής κοινότητα αναγνωρίζοντας τους κινδύνους από μία ενδεχόμενη κλιματική μεταβολή έχει κινητοποιηθεί προκειμένου να αντιστρέψει τις ανησυχητικές τάσεις που εμφανίζουν οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου σε παγκόσμιο επίπεδο. Αφετηρία αυτής της προσπάθειας αποτέλεσε η υπογραφή της Σύμβασης - Πλαίσιο για την Κλιματική Μεταβολή των Ηνωμένων Εθνών (UNFCCC) από το σύνολο σχεδόν των χωρών του πλανήτη, το 1992 στο Ρίο. Τα Συμβαλλόμενα Μέρη της Σύμβασης, αναγνωρίζοντας την ανεπάρκεια των υποχρεώσεων που απέρρεαν από αυτήν, δρομολόγησαν μία διαδικασία ενδυνάμωσής της που το 1997, στο πλαίσιο της 3<sup>ης</sup> Συνόδου τους στο Κυότο, κατέληξε στην υπογραφή του ομώνυμου Πρωτοκόλλου.

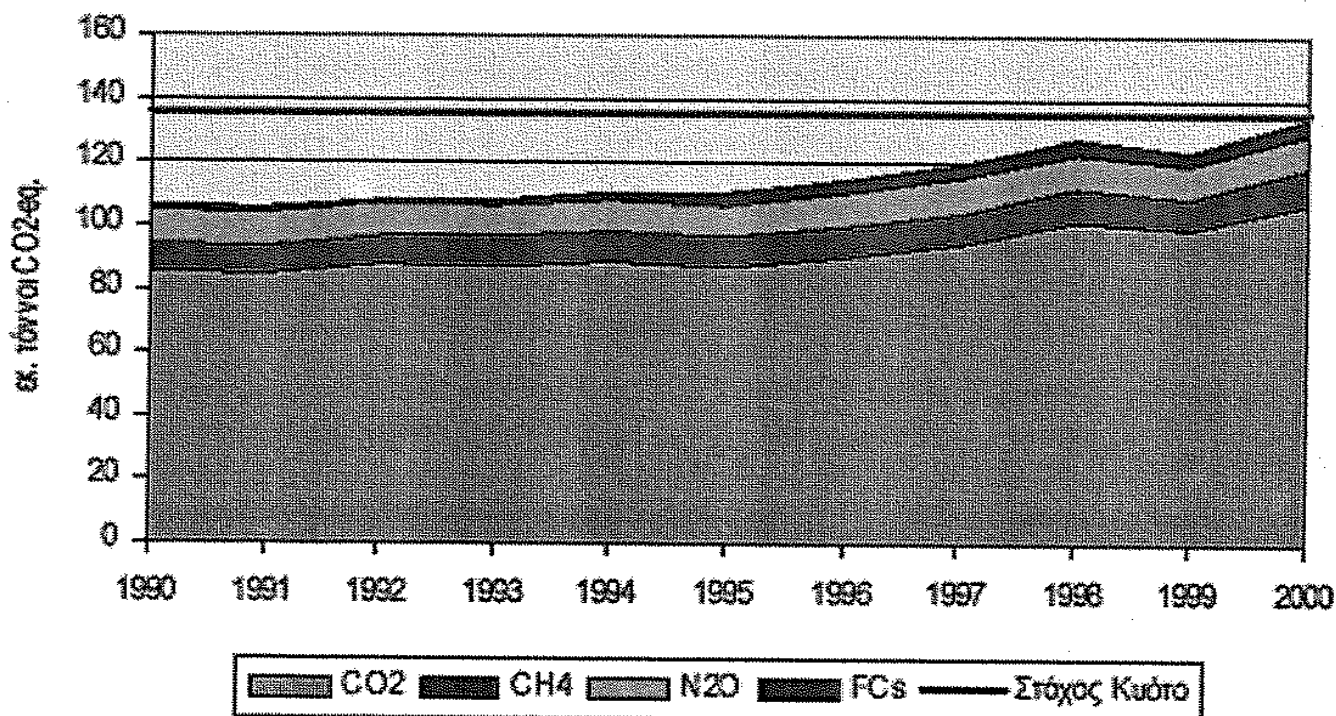
Το Πρωτόκολλο του Κυότο καθορίζει για πρώτη φορά νομικά δεσμευτικούς στόχους για τις αναπτυγμένες χώρες που προβλέπουν για την περίοδο 2008-2012 τη μείωση των εκπομπών των 6 αερίων του θερμοκηπίου (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, PFC, και SF<sub>6</sub>) κατά 5% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990.



Η Ευρωπαϊκή Ένωση δεσμεύτηκε για ποσοστό μείωσης 8%, υποχρέωση η οποία εξειδικεύθηκε για κάθε κράτος μέλος από το Συμβούλιο Υπουργών Περιβάλλοντος τον Ιούνιο του 1998. Ο διαφοροποιημένος στόχος κάθε χώρας είναι δεσμευτικός και προβλέπονται κυρώσεις για τη μη επίτευξη του, ακόμη και αν επιτευχθεί ο συνολικός στόχος της ΕΕ.

Για την Ελλάδα ο στόχος του Κυότο προβλέπει αύξηση των εκπομπών των 6 αερίων του θερμοκηπίου μέχρι την περίοδο 2008-2012 κατά 25% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 (έτος αναφοράς για τα αέρια HFC, PFC και SF<sub>6</sub>, είναι το 1995). Αν και αυξητικός, σε αντίθεση με την πλειονότητα των κρατών μελών που υποχρεούνται σε μειώσεις, ο στόχος αυτός δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί δεδομένου ότι η αυθόρμητη τάση των εκπομπών οδηγεί περίπου σε διπλάσιο ποσοστό αύξησης.

Η εξέλιξη των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην Ελλάδα από το 1990 έως το 2000 και η απόκλιση τους από τον στόχο του Κυότο παρουσιάζονται στο σχήμα 2.3.



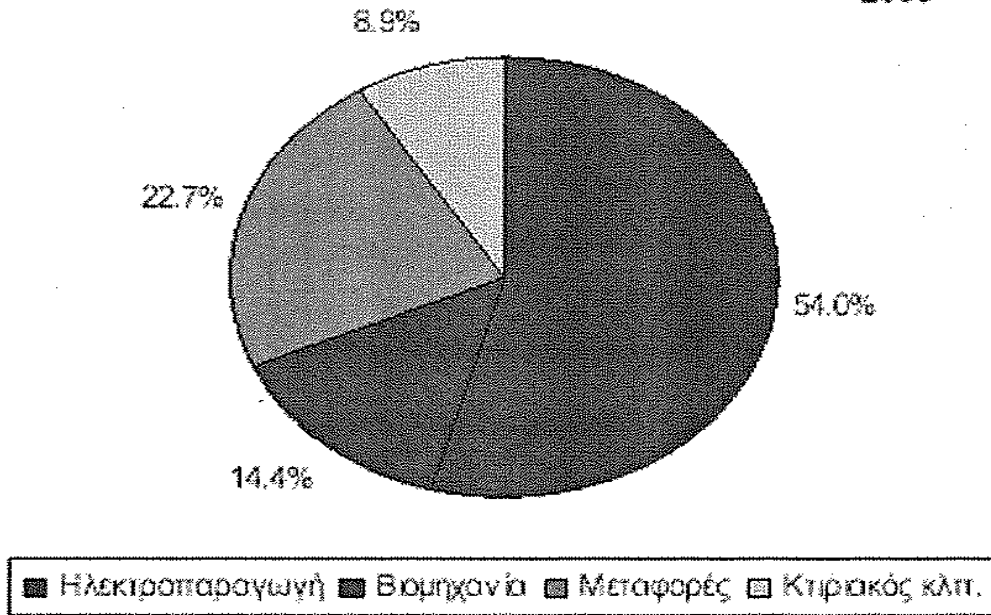
**Σχήμα 2.3.** Εξέλιξη των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην Ελλάδα και απόκλιση από τον στόχο του Κυότο

Πηγή: Δανάη Διακουλάκη, Αν. Καθηγήτρια ΕΜΠ, μέλος ΔΣ ΕΚΠΙΑΑ, «Περιβαλλοντικά Σήματα-Σχέδιο Έκθεσης Δεικτών Αειφορίας», Εθνικό Κέντρο Περιβάλλοντος & Αειφόρου Ανάπτυξης, Ελλάδα 2003

Οι συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου εμφανίζονται το 2000 αυξημένες κατά 22% σε σχέση με το 1990. Αν ληφθούν υπόψη και οι εκπομπές που προέρχονται από αλλαγές χρήσεων γης που για το έτος 2000, οι οποίες ήταν ιδιαίτερα υψηλές, το σχετικό ποσοστό ανέρχεται στο 24%. Η αύξηση αποδίδεται κυρίως στο διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) που αποτελεί και το 80% των συνολικών εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Αν και ο μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης έχει μειωθεί αισθητά σε σχέση με την περίοδο 1980-1990, το περιθώριο αύξησης που προσδιορίζει ο στόχος του Κυότο έχει πλέον περιορισθεί σημαντικά.

Η συνεισφορά του ενεργειακού τομέα στις εκπομπές CO<sub>2</sub> για την Ελλάδα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.4.

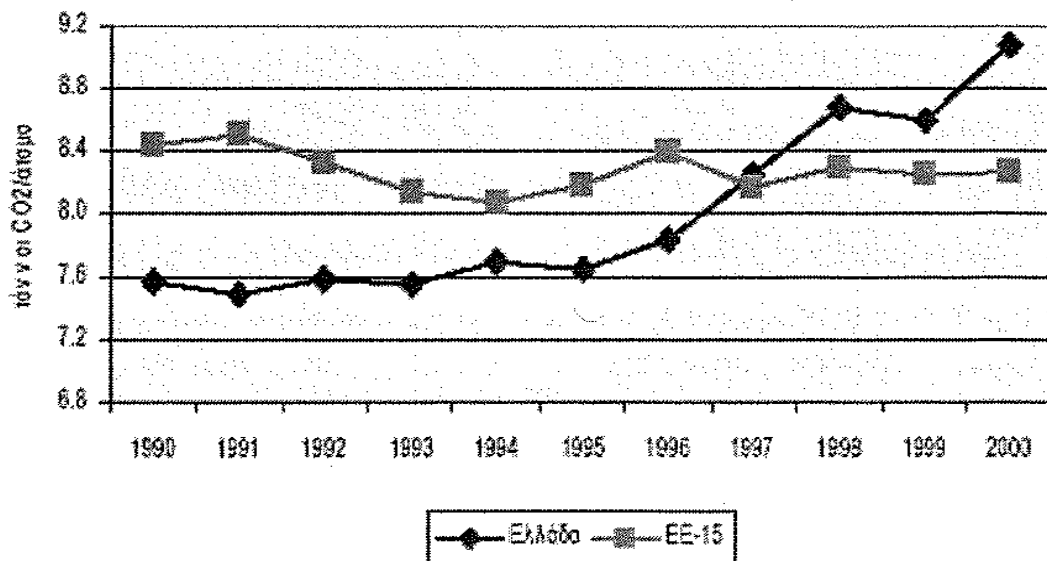




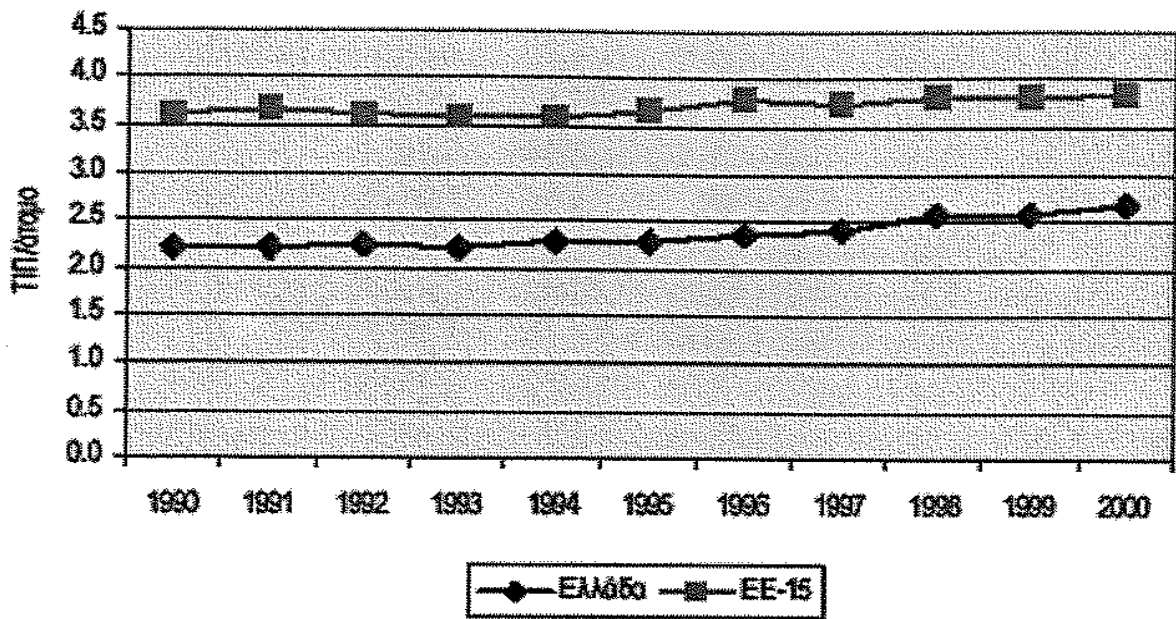
**Σχήμα 2.4.** Συνεισφορά του ενεργειακού τομέα στις εκπομπές CO<sub>2</sub> για την Ελλάδα  
 Πηγή: Δανάη Διακουλάκη, Αν. Καθηγήτρια ΕΜΠ, μέλος ΔΣ ΕΚΠΑ, «Περιβαλλοντικά Σήματα-Σχέδιο Έκθεσης Δεικτών Αειφορίας», Εθνικό Κέντρο Περιβάλλοντος & Αειφόρου Ανάπτυξης, Ελλάδα 2003

Το 54% του CO<sub>2</sub> και περίπου το 50% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου προέρχονται από την εγχώρια ηλεκτροπαραγωγή, γεγονός που οφείλεται στον πολύ υψηλό συντελεστή εκπομπών CO<sub>2</sub> του λιγνίτη που αποτελεί τη βάση του ελληνικού συστήματος ηλεκτροπαραγωγής. Από τους τομείς της τελικής ενεργειακής ζήτησης τη μεγαλύτερη συνεισφορά εμφανίζει ο τομέας των μεταφορών, ενώ ο κτιριακός τομέας (νοικοκυριά, εμπόριο, υπηρεσίες), αν και συγκριτικά κατέχει το χαμηλότερο ποσοστό, δείχνει σημαντικές αυξητικές τάσεις.

Οι κατά κεφαλή εκπομπές CO<sub>2</sub> στην Ελλάδα, που προέρχονται από την παραγωγή και χρήση ενέργειας, ξεκινώντας το 1990 από επίπεδο χαμηλότερο κατά 10% από το μέσο όρο της ΕΕ, φθάνουν το 2000 να τον έχουν αισθητά υπερβεί (Σχήμα 2.5.). Με δεδομένο ότι η κατά κεφαλή ενεργειακή κατανάλωση στην Ελλάδα παραμένει ακόμη χαμηλότερη του μέσου όρου της ΕΕ, η αιτία αύξησης της τιμής του δείκτη πρέπει να αναζητηθεί στη σύνθεση του ενεργειακού μίγματος (Σχήμα 2.6.).



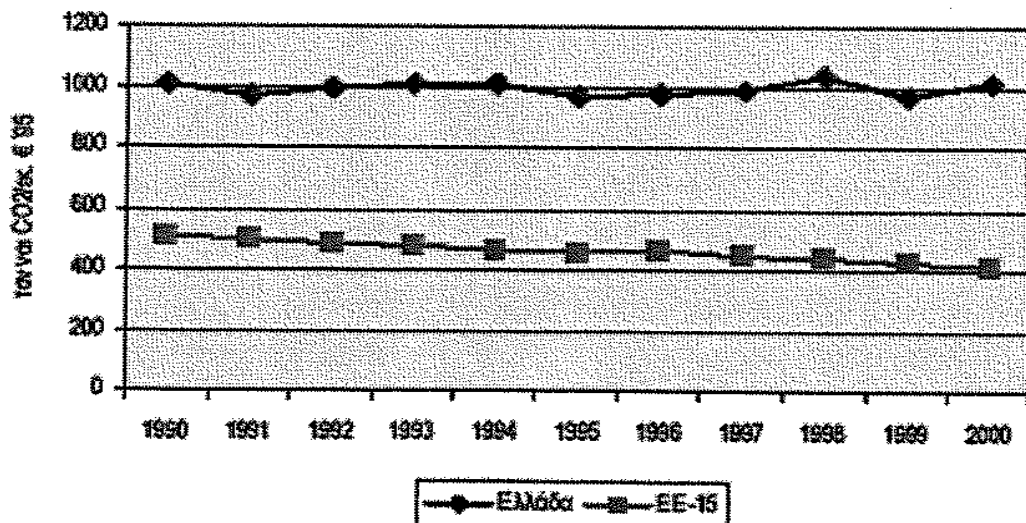
**Σχήμα 2.5.** Κατά κεφαλή εκπομπές CO<sub>2</sub> στην Ελλάδα από τον ενεργειακό τομέα



**Σχήμα 2.6.** Κατά κεφαλή κατανάλωση πρωτογενών μορφών ενέργειας στην Ελλάδα  
 Πηγή: Δανάη Διακουλάκη, Αν. Καθηγήτρια ΕΜΠ, μέλος ΔΣ ΕΚΠΙΑΑ, «Περιβαλλοντικά Σήματα-Σχέδιο Έκθεσης Δεικτών Αειφορίας», Εθνικό Κέντρο Περιβάλλοντος & Αειφόρου Ανάπτυξης, Ελλάδα 2003

Η κατά κεφαλή κατανάλωση πρωτογενών μορφών ενέργειας που το 1990 ήταν κατά 39% μικρότερη από τον κοινοτικό μέσο όρο, ακολουθεί μιά πορεία σύγκλισης παραμένοντας όμως το έτος 2000 κατά 30% χαμηλότερή του. Η διαφορά αυτή ερμηνεύει την ανοδική τάση που παρουσιάζει η κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα και υποδηλώνει ισχυρές πιέσεις για περαιτέρω αύξηση, ως αποτέλεσμα της ανόδου του βιοτικού επιπέδου και της σύγκλισης της ελληνικής οικονομίας με την ΕΕ.

Η ένταση εκπομπών CO<sub>2</sub> στην Ελλάδα κινείται σταθερά σε υψηλά επίπεδα, εμφανίζοντας διπλάσια τιμή από το μέσο όρο της ΕΕ. Η σημαντική αυτή απόκλιση ερμηνεύεται από τα ιδιαίτερα διαρθρωτικά χαρακτηριστικά του ενεργειακού συστήματος και ειδικότερα από τη μεγάλη του εξάρτηση από συμβατικά καύσιμα με υψηλό συντελεστή εκπομπών (Σχήμα 2.7.).



**Σχήμα 2.7.** Ένταση εκπομπών CO<sub>2</sub> στην Ελλάδα από τον ενεργειακό τομέα  
 Πηγή: Δανάη Διακουλάκη, Αν. Καθηγήτρια ΕΜΠ, μέλος ΔΣ ΕΚΠΙΑΑ, «Περιβαλλοντικά Σήματα-Σχέδιο Έκθεσης Δεικτών Αειφορίας», Εθνικό Κέντρο Περιβάλλοντος & Αειφόρου Ανάπτυξης, Ελλάδα 2003

Γενικά οι εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά δραστηριότητα στην Ελλάδα για την περίοδο 2000 – 2003 παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1.

**Πίνακας 2.1.** Εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά δραστηριότητα στην Ελλάδα για την περίοδο 2000 – 2003

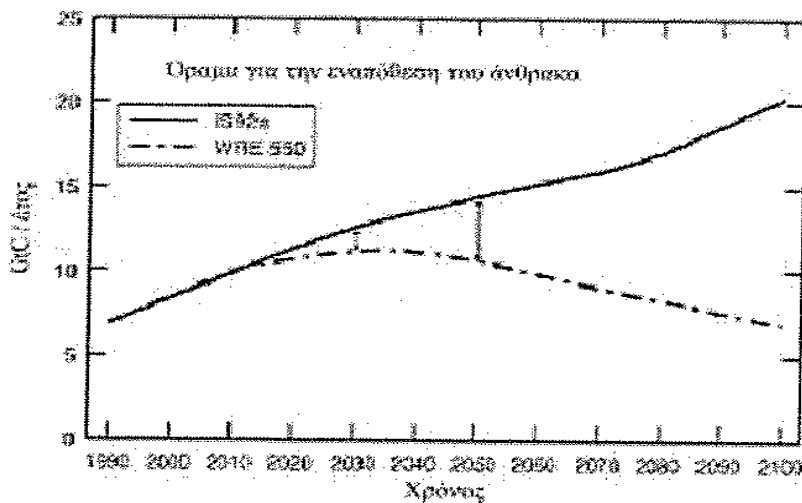
	2000	2001	2002	2003	Μέσες ετήσιες εκπομπές
<b>ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO<sub>2</sub> ΑΠΟ ΚΑΥΣΕΙΣ</b>					
Ηλεκτροπαραγωγή	50,758,590	51,942,385	51,568,727	52,232,875	55,501,465
Λοιπές εγκαταστάσεις καύσης	1,141,279	1,122,562	1,173,155	1,078,103	1,174,601
Διυλιστήρια	2,855,119	2,902,443	2,904,198	2,931,586	2,942,929
Φρύξη μετάλλων	110,707	92,302	94,797	94,865	100,123
Σίδηρος & Χάλυβας	109,117	156,241	152,345	143,682	181,659
Παραγωγή τσιμέντου	4,236,993	4,298,080	4,244,830	4,245,390	4,459,805
Παραγωγή ασβέστη	189,297	202,161	217,332	238,165	236,136
Παραγωγή γυαλιού	36,414	81,855	87,340	76,149	83,533
Παραγωγή κεραμικών	494,026	534,105	568,684	591,116	591,260
Παραγωγή χαρτιού	177,475	188,859	212,068	200,394	215,649
<b>Σύνολο</b>	<b>60,109,016</b>	<b>61,520,993</b>	<b>61,223,476</b>	<b>61,832,323</b>	<b>65,487,160</b>
<b>ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO<sub>2</sub> ΑΠΟ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ</b>					
Ηλεκτροπαραγωγή	63,406	89,397	65,858	87,897	151,881
Λοιπές εγκαταστάσεις καύσης					
Διυλιστήρια	648,318	610,924	656,339	665,884	678,644
Φρύξη μετάλλων	612,710	659,885	746,279	733,640	713,268
Σίδηρος & Χάλυβας	251,599	324,161	444,575	401,609	595,145
Παραγωγή τσιμέντου	6,555,583	6,584,823	6,331,435	6,386,465	6,752,921
Παραγωγή ασβέστη	479,245	481,340	545,134	586,122	598,258
Παραγωγή γυαλιού	12,389	25,810	29,827	24,831	27,057
Παραγωγή κεραμικών	163,324	162,280	192,078	232,695	238,733
Παραγωγή χαρτιού					
<b>Σύνολο</b>	<b>8,786,574</b>	<b>8,938,620</b>	<b>9,011,526</b>	<b>9,119,144</b>	<b>9,755,887</b>
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO<sub>2</sub></b>					
Ηλεκτροπαραγωγή	50,821,996	52,031,782	51,634,585	52,320,772	55,653,327
Λοιπές εγκαταστάσεις καύσης	1,141,279	1,122,562	1,173,155	1,078,103	1,174,601
Διυλιστήρια	3,503,436	3,513,367	3,560,537	3,597,470	3,621,573
Φρύξη μετάλλων	723,416	752,187	841,076	828,506	813,391
Σίδηρος & Χάλυβας	360,717	480,402	596,920	545,291	776,804
Παραγωγή τσιμέντου	10,792,575	10,882,903	10,576,265	10,631,854	11,212,726
Παραγωγή ασβέστη	668,542	683,501	762,466	824,286	834,394
Παραγωγή γυαλιού	48,803	107,665	117,167	100,981	110,590
Παραγωγή κεραμικών	657,350	696,385	760,763	823,811	829,993
Παραγωγή χαρτιού	177,475	188,859	212,068	200,394	215,649
<b>Σύνολο</b>	<b>68,895,590</b>	<b>70,459,613</b>	<b>70,235,003</b>	<b>70,951,468</b>	<b>75,243,047</b>

Πηγή: Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας & Δημοσίων Έργων, «Εθνικό Σχέδιο Κατανομής Δικαιωμάτων Εκπομπών για την Περίοδο 2005-2007», Δεκέμβριος 2004

## 2.3. Προσεγγίσεις για την Εναπόθεση του Άνθρακα

### A) Χειρισμός του Άνθρακα - Η Πρόκληση

Δυο ευρέως χρησιμοποιούμενα προγράμματα, το «business as usual» και το πρόγραμμα για ατμοσφαιρική σταθερότητα, συγκρίνονται στο Σχήμα 2.8. Η διαφορά μεταξύ των δυο σεναρίων, περίπου 1 GtC τον χρόνο το 2025 και περίπου 4 GtC τον χρόνο το 2050, αντιπροσωπεύει μια εκτίμηση για τη μείωση του CO<sub>2</sub> που απαιτείται για την επίτευξη ατμοσφαιρικής σταθερότητας. Αυτό το μοντέλο αναγνωρίζει έναν σκελετό (πλάνο) για έρευνα και ανάπτυξη η οποία θα επέτρεπε στην εναπόθεση του άνθρακα να παρέχει ένα σημαντικό κλάσμα αυτής της μείωσης.



Πηγή: Wigley, Richels, and Edmonds 1996

**Σχήμα 2.8.** Μια παρουσίαση των μειώσεων του CO<sub>2</sub> που θα ήταν απαραίτητες για να επιτευχθεί η ατμοσφαιρική σταθεροποίηση, συγκρίνει το IS92A («business as usual») πρόγραμμα, με ένα πρόγραμμα (WRE550) που οδηγεί στις σταθεροποιημένες ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις του CO<sub>2</sub> στα 550 ppm (περίπου δυο φορές των προ-βιομηχανικών επιπέδων). Το πρόγραμμα WRE550 χρησιμοποιείται συνήθως από τους αναλυτές της αλλαγής κλίματος.

### B) Τρεις Προσεγγίσεις για τον Χειρισμό του Άνθρακα

Η εναπόθεση του άνθρακα συμπληρώνει τις δυο άλλες προσεγγίσεις για τον χειρισμό του άνθρακα. Η πρώτη προσέγγιση είναι να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα της μετατροπής της πρωτογενούς ενέργειας, ώστε λιγότερες μονάδες πρωτογενούς απολιθωμένης ενέργειας να απαιτούνται για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας ενέργειας. Περισσότερο αποδοτική μετατροπή ενέργειας θα έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερες εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας.

Μια δεύτερη προσέγγιση είναι η αντικατάσταση των υπάρχοντων ενεργειακών πηγών από πηγές χαμηλότερου άνθρακα ή απανθρακωμένες. Για παράδειγμα, αυτή η στρατηγική μπορεί να αντικαταστήσει το πετρέλαιο και τον γαιάνθρακα με το φυσικό αέριο, χρησιμοποιώντας ως ενεργειακή προμήθεια ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική ή η βιομάζα, ή αυξάνοντας τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας.

Η εναπόθεση του άνθρακα αντιπροσωπεύει μια τρίτη προσέγγιση. Ωστόσο, έχει λάβει πολύ λιγότερη προσοχή από τις άλλες δυο προσεγγίσεις.

### Γ) Σύγκριση με Άλλες Μεθόδους Μετριάσμού του CO<sub>2</sub>

Εξετάζοντας το φάσμα των αντιδράσεων για την παγκόσμια αλλαγή κλίματος,

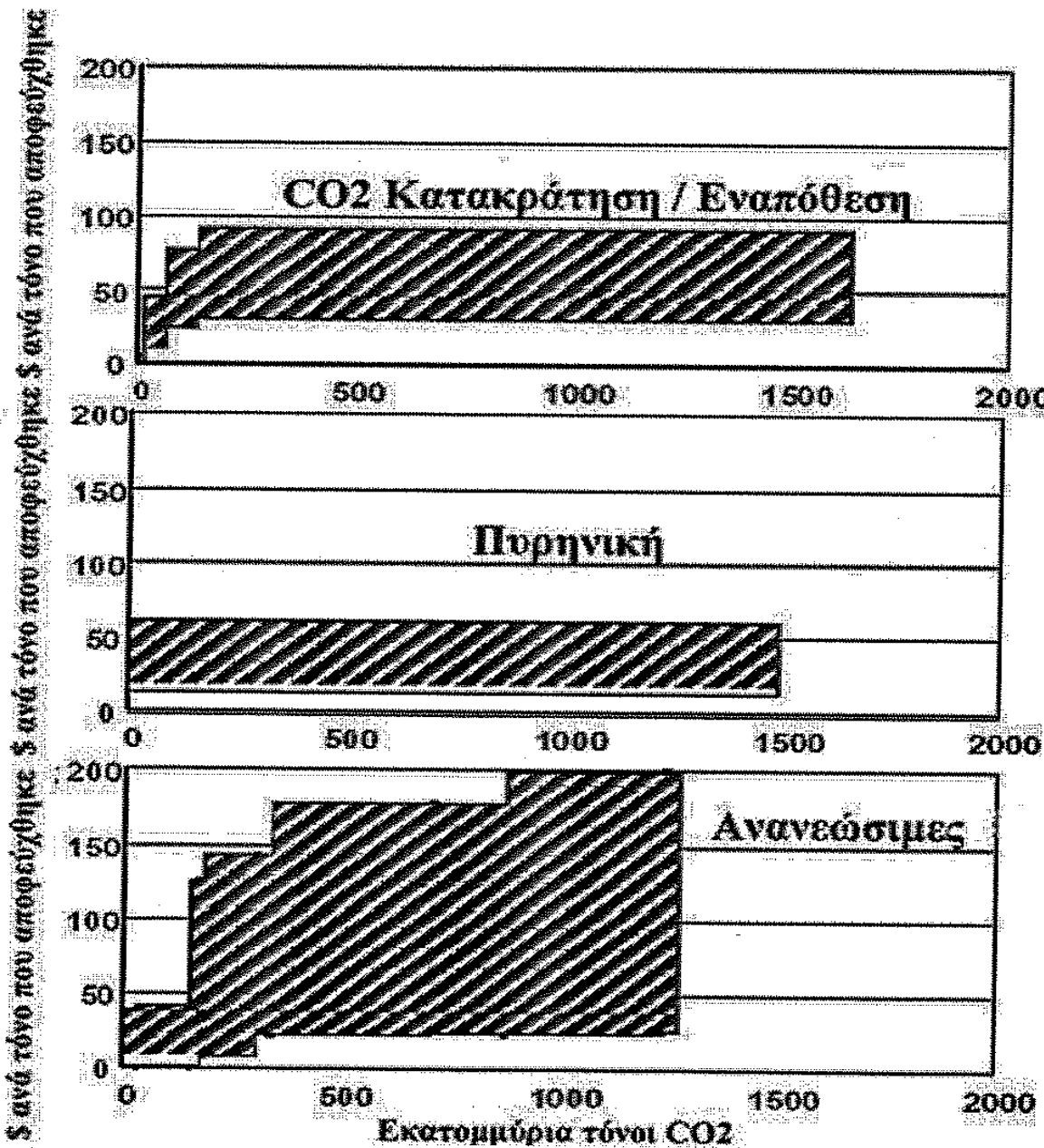
υπάρχουν διάφορες σχετικά χαμηλού κόστους τεχνολογίες μετριασμού του CO<sub>2</sub>, οι οποίες μερικές φορές καλούνται «least regrets». Περιλαμβάνουν τη βελτίωση της ενεργειακής παροχής και της αποδοτικότητας τελικής χρήσης, τη μετατροπή (όπου είναι δυνατό) του γαιάνθρακα ή του πετρέλαιο σε αέριο και φθηνές εφαρμογές ανανεώσιμης ενέργειας. Το σημαντικότερο μειονέκτημα αυτής της ομάδας τεχνολογιών είναι η περιορισμένη τους επίδραση. Μπορεί να είναι επαρκείς για την επίτευξη βραχυπρόθεσμων στόχων, αλλά πιστεύεται ότι δε θα είναι ικανές να λύσουν το πρόβλημα μέσο- και μακροπρόθεσμα. Λαμβάνοντας υπόψη τις περιορισμένες δυνατότητες μείωσης που έχουν, πρέπει να εξεταστούν πρόσθετες αλλά περισσότερο δαπανηρές τεχνολογίες μετριασμού, συγκεκριμένα η κατακράτηση και εναπόθεση του CO<sub>2</sub>, η πυρηνική ενέργεια και η εκτενής χρήση της ανανεώσιμης ενέργειας. Και οι τρεις από αυτές τις τεχνολογίες έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν ουσιαστικά τις εκπομπές του CO<sub>2</sub>. Αυτά τα στοιχεία παρουσιάζονται στον πίνακα 2.2.

**Πίνακας 2.2.** Δυνατότητες και δαπάνες των ποικίλων μεθόδων μετριασμού του CO<sub>2</sub>, για τις ΗΠΑ.

Μέθοδοι Μετριασμού του CO <sub>2</sub>	Ικανότητα Μείωσης (εκατομμύρια τόνοι CO <sub>2</sub> )	Καθαρό Κόστος (€/τόνο CO <sub>2</sub> που αποφεύγεται)	
		Υψηλό	Χαμηλό
<b>Τεχνολογίες Κατακράτησης και Εναπόθεσης CO<sub>2</sub></b>			
		Υψηλό	Χαμηλό
Κατακράτηση για Χρήση	20	4,2	0
Κατακράτηση με Ενισχυμένη Ανάκτηση Πετρελαίου	50	37,5	8,3
Κατακράτηση (από βιομηχανικές πηγές) με Αποθήκευση	80	63,3	20
Κατακράτηση με Γεωλογική Αποθήκευση	900	75,8	25,8
Κατακράτηση με Ωκεάνια Αποθήκευση	600	75,8	25,8
<b>Τεχνολογίες Πυρηνικής και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας</b>			
		Υψηλό	Χαμηλό
Πυρηνική	1500	50,8	10,8
Υδροηλεκτρική	30	31,7	20,8
Βιομάζα	130	35	6,7
Γεωθερμική	69-235	120	0
Αιολική	30	104,2	0
Ηλιακά Φωτοβολταϊκά	400	333,3	19,2
Ηλιακή Θερμική	540	148,3	20
<b>Τεχνολογίες «least – regrets»</b>			
		Υψηλό	Χαμηλό
Ενεργειακή (τελικής χρήσης) Αποδοτικότητα	425-620	5	-70
Αποδοτικότητα Ανεφοδιασμού	99	1,7	0
Καύσιμα που Μετατρέπονται σε αέριο	850	38,3	14,2
Αναδάσωση	242	8,3	2,5

Πηγή: Howard Herzog, Elizabeth Drake, Eric Adams, «CO<sub>2</sub> Capture, Reuse, and Storage Technologies for Mitigating Global Climate Change», Energy Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, (1997)

Τα στοιχεία που παρουσιάζονται περιέχουν μεγάλη αβεβαιότητα, όπως φαίνεται από το μεγάλο εύρος των εκτιμώμενων δαπανών και γι αυτό πρέπει να χρησιμοποιηθούν με προσοχή. Εντούτοις, τα στοιχεία είναι επαρκή για να υποστηρίξουν ένα σημαντικό συμπέρασμα: οι τρέχουσες δαπάνες των τεχνολογιών κατακράτησης και εναπόθεσης του CO<sub>2</sub> είναι συγκρίσιμες με τις δαπάνες των μεθόδων πυρηνικής ή ανανεώσιμης ενέργειας (σχήμα 2.9.). Δεδομένου ότι τουλάχιστον μια από αυτές τις επιλογές (εάν όχι και οι τρεις) θα απαιτηθούν για να σταθεροποιήσουν τα επίπεδα των αερίων θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα μέσο- και μακροπρόθεσμα, είναι συνετό να εξεταστούν και οι τρεις. Οι προσπάθειες για έρευνα της κατακράτησης και εναπόθεσης του CO<sub>2</sub> μέχρι σήμερα, σε σχέση με την πυρηνική και ανανεώσιμη ενέργεια είναι ελάχιστες. Κατά συνέπεια, πρέπει να επεκταθούν οι προσπάθειες για κατανόηση των τεχνολογιών κατακράτησης και εναπόθεσης του CO<sub>2</sub> προκειμένου να κατανοηθεί καλύτερα η δυνατότητά τους και να μειωθούν οι σχετικές δαπάνες και οι κίνδυνοι.



Σχήμα 2.9. Σύγκριση της δυνατότητας και του κόστους (σε δολάρια) των τεχνολογιών κατακράτησης και εναπόθεσης του CO<sub>2</sub> με τις άλλες κύριες μέσο- και μακροπρόθεσμες μεθόδους, στις ΗΠΑ.

Πηγή: Howard Herzog, Elizabeth Drake, Eric Adams, «CO<sub>2</sub> Capture, Reuse, and Storage Technologies for Mitigating Global Climate Change» Energy Laboratory Massachusetts Institute of Technology 1997



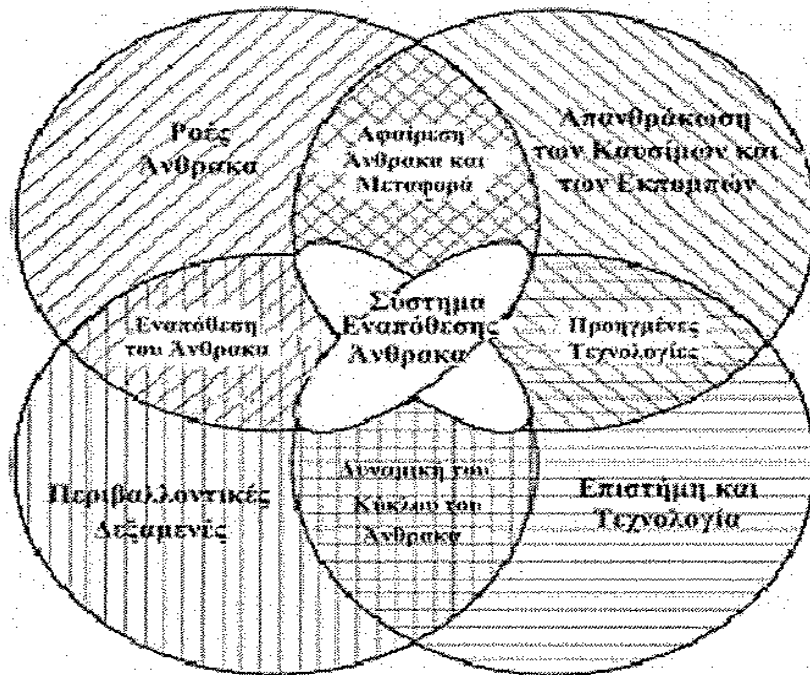
## 2.4. Μέθοδοι Εναπόθεσης του Άνθρακα

Οι κύριες μέθοδοι εναπόθεσης του άνθρακα είναι:

- *Εναπόθεση στους Ωκεανούς.* Ο ωκεανός παρέχει μια μεγάλη αποθηκευτική δυνατότητα. Γίνονται ήδη πειράματα της λίπανσης σιδήρου και άλλοι έλεγχοι για επαυξημένη υποθαλάσσια βιολογική εναπόθεση, όπως επίσης και για μεγάλου βάθους έγχυση CO<sub>2</sub>. Βελτιώσεις στην κατανόηση των υποθαλάσσιων οικοσυστημάτων πρέπει να γίνουν, πριν την εφαρμογή μεγάλων επιχειρήσεων υποθαλάσσιας εναπόθεσης.
- *Εναπόθεση σε Χερσαία Οικοσυστήματα.* Η χερσαία βιόσφαιρα είναι μια μεγάλη και προσιτή δεξαμενή για εναπόθεση του CO<sub>2</sub>, το οποίο βρίσκεται ήδη στην ατμόσφαιρα. Οι φυσικές ροές του άνθρακα είναι τεράστιες, τόσο που ακόμα και πολύ μικρό αποτέλεσμα να έχουν οι έρευνες θα είναι πολύ σημαντικό. Θα ήταν ουσιαστική η αφοσίωση στις συνέπειες της αλλαγής του άνθρακα στη φύση.
- *Εναπόθεση σε Γεωλογικές Δομές.* Περιορισμένη γεωλογική εναπόθεση ασκείται πρακτικά σήμερα, αλλά δεν κατέστη ακόμα δυνατό να προβλεφθούν με βεβαιότητα οι αποθηκευτικές ποσότητες και η ακεραιότητα για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Πολλά σημαντικά ζητήματα πρέπει να προσεχθούν για να μειωθούν τα κόστη, για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια και να μπορέσει να γίνει αποδεκτή από την κοινή γνώμη.
- *Αναπτυγμένες Βιολογικές Διαδικασίες.* Οι αναπτυγμένες βιολογικές τεχνικές μπορούν να προάγουν επιλογές, πολύ δύσκολες να προβλεφθούν. Μερικές βιολογικές διαδικασίες μπορούν να εναποθέσουν τα παράγωγα του άνθρακα με χαμηλό κόστος. Νέες προοπτικές εναπόθεσης του άνθρακα μπορούν να καθιστούν δυνατές και άλλες μπορούν να βελτιωθούν, χρησιμοποιώντας τις βελτιωμένες βιολογικές τεχνικές.
- *Αναπτυγμένες Χημικές Προσεγγίσεις.* Οι περισσότερες επιλογές εναπόθεσης του άνθρακα βασίζονται σε χημικές αντιδράσεις για να πετύχουν σταθερά και αδρανή προϊόντα. Μελέτες για να αυξηθεί η σχετική χημεία σχεδόν σίγουρα θα μειώσουν τα κόστη ή θα αυξήσουν την αποτελεσματικότητα αυτών των επιλογών. Αποτελέσματα από την έρευνα στις αναπτυγμένες χημικές τεχνικές, μπορούν επίσης να επιτρέψουν την παραγωγή χρήσιμων και ανταγωνιστικών υποπροϊόντων.

Σήμερα, ο άνθρακας απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα από πολλές πηγές οι οποίες δεν σχεδιάστηκαν για κατακράτηση, αλλά για εναπόθεση αυτών των εκπομπών. Υπάρχουν πολλές ιδέες για τεχνολογίες κατακράτησης και εναπόθεσης του άνθρακα από την καύση απολιθωμένων καυσίμων. Ωστόσο, για να μπορέσει να γίνει ένα οικονομικό σύστημα κατακράτησης και εναπόθεσης δυνατό, θα πρέπει το υπάρχον ενεργειακό σύστημα να τροποποιηθεί σημαντικά. Για αυτόν τον λόγο, ένα τεχνολογικό μοντέλο για την κατακράτηση και εναπόθεση του άνθρακα δε μπορεί να «χτιστεί» χωριστά από τη μελέτη των υπάρχουσών τεχνολογιών ενέργειας. Η εξέλιξη σε μια περιοχική επηρεάζει το συνολικό σύστημα.

Η απαραίτητη έρευνα που απαιτείται για να κατανοηθούν και να αναπτυχθούν όλες οι σημαντικές μέθοδοι που αφορούν την κατακράτηση, τη μεταφορά, τη μετατροπή και την εναπόθεση του άνθρακα φαίνεται στο σχήμα 2.10.



**Σχήμα 2.10.** Η ανάπτυξη ενός αποτελεσματικού συστήματος εναπόθεσης άνθρακα θα απαιτήσει ένα επιστημονικό πρόγραμμα, το οποίο θα επιτρέψει στην τεχνολογία και στα προηγμένα συστήματα ενέργειας να κατανοήσουν καλύτερα την περιβαλλοντική δύναμη του άνθρακα.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»  
*A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)*

Σε πρώτο επίπεδο υπάρχουν τέσσερις βασικοί τομείς στους οποίους πρέπει να στηριχθεί η έρευνα για την επίτευξη ενός αποτελεσματικού συστήματος εναπόθεσης άνθρακα, οι οποίοι είναι: οι ροές του άνθρακα, οι περιβαλλοντικές δεξαμενές, η διαθέσιμη επιστήμη και τεχνολογία για τον άνθρακα και η απανθράκωση των καυσίμων και των εκπομπών. Σε δεύτερο επίπεδο πρέπει να συμπτυχθούν και να συνεργαστούν οι βασικοί αυτοί τομείς για την ανάπτυξη τεσσάρων περισσότερο σύνθετων τομέων: την αφαίρεση και μεταφορά του άνθρακα, την εναπόθεση του άνθρακα, τις προηγμένες τεχνολογίες και τη δυναμική του κύκλου του άνθρακα. Τέλος, με βάση όλους αυτούς τους τομείς θα μπορέσει να αναπτυχθεί ένα συνολικό και αποτελεσματικό σύστημα εναπόθεσης άνθρακα (Σχήμα 2.10.).



### 3. ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΚΡΑΤΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

#### Χαρακτηρισμός των Ροών Άνθρακα (Οροι Πηγής)

Αυτό το κεφάλαιο εξετάζει τον διαχωρισμό και την κατακράτηση μόνο του ανθρωπογενούς CO<sub>2</sub>, το οποίο αποτελεί θέμα μεγάλης προτεραιότητας (Socolow 1997 Herzog 1998 FETC 1998). Οι δαπάνες διαχωρισμού και κατακράτησης, συμπεριλαμβανομένης της συμπίεσης στην επιθυμητή πίεση για την εκάστοτε μέθοδο εναπόθεσης που χρησιμοποιείται, υπολογίζονται γενικά ώστε να φθάνουν τα τρία τέταρτα των συνολικών δαπανών της ωκεάνιας ή γεωλογικής εναπόθεσης (Herzog 1998). Μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε για το IEA Greenhouse Gas R&D Programme υποστηρίζει ότι σημαντικά αυξανόμενες δαπάνες παραγωγής ενέργειας θα προκύψουν από τον διαχωρισμό και την κατακράτηση του CO<sub>2</sub> (IEA 1998). Χρησιμοποιώντας εγκαταστάσεις κονιοποιημένου άνθρακα με αποθείωση του αερίου σωλήνων για σύγκριση, το κόστος εξάλειψης των εκπομπών του CO<sub>2</sub> από προηγμένες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας κυμάνθηκε από €29,2 έως €220 ανά τόνο CO<sub>2</sub> και η αύξηση του κόστους παραγωγής ενέργειας κυμάνθηκε από 20,8 έως 179,2 mills / kWh.

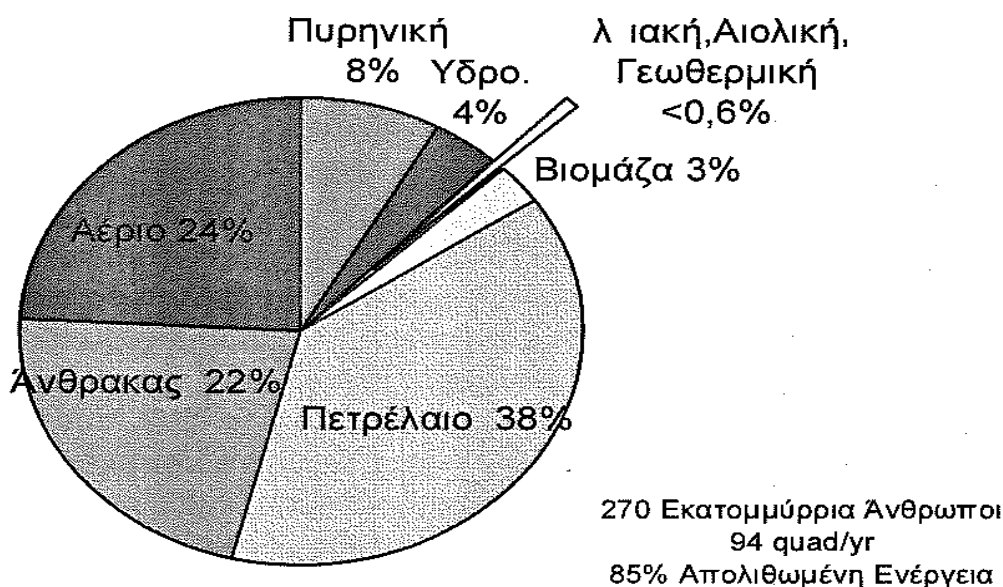
Το ευρύ φάσμα των δαπανών είναι ενδεικτικό των ιδιομορφιών των προηγμένων σταθμών παραγωγής ενέργειας και των πολλών διαφορετικών δυνατοτήτων διαχωρισμού και κατακράτησης. Αν και μερικές από τις ακριβότερες μεθόδους μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ορισμένες επιχειρήσεις παραγωγής με προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας, οι λιγότερο δαπανηρές προσεγγίσεις θα χρησιμοποιηθούν πιθανώς σε συμβατικές και προηγμένες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας. Αυτές οι λιγότερο δαπανηρές προσεγγίσεις είναι κατάλληλες για την παραγωγή ενέργειας και μια ανεξάρτητη ανάλυση (Herzog 1998) δείχνει ότι οι προσεγγίσεις αυτές θα αυξήσουν το κόστος παραγωγής ενέργειας από περίπου 16,7 έως 25 mills / kWh.

Αυτό το κεφάλαιο περιλαμβάνει όλες τις ανθρωπογενείς εκπομπές του CO<sub>2</sub>, εστιάζοντας σε εκείνες τις πηγές οι οποίες είναι περισσότερο πρόσφορες για διάφορες μεθόδους διαχωρισμού και κατακράτησης: πηγές οι οποίες συμπεριφέρονται καλύτερα στις τεχνολογίες διαχωρισμού και κατακράτησης, συμπεριλαμβανομένων μεγάλων σε έκταση πηγών, όπως οι συμβατικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας ατμού κονιοποιημένου άνθρακα, οι σταθμοί φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου και τα προηγμένα συστήματα παραγωγής ενέργειας (συμπεριλαμβανομένων εγκαταστάσεων καύσης άνθρακα ή φυσικού αερίου χρησιμοποιώντας εμπλουτισμένο αέρα ή οξυγόνο για την υποστήριξη της καύσης με ανακύκλωση του CO<sub>2</sub>, συνδυασμένων κύκλων αεριοποίησης του άνθρακα, στροβίλων υδρογόνου και κυψέλες καυσίμων). Πολλά από τα προηγμένα συστήματα θα χρησιμοποιήσουν τον εμπλουτισμένο αέρα ή το οξυγόνο για να υποστηρίξουν τη διαδικασία της καύσης. Η μείωση ή η αποβολή του μεγάλου όγκου του αζώτου και των αερίων σωλήνα βελτιώνει εντυπωσιακά την ευκαιρία για διαχωρισμό και κατακράτηση του CO<sub>2</sub> από αυτά τα συστήματα. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την καύση και την επεξεργασία θα εξαρτηθεί από την υπάρχουσα τεχνολογία (π.χ. εγκαταστάσεις ατμού καύσης άνθρακα και αεριοστρόβιλοι) και την προηγμένη τεχνολογία (π.χ. παραγωγή υδρογόνου από τα απολιθωμένα καύσιμα).

Εκτός από τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, εξετάζονται πολλές άλλες βιομηχανικές πηγές που εκπέμπουν υψηλά ποσοστά CO<sub>2</sub>, για την εφαρμογή της κατακράτησης και των τεχνολογιών εναπόθεσης. Στην παραγωγή φυσικού αερίου, το

CO<sub>2</sub> παράγεται συχνά ως υποπροϊόν. Το φυσικό αέριο μπορεί να περιέχει σημαντικά ποσά CO<sub>2</sub> (20% ή περισσότερο του όγκου), το περισσότερο από το οποίο πρέπει να αφαιρεθεί για την παραγωγή ποιοτικού αερίου σωλήνα. Για τον λόγο αυτόν, η εναπόθεση του CO<sub>2</sub> από το φυσικό αέριο αποτελεί το πρώτο λογικό βήμα της τεχνολογίας κατακράτησης του CO<sub>2</sub>, όπως φάνηκε και από το πρόγραμμα Sleipner δυτικά της Νορβηγίας, το προτεινόμενο πρόγραμμα Natuna στην Ινδονησία και το προτεινόμενο πρόγραμμα Gorgon στην Αυστραλία. Άλλες σημαντικές βιομηχανικές πηγές του CO<sub>2</sub> είναι οι εγκαταστάσεις «εξευγενισμού» του πετρελαίου, οι εγκαταστάσεις σιδήρου και χάλυβα, οι τσιμεντοβιομηχανίες και οι εγκαταστάσεις παραγωγής ασβέστη. Αν και αυτές οι πηγές συνεισφέρουν μόνο κατά ένα μικρό ποσοστό στις συνολικές εκπομπές του CO<sub>2</sub>, ο διαχωρισμός και η κατακράτηση αυτών των εκπομπών είναι εφικτοί και θα συνέβαλλαν σημαντικά στους γενικούς στόχους μείωσης των εκπομπών του CO<sub>2</sub>.

Το διάγραμμα 3.1. απεικονίζει την ενεργειακή χρήση στις ΗΠΑ από πρωταρχικές πηγές ενέργειας. Για τα τέσσερα τελευταία έτη, η παραγωγή άνθρακα στις ΗΠΑ κυμαινόταν σε επίπεδα ρεκόρ, άνω του 1 δισεκατομμυρίου τόνων ετησίως. Το μεγαλύτερο μέρος του άνθρακα καταναλώνεται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως και μερική ποσότητα φυσικού αερίου. Το μεγαλύτερο μέρος του φυσικού αερίου χρησιμοποιείται για θέρμανση χώρων και άλλες εσωτερικές, εμπορικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Η μεγαλύτερη ποσότητα του παραγόμενου πετρελαίου χρησιμοποιείται για τη μεταφορά και δε χρησιμοποιείται ουσιαστικά καθόλου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό το κεφάλαιο εστιάζει στις περισσότερες «προσαρμόσιμες» πηγές του CO<sub>2</sub> στον διαχωρισμό και την κατακράτηση· δηλαδή περιλαμβάνει, πρώτιστα, την ηλεκτρική παραγωγή, την παραγωγή υδρογόνου, την παραγωγή φυσικού αερίου, τις εγκαταστάσεις εξευγενισμού του πετρελαίου και τις βιομηχανικές διαδικασίες.



**Διάγραμμα 3.1.** Πρωταρχικές Πηγές Ενέργειας των ΗΠΑ

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»  
A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

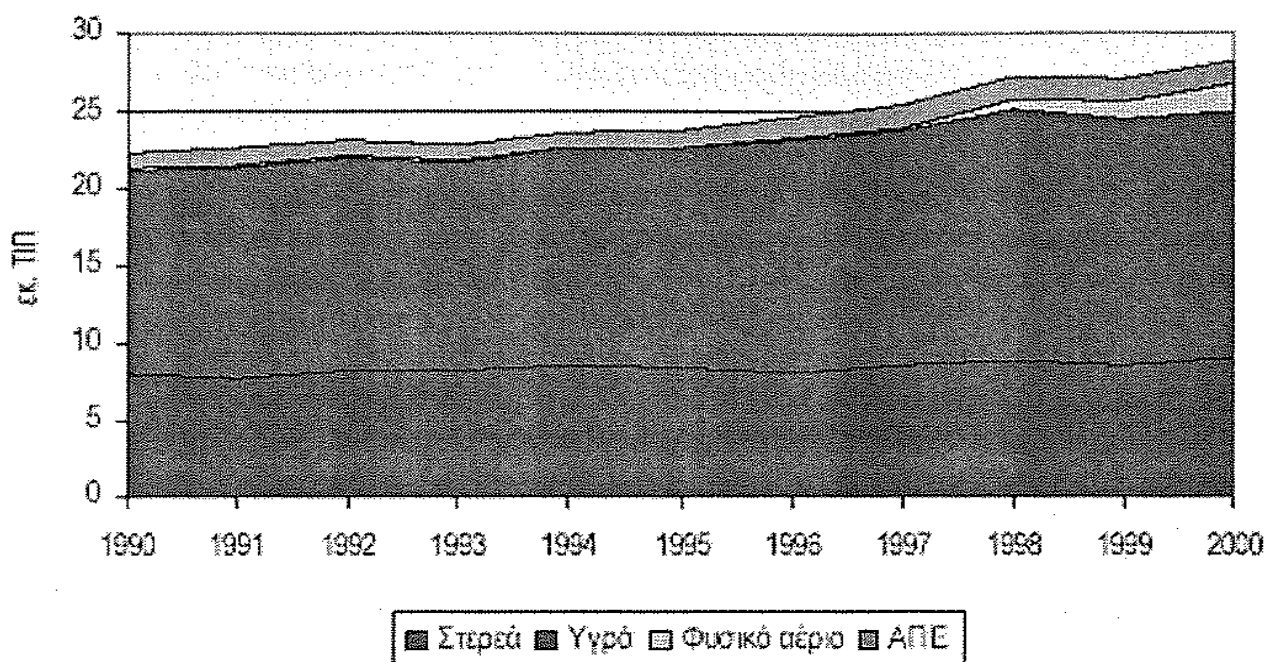
Οι διασκορπισμένες πηγές εκπομπών του CO<sub>2</sub>, ιδιαίτερα τα κατοικημένα κτίρια, οι κινητές μηχανές ανάφλεξης και οι μηχανές Diesel, είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον-

σες πηγές για την εφαρμογή οικονομικά αποδοτικών μεθόδων διαχωρισμού και κατακράτησης. Η ανάγκη να χρησιμοποιηθούν τα απολιθωμένα καύσιμα για να παραχθεί το υδρογόνο για τις κυψέλες καυσίμων θα μπορούσε να έχει σημαντική επίδραση στον διαχωρισμό και την κατακράτηση του CO<sub>2</sub>. Παραδείγματος χάριν, εάν χρησιμοποιηθεί η αποθήκευση υδρογόνου στα λεωφορεία και στα οχήματα, οι κεντρικές εγκαταστάσεις παραγωγής υδρογόνου θα μπορούσαν να χτιστούν έτσι ώστε να επιτρέπουν τον διαχωρισμό και την κατακράτηση του CO<sub>2</sub>. Τέτοιες κεντρικές εγκαταστάσεις παραγωγής υδρογόνου εξετάζονται σε αυτό το κεφάλαιο. Άλλα προηγμένα συστήματα παραγωγής ενέργειας, όπως οι στρόβιλοι υδρογόνου, που θα χρησιμοποιούν υδρογόνο ως καύσιμο έχουν, επίσης, σημαντικές επιπτώσεις όσον αφορά την ανάγκη για κεντρικές εγκαταστάσεις παραγωγής υδρογόνου και την ευκαιρία για διαχωρισμό και κατακράτηση του CO<sub>2</sub>. Μελλοντικά, μπορεί επίσης να εξαπλωθεί η χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων. Αν γινόταν αυτό, ο διαχωρισμός και η κατακράτηση του CO<sub>2</sub> στους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την επαναφόρτιση των ηλεκτρικών μπαταριών των οχημάτων, θα μείωναν έμμεσα τις εκπομπές του CO<sub>2</sub> από τον τομέα των μεταφορών. Ωστόσο, μια από τις συνέπειες της άρσης του ελέγχου της βιομηχανίας ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να είναι η εισαγωγή μιας σημαντικά διανεμημένης παροχής ηλεκτρικού ρεύματος. Ανάλογα με το μέγεθος και τη φύση αυτών των εγκαταστάσεων ηλεκτρικής παραγωγής, μια τέτοια αλλαγή θα μπορούσε να ασκήσει αρνητική επίδραση στη δυνατότητα διαχωρισμού και κατακράτησης του CO<sub>2</sub>.

Οι προηγμένες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας με καύση άνθρακα, όπως παραδείγματος χάριν μια πιλοτική εγκατάσταση αεριοποίησης άνθρακα 800 τόνων ανά ημέρα, θα έχουν κατά 20 με 35% υψηλότερη αποδοτικότητα ενεργειακής μετατροπής σε σχέση με τις συμβατικές εγκαταστάσεις ατμού κονιοποιημένου άνθρακα. Αυτές οι προηγμένες εγκαταστάσεις είναι, επίσης, πολύ περισσότερο “πρόσφορες” για τη διαχείριση άνθρακα από τις συμβατικές.

Οι συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> στα ρεύματα αποβλήτων θα κυμανθούν από 5% για τις παρούσες εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, έως περίπου 100% για κάποιες προηγμένες τεχνολογίες. Κατά τον διαχωρισμό και την κατακράτηση είναι πιθανό το ρεύμα τροφοδοσίας να περιέχει μικρές ποσότητες ακαθαρσιών, όπως οξυγόνο, οξείδια του θείου και οξείδια αζώτου, από την καύση του φυσικού αερίου ή την προηγμένη επεξεργασία των απολιθωμένων καυσίμων σε υδρογόνο. Για μερικές τρέχουσες και νέες τεχνολογίες που περιλαμβάνουν την καύση του άνθρακα, τα ρεύματα τροφοδοσίας θα περιέχουν μεγάλες ποσότητες αζώτου, οξυγόνου, υδρατμών, μορίων και πτητικών. Το ρεύμα τροφοδοσίας μπορεί επίσης να μολυνθεί με χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση άλλων συστατικών (π.χ. οξειδίων θείου ή αζώτου). Οι πιέσεις του ρεύματος τροφοδοσίας θα κυμανθούν από ατμοσφαιρικές (για τις τρέχουσες τεχνολογίες), ως δεκάδες φορές μεγαλύτερες των ατμοσφαιρικών (για μερικές προηγμένες τεχνολογίες). Οι θερμοκρασίες του ρεύματος τροφοδοσίας θα κυμανθούν από θερμές (~50°C) ως πολύ θερμές (εκατοντάδες °C).

Η εξέλιξη της πρωτογενούς ενεργειακής ζήτησης στην Ελλάδα για την περίοδο 1990 έως 2000 εκφρασμένη σε μονάδες θερμογόνου δύναμης (τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου, ΤΠ), παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1.

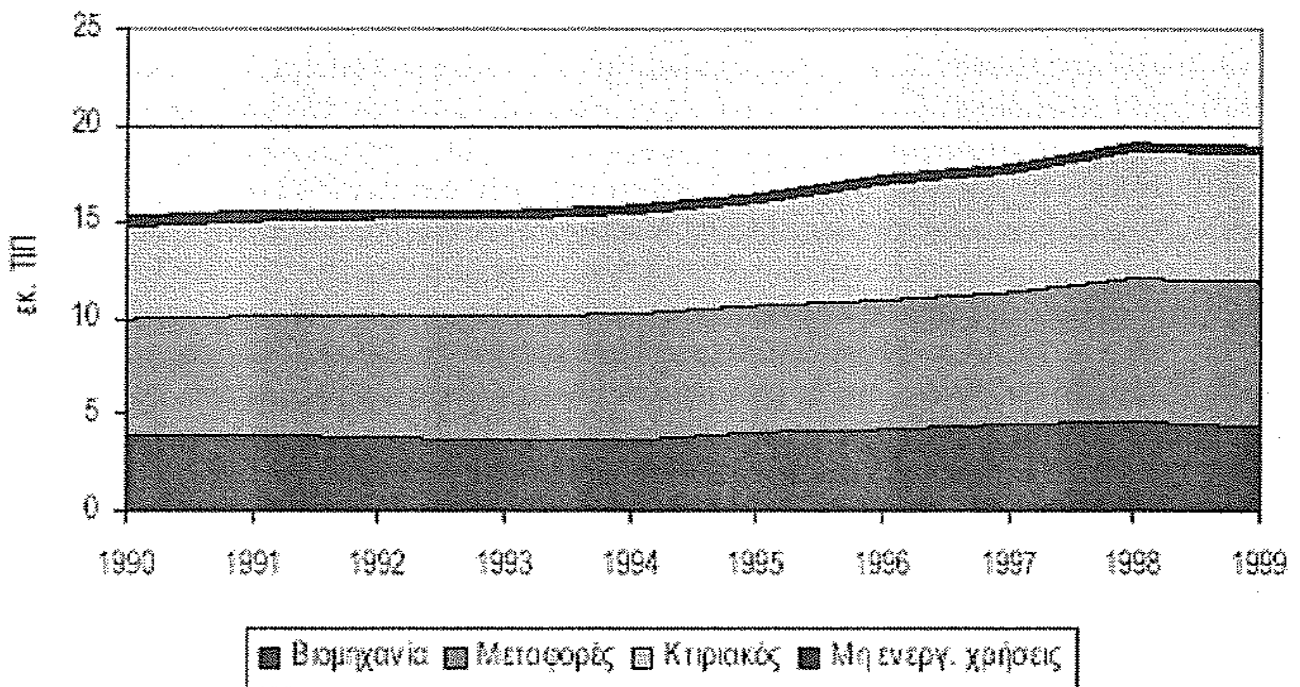


**Σχήμα 3.1.** Εξέλιξη της πρωτογενούς ενεργειακής ζήτησης στην Ελλάδα

Πηγή: Δανάη Διακουλάκη, Αν. Καθηγήτρια ΕΜΠ, μέλος ΔΣ ΕΚΠΑΑ, «Περιβαλλοντικά Σήματα-Σχέδιο Έκθεσης Δεικτών Αειφορίας», Εθνικό Κέντρο Περιβάλλοντος & Αειφόρου Ανάπτυξης, Ελλάδα 2003

Η ενεργειακή ζήτηση στη χώρα αυξάνεται με ένα μέσο ετήσιο ρυθμό 2% κατά τη διάρκεια της δεκαετίας 1990-2000. Η αύξηση αυτή αφορά κυρίως στα υγρά καύσιμα των οποίων η συμμετοχή παραμένει σταθερή γύρω στο 60%, μέχρι το 1998, όταν αρχίζει και γίνεται αισθητή η διείσδυση του φυσικού αερίου. Τα στερεά καύσιμα εμφανίζουν ένα σταθερό ύψος κατανάλωσης, ενώ πρόσφατα οι ΑΠΕ δείχνουν μία ελαφρά ανοδική τάση. Γενικά, η ενεργειακή ζήτηση ακολουθεί σταθερά αυξητική πορεία και αμετάβλητη σύνθεση μέχρι τα τέλη της προηγούμενης δεκαετίας που αρχίζουν να διαφαίνονται τάσεις διαφοροποίησης του ενεργειακού μίγματος.

Η εξέλιξη της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης στην Ελλάδα για την περίοδο 1990 έως 2000 εκφρασμένη σε μονάδες θερμογόνου δύναμης (τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου, ΤΠ), παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2. Σε σύγκριση με το ύψος της πρωτογενούς ενεργειακής ζήτησης προσδιορίζει το ύψος των απωλειών του ενεργειακού συστήματος που οφείλεται κυρίως στις διεργασίες μετατροπής στις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής.



**Σχήμα 3.2.** Εξέλιξη της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης στην Ελλάδα

Πηγή: Δανάη Διακουλάκη, Αν. Καθηγήτρια ΕΜΠ, μέλος ΔΣ ΕΚΠΑΑ, «Περιβαλλοντικά Σήματα-Σχέδιο Έκθεσης Δεικτών Αειφορίας», Εθνικό Κέντρο Περιβάλλοντος & Αειφόρου Ανάπτυξης, Ελλάδα 2003

Το ύψος της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης ανέρχεται σε 19 εκ. ΤΠΠ, έναντι 28 εκ. ΤΠΠ πρωτογενούς ζήτησης, διαφορά που μεταφράζεται σε ένα ποσοστό απωλειών 32%, με μέσο όρο 28% στην ΕΕ. Οι μεταφορές αντιπροσωπεύουν το 40% περίπου της τελικής κατανάλωσης ενέργειας. Δεύτερος μεγαλύτερος καταναλωτής είναι ο κτιριακός τομέας που έχει φθάσει να απορροφά περίπου 36% του συνόλου εμφανίζοντας και το μεγαλύτερο μέσο ετήσιο ρυθμό αύξησης της ζήτησης. Αντίθετα, ο βιομηχανικός τομέας εμφανίζει ένα σχετικά σταθερό επίπεδο ζήτησης. Το 75% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας κατευθύνεται στις μεταφορές και τον κτιριακό τομέα, γεγονός που υποδηλώνει τις δυσκολίες περιορισμού της ζήτησης.

### 3.1. Τρέχουσες και Πιθανές Επιστημονικές και Τεχνολογικές Απαιτήσεις και Ικανότητες

Ο στόχος του διαχωρισμού και της κατακράτησης είναι να απομονωθεί ο άνθρακας από τις πηγές του, σε μια μορφή κατάλληλη για τη μεταφορά και την εναπόθεσή του. Η τεχνολογία που απαιτείται για την εκτέλεση αυτής της λειτουργίας εξαρτάται από τη φύση της πηγής και τη μορφή του άνθρακα, οι οποίες είναι κατάλληλες για τα επόμενα βήματα που οδηγούν στην εναπόθεση. Πολλές μορφές είναι δυνατές, συμπεριλαμβανομένου του αεριώδους CO<sub>2</sub> και των «clathrates». Υψηλά επίπεδα καθαρότητας (99+%) είναι δυνατά, αλλά με σημαντικό κόστος.

Οι ακαθαρσίες στο προϊόν πρέπει να είναι αρκετά χαμηλών συγκεντρώσεων, ώστε οι διαδικασίες μεταφοράς και εναπόθεσης να είναι εφικτές. Οι απαιτήσεις καθαρότητας που επιβάλλονται από τις διαδικασίες εναπόθεσης δεν είναι γνωστές, διότι η τεχνολογία εναπόθεσης αναπτύσσεται ταυτόχρονα. Κάποιες αρχικές έρευνες για την ανάπτυξη προσωρινών απαιτήσεων καθαρότητας θα είναι απαραίτητες, οι οποίες όμως θα πρέπει να αναθεωρηθούν και να τροποποιηθούν, καθώς οι απαιτήσεις των διάφορων μεθόδων εναπόθεσης θα αποσαφηνίζονται. Οι τελικές προδιαγραφές μπο-

ρούν να υφίστανται για το τελικό προϊόν του διαχωρισμού και της κατακράτησης ή για ένα ενδιάμεσο προϊόν, το οποίο μετατρέπεται σε μια άλλη μορφή (π.χ. ανθρακικό άλας) πριν από τη μεταφορά.

Σε αυτήν την παράγραφο κατηγοριοποιούνται οι θεωρητικά συμβατικές μέθοδοι διαχωρισμού και κατακράτησης, που εφαρμόζονται για τις ανθρωπογενείς εκπομπές του CO<sub>2</sub>. Οι τεχνικές για τις οποίες είναι γνωστά πολύ λίγα ή είναι ακόμα άγνωστες, θα μπορούσαν τελικά να γίνουν οι επιθυμητές επιλογές. Τα χαρακτηριστικά απόδοσης των μεθόδων διαχωρισμού και κατακράτησης του CO<sub>2</sub> που προσδιορίζονται (συμπεριλαμβανομένων της καθαρότητας των προϊόντων του CO<sub>2</sub> και των όρων λειτουργίας), διαφέρουν λόγω των λειτουργικών ή τεχνικών εκτιμήσεων.

Οι πιο ελκυστικές τρέχουσες προσδιορίσιμες μέθοδοι για διαχωρισμό και κατακράτηση του CO<sub>2</sub> είναι:

- Χημική και φυσική απορρόφηση του CO<sub>2</sub> μέσω διαλυτών
- Φυσική και χημική προσρόφηση του CO<sub>2</sub> σε στερεά
- Απόσταξη χαμηλής θερμοκρασίας
- Μembrάνες διαχωρισμού αερίου
- Ορυκτοποίηση και βιο-ορυκτοποίηση
- Βλάστηση

Αυτές οι μέθοδοι προσδιορίστηκαν και συμπεριλήφθηκαν ως πιθανές επιλογές, λόγω της απλότητας της διαδικασίας, της ήπιας περιβαλλοντικής επίδρασης και του κόστους. Αυτήν την περίοδο, διάφορες εγκαταστάσεις διαχωρισμού και κατακράτησης του CO<sub>2</sub> χρησιμοποιούν μία ή περισσότερες από αυτές τις μεθόδους για να παράγουν CO<sub>2</sub> για εμπορική χρήση. Ο διαχωρισμός από τη βλάστηση και μερικές μέθοδοι ορυκτοποίησης αποτελούν επίσης μεθόδους εναπόθεσης και παρουσιάζονται σε επόμενα κεφάλαια.

### *3.1.1. Χημική και Φυσική Απορρόφηση του CO<sub>2</sub> μέσω Διαλυτών*

Το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να αφαιρεθεί από τα ρεύματα αερίου με φυσική ή χημική απορρόφηση. Οι διαδικασίες φυσικής απορρόφησης υπακούουν στον νόμο Henry (δηλαδή, εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και την πίεση, με την απορρόφηση να πραγματοποιείται σε υψηλές πιέσεις και χαμηλές θερμοκρασίες). Τυπικά, αυτές οι διαδικασίες συμβαίνουν όταν η συγκέντρωση (δηλαδή, μερική πίεση του CO<sub>2</sub>) είναι υψηλή (>525 kPa). Η κατακράτηση 0,1 έως 6% CO<sub>2</sub> από τα φρεάτια παραγωγής φυσικού αερίου μέσω χημικής απορρόφησης χρησιμοποιώντας αμίνες («amines»), μπορεί να επεκταθεί ικανοποιητικά σε μακρινά πεδία. Αυτή η προσέγγιση αποτελεί σήμερα την πιο διαδεδομένη εμπορική τεχνολογία κατακράτησης. Εντούτοις, σε άλλες εμπορικές εφαρμογές, οι τυπικοί διαλύτες για τη φυσική απορρόφηση του CO<sub>2</sub> περιλαμβάνουν ενώσεις με βάση τη γλυκόλη (π.χ. ο διμαιθυλικός αιθέρας της γλυκόλης πολυαιθυλενίου) και την κρύα μεθανόλη.

Η χημική απορρόφηση προτιμάται για χαμηλές, στο να συγκρατηθούν, μερικές πιέσεις του CO<sub>2</sub>. Επειδή το CO<sub>2</sub> είναι ένα όξινο αέριο, η χημική του απορρόφηση από τα ρεύματα αέρα, όπως τα αέρια σωλήνα, εξαρτάται από τις αντιδράσεις ουδετεροποίησης με βάση το οξύ, χρησιμοποιώντας βασικούς διαλύτες. Ο πιο κοινός μεταξύ των διαλυτών εμπορικής χρήσης για εξουδετέρωση του CO<sub>2</sub> είναι αλκανολαμίνες («alcanolamines»), όπως η μονοαιθανολαμίνη (MEA), η διαιθανολαμίνη (DEA) και η μεθυλοδιαιθανολαμίνη (MDEA). Άλλοι χημικοί διαλύτες που χρησιμοποιούνται είναι



η αμμωνία και το υπέρθερμο ανθρακικό άλας καλίου. Τα αέρια σωλήνα βρίσκονται τυπικά σε ατμοσφαιρική πίεση. Ανάλογα με την περιεκτικότητα του αερίου σωλήνα σε CO<sub>2</sub>, η μερική πίεση του CO<sub>2</sub> μπορεί να ποικίλει από 3,5 έως 21 kPa. Για ικανοποιητικά επίπεδα ανάκτησης CO<sub>2</sub> σε τέτοιες χαμηλές μερικές πιέσεις, οι αλκανολαμίνες είναι οι καλύτεροι χημικοί διαλύτες. Εντούτοις, η χρήση αυτών των διαλυτών πρέπει να ισορροπηθεί ενάντια στις υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις της αναπαραγωγής τους, χρησιμοποιώντας φιλτράρισμα ατμού («steam-stripping»).

Τα αέρια σωλήνα περιέχουν μολυσματικούς παράγοντες, όπως SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>2</sub>, υδρογονάνθρακες και μόρια. Η παρουσία αυτών των ακαθαρσιών μπορεί να μειώσει την ικανότητα απορρόφησης των αμινών, καθώς επίσης και να δημιουργήσει λειτουργικές δυσκολίες, όπως η οξειδωση. Για να αποφευχθούν τέτοια προβλήματα, συχνά αυτοί οι μολυσματικοί παράγοντες μειώνονται στα αποδεκτά επίπεδα μέσω κατάλληλων τεχνικών προεπεξεργασίας. Μερικές εμπορικές διαδικασίες χειρίζονται τέτοιες δυσκολίες μέσω της προεπεξεργασίας και / ή της χρήσης χημικών ανασταλτικών παραγόντων, κατά τη διαδικασία απορρόφησης. Εντούτοις, αυτές οι διαδικασίες τείνουν να είναι ακριβότερες από τις συμβατικές διαδικασίες απορρόφησης με βάση την αλκανολαμίνη.

Μερικά από τα χαρακτηριστικά προβλήματα λειτουργικότητας που αντιμετωπίστηκαν χρησιμοποιώντας συμβατικούς δίσκους ή συσκευασμένες στήλες για επαφή αερίου – υγρού είναι το άφρισμα, η παράσυρση ατμού του διαλύτη και η ανάγκη επαναπλήρωσης του διαλύτη σε μικρές ποσότητες. Ωστόσο, αυτά τα προβλήματα έχουν σχετικά μικρή επίδραση στις συνολικές δαπάνες του συστήματος της διαδικασίας απορρόφησης. Οι επαφείς μεμβρανών που τυπικά χρησιμοποιούν πολυμερείς μεμβράνες μπορούν να προσφέρουν μερικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών επαφών, τα οποία αναμένεται να έχουν μεγαλύτερο πλεονέκτημα σε συστήματα όπου το μέγεθος και το βάρος πρέπει να ελαχιστοποιηθούν (π.χ. στις ωκεάνιες πλατφόρμες). Τα πιθανά οφέλη περιλαμβάνουν την εξάλειψη του αφρίσματος και της παράσυρσης του ατμού, καθώς επίσης και τη δυνατότητα να διατηρηθούν ανεξάρτητα τα ποσοστά ροής υγρού και αερίου.

Ο διαχωρισμός του CO<sub>2</sub> και άλλων μολυσματικών αερίων χρησιμοποιώντας συστήματα προσρόφησης είναι μια εμπορική πρακτική στην παραγωγή και στον καθαρισμό του υδρογόνου. Οι τυπικές εγκαταστάσεις μετατροπής υδρογόνου παράγουν 35 εκατομμύρια τυποποιημένα κυβικά πόδια υδρογόνου και περίπου 9 εκατομμύρια τυποποιημένα κυβικά πόδια CO<sub>2</sub> ανά ημέρα. Αυτές οι εγκαταστάσεις δε λειτουργούν συνήθως με τρόπο που να οδηγεί στην πλήρη μετατροπή του μεθανίου σε υδρογόνο και CO<sub>2</sub>. Ωστόσο, λειτουργικές τροποποιήσεις θα μπορούσαν να γίνουν, ώστε ουσιαστικά να παράγεται καθαρό υδρογόνο και CO<sub>2</sub>. Πολυάριθμες τέτοιες εγκαταστάσεις λειτουργούν παγκοσμίως, αλλά το CO<sub>2</sub> τυπικά ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα.

Η πλατφόρμα Sleipner T (T= επεξεργασία) στη Βόρεια Θάλασσα χρησιμοποιείται από την Statoil, την κρατική Νορβηγική επιχείρηση πετρελαίου, για την αφαίρεση του CO<sub>2</sub> από το χαμηλής ποιότητας φυσικό αέριο. Μια διαδικασία απορρόφησης αμινών χρησιμοποιείται για να αφαιρεθεί το CO<sub>2</sub>, το οποίο στη συνέχεια συμπιέζεται και διοχετεύεται με σωλήνες στην παρακείμενη πλατφόρμα Sleipner A, για έγχυση στον σχηματισμό Utsira, 1000m κάτω από τον βυθό. Η Sleipner T είναι αντιπροσωπευτική της τεχνολογίας απορρόφησης που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τον διαχωρισμό και την κατακράτηση του CO<sub>2</sub> και χρησιμοποιείται συγκεκριμένα ως στρατηγική μείωσης – μετριασμού του CO<sub>2</sub>. Αυτή είναι η μεγαλύτερη επιχείρηση διαχωρισμού, κατακράτησης και εναπόθεσης του CO<sub>2</sub> στον κόσμο και εναποθέτει εκατομμύρια τόνους CO<sub>2</sub> ετησίως.



Η ανάκτηση των πτητικών ιχνοστοιχείων, όπως ο υδράργυρος, από τα απολιθωμένα καύσιμα είναι ένας παράγοντας της ρυθμιστικής διαδικασίας και πρέπει να εξεταστεί. Η βέλτιστη στρατηγική ανάκτησης των ιχνοστοιχείων μπορεί να μην είναι σύμφωνη με τη βέλτιστη στρατηγική κατακράτησης του CO<sub>2</sub>. Επίσης, οι τρέχουσες τεχνολογίες που ελαχιστοποιούν τις ενεργειακές δαπάνες κατακράτησης του CO<sub>2</sub>, πιθανώς δε θα είναι συμβατές με μια στρατηγική κατακράτησης 100% του CO<sub>2</sub>. Βελτιωμένες μέθοδοι πρέπει να αναπτυχθούν για να μειωθούν οι συνολικές δαπάνες του συστήματος ανάκτησης του CO<sub>2</sub>. Συγκεκριμένοι τομείς που αξίζουν προσοχή είναι:

- Απαιτείται σημαντικό έργο ανάπτυξης των επαφών μεμβρανών, ώστε να βελτιωθεί η χημική συμβατότητά τους με τις αλκανολαμίνες και η αντίστασή τους σε υψηλές θερμοκρασίες, καθώς επίσης και να ελαχιστοποιηθεί το κόστος τους.
- Οι εμπορικά διαθέσιμες αλκανολαμίνες, όπως MEA, DEA και MDEA, έχουν διαφορετικά κόστη, ποσοστό αντίδρασης με το CO<sub>2</sub>, απορροφητικές ικανότητες και ποσοστά οξείδωσης. Οι ερευνητές έχουν μια ευκαιρία να βελτιστοποιήσουν τους υπάρχοντες διαλύτες ή να αναπτύξουν νέους, για να μειώσουν τις κύριες, τις συνολικές και τις λειτουργικές δαπάνες. Ανάπτυξη των χημικών και φυσικών διαλυτών και των συστημάτων θα απαιτηθεί.
- Είναι πιθανό ότι νέοι διαλύτες και νέα τμήματα του συστήματος θα μειώσουν τις δαπάνες κεφαλαίου και ενέργειας για την επεξεργασία του αερίου σωλήνα, ώστε να διαχωριστεί και να κατακρατηθεί το CO<sub>2</sub>. Συνετά σχέδια δράσης περιλαμβάνουν επένδυση στην έρευνα για νέους διαλύτες, ιδιαίτερα εκείνους που είναι πρόσφοροι για χρήση σε προηγμένα συστήματα και επένδυση στη μελέτη συστημάτων ώστε να προσδιοριστούν οι καλύτερες δυνατές διαμορφώσεις των διαδικασιών και του εξοπλισμού, ιδιαίτερα όσων σχετίζονται με το κόστος και την απλότητα της διαδικασίας.
- Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει εμφανιστεί στο πρόγραμμα για την τοποθέτηση συμβατικών λεβήτων κονιοποιημένου άνθρακα για ανακύκλωση του CO<sub>2</sub>, ώστε να αυξηθεί η συγκέντρωσή του ως το σημείο στο οποίο η ανάκτηση γίνεται οικονομικά εφικτή.
- Η μοριακή μοντελοποίηση της διαδικασίας απορρόφησης βοηθάει στην επιλογή των απορροφητικών.
- Απαιτείται κινητική μοντελοποίηση για να καθιερωθεί ή να επιβεβαιωθεί το ποσοστό περιορισμού των βημάτων της διαδικασίας απορρόφησης.
- Η σύνθεση των απορροφητικών που βασίζεται εν μέρει στα μοριακά και κινητικά μοντέλα είναι μια κατάλληλη επένδυση για έρευνα και ανάπτυξη.
- Συστήματα που χρησιμοποιούν αέρα για να υποστηρίξουν την καύση, παρουσιάζουν δυσκολίες στον διαχωρισμό και την κατακράτηση του CO<sub>2</sub>, εξαιτίας του μεγάλου ποσοστού (~80%) διαλυμένου αζώτου στο ρεύμα της διαδικασίας. Η ενσωματωμένες εγκαταστάσεις αεριοποίησης συνδυασμένου κύκλου (IGCC) θα μπορούσαν να παρέχουν μια ιδανική ευκαιρία για την κατακράτηση του CO<sub>2</sub>, όταν οξυγόνο παρά αέρας χρησιμοποιείται για την υποστήριξη της διαδικασίας αεριοποίησης. (Στους συνδυασμένους κύκλους, οι οποίοι περιλαμβάνουν στροβίλους αερίου και ατμού, τα υπέρθερμα αέρια εξάτμισης από τους αεριοστροβίλους, χρησιμοποιούνται για να παράγουν τον ατμό των ατμοστροβίλων). Το προερχόμενο από γαιάνθρακα αέριο για τους αεριοστροβίλους παράγεται σε μια μορφή υψηλής συγκέντρωσης και πίεσης, η οποία επιτρέπει τη χρήση ποικίλων διαλυτών που μπορούν να κατακρατήσουν το CO<sub>2</sub>, από το ρεύμα αερίου πριν από την καύση. Στη βασική περίπτωση, τα πλεονεκτήματα κόστους και ενέργειας των χημικών διαδικασιών απορρόφη-



σης που υπάρχουν σε έναν IGCC ή σε άλλα προηγμένα συστήματα, πρέπει να εφαρμοστούν σε εμπορική βάση, ως εφικτή επιλογή.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»

*A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)*

### 3.1.2. Φυσική και Χημική Προσρόφηση του CO<sub>2</sub> σε Στερεά

Ο εκλεκτικός διαχωρισμός του CO<sub>2</sub> μπορεί να επιτευχθεί μέσω φυσικής προσρόφησης του αερίου σε στερεά μεγάλης επιφάνειας. Η μεγάλη περιοχή επιφάνειας προκύπτει από τη δημιουργία πολύ λεπτού πορώδους επιφάνειας, μέσω μεθόδων ενεργοποίησης επιφάνειας χρησιμοποιώντας για παράδειγμα ατμό, οξυγόνο, ή CO<sub>2</sub>. Μερικά φυσικά εμφανιζόμενα υλικά (π.χ. «zeolites») έχουν μεγάλες περιοχές επιφάνειας και προσροφούν αποτελεσματικά μερικά αέρια. Οι ικανότητες και οι κινητικές της προσρόφησης εξαρτώνται από πολυάριθμους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων του μεγέθους των πόρων των προσροφητικών, του όγκου των πόρων, την περιοχή επιφάνειας και της συγγένειας του προσροφόμενου αερίου με το προσροφητικό.

Μια μελέτη της IEA (1998) αξιολόγησε τα φυσικά συστήματα προσρόφησης που βασίζονται στους «zeolites», τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην προσρόφηση ταλάντευσης πίεσης (PSA) και σε θερμικούς ή θερμοκρασιακούς τρόπους προσρόφησης ταλάντευσης (TSA). Κατά τη διαδικασία PSA, τα αέρια προσροφώνται σε υψηλές πιέσεις, απομονώνονται και έπειτα εκροφώνται με τη μείωση της πίεσης. Μια παραλλαγή της PSA, αποκαλούμενη κενή προσρόφηση ταλάντευσης, χρησιμοποιεί έναν κενό κύκλο εκρόφησης. Κατά τη διαδικασία TSA, τα αέρια προσροφώνται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, απομονώνονται και έπειτα εκροφώνται με θέρμανση. Αυτές οι διαδικασίες είναι ενεργοβόρες και δαπανηρές. Η έκθεση IEA καταλήγει στο συμπέρασμα ότι οι τεχνολογίες PSA και TSA δεν είναι ελκυστικές για τα συστήματα που τροφοδοτούνται με αέριο και άνθρακα, τα οποία είχαν περιληφθεί σε εκείνη τη μελέτη. Εντούτοις, η PSA και η TSA είναι εμπορικά εφαρμόσιμες μέθοδοι διαχωρισμού και κατακράτησης αερίου και χρησιμοποιούνται ως έναν βαθμό στην παραγωγή υδρογόνου και στην αφαίρεση του CO<sub>2</sub> από το φυσικό αέριο χαμηλής ποιότητας. Επομένως, αυτές οι μέθοδοι σαφώς ισχύουν για τον διαχωρισμό και την κατακράτηση του CO<sub>2</sub> από μερικές σχετικά μεγάλες πηγές.

Οι εγκαταστάσεις παραγωγής υδρογόνου που χρησιμοποιούν την PSA παράγουν ένα μη καθαρό ρεύμα CO<sub>2</sub> που περιέχει υδρογόνο, μεθάνιο, CO και άζωτο, τα οποία δεν έχουν ανακτηθεί. Αυτό το ρεύμα ανακυκλώνεται ως καύσιμο και στη συνέχεια κυκλοφορεί ως αέριο σωλήνα. Τα φυσικά προσροφητικά πάσχουν από χαμηλή επιλεκτικότητα και χαμηλή αποδοτικότητα και περιορίζονται σε λειτουργίες χαμηλής θερμοκρασίας. Συγκεκριμένοι τομείς που αξίζουν προσοχή είναι:

- Προσροφητικά που μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες με παρουσία ατμού, πρέπει να αναπτυχθούν και ήδη βρίσκονται υπό εξέταση.
- Είναι σημαντική η εκτέλεση προγραμμάτων τα οποία στοχεύουν στη σύνθεση προσροφητικών με αυξημένη προσροφητική ικανότητα, βελτιωμένες κινητικές και ικανά για παραγωγή ενός καθαρού προϊόντος CO<sub>2</sub>, καθώς επίσης και στη βελτίωση των μεθόδων για την εκτέλεση της διαδικασίας εκρόφησης – προσρόφησης.

- Απαιτείται μοριακή μοντελοποίηση των προσροφητικών για να βοηθήσει στον προσδιορισμό των εκλεκτικών στο CO<sub>2</sub> προσροφητικών.
- Απαιτείται κινητική μοντελοποίηση για να προσδιορίσει το ποσοστό περιορισμού των βημάτων και για να εστιάσει στην ανάπτυξη προσροφητικών.
- Πρέπει να αναπτυχθούν νέα, ανεκτικά στον ατμό, υψηλής θερμοκρασίας απορροφητικά υλικά. Αυτά τα απορροφητικά υλικά θα είναι σε θέση να απορροφήσουν το CO<sub>2</sub> με παρουσία ατμού, αντίθετα με τους «zeolites» και τα άλλα ανόργανα απορροφητικά. Το απορροφητικό για να αναπαραχθεί θα χρειαζόταν πολύ χαμηλή ενέργεια. Η δυνατότητα αναπαραγωγής θα εξάλειφε τα προβλήματα χειρισμού του υλικού, εφόσον τώρα χρησιμοποιούνται φυσικά μεταλλεύματα, τα οποία δεν αναπαράγονται. Η σταθερότητα του απορροφητικού μετά από χιλιάδες κύκλους, πρέπει να καταδειχθεί.
- Πρέπει να ερευνηθούν νέα σχέδια προσρόφησης για τον διαχωρισμό και την κατακράτηση του CO<sub>2</sub>. Η δυνατότητα ελέγχου των εκπομπών του CO<sub>2</sub> από τα συστήματα που τροφοδοτούνται με απολιθωμένα καύσιμα θα μπορούσε να βελτιωθεί σημαντικά, εάν αναπτυχθούν προσροφητικά, τα οποία είναι ικανά για προσρόφηση σε υψηλές θερμοκρασίες και εκρόφηση χρησιμοποιώντας νέες διαδικασίες.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
«Carbon Sequestration, State of the Science»

*A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)*

### 3.1.3. Απόσταξη Χαμηλής Θερμοκρασίας

Η απόσταξη χαμηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται ευρέως εμπορικά για τη ρευστοποίηση και τον καθαρισμό του CO<sub>2</sub> από τις πηγές υψηλής καθαρότητας (χαρακτηριστικά ένα ρεύμα με >90% CO<sub>2</sub>). Στην απόσταξη χαμηλής θερμοκρασίας, ένα υγρό με χαμηλό σημείο βρασμού καθαρίζεται με εξάτμιση και στη συνέχεια με συμπύκνωση. Ωστόσο, τέτοιες διαδικασίες δε χρησιμοποιούνται για τον διαχωρισμό του CO<sub>2</sub> από σημαντικά φτωχότερα σε CO<sub>2</sub> ρεύματα. Η εφαρμογή της απόσταξης για τον καθαρισμό των φτωχών ρευμάτων του CO<sub>2</sub> απαιτεί χαμηλής θερμοκρασίας ψύξη (<0°C) και στερεά που επεξεργάζονται κάτω από το τριπλό σημείο του CO<sub>2</sub> (-57°C). Μια κατοχυρωμένη με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας διαδικασία διαχωρισμού του CO<sub>2</sub> από το φυσικό αέριο που παρέχει υγρό CO<sub>2</sub>, είναι ένα παράδειγμα μιας τέτοιας χαμηλής θερμοκρασίας διαδικασίας (Valencia and Denton 1985; Victory and Valencia 1987).

Η απόσταξη έχει γενικά καλές οικονομίες κλίμακας, δεδομένου ότι είναι οικονομικά αποδοτική για τις μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις και μπορεί γενικά να παράγει ένα σχετικά καθαρό προϊόν. Η απόσταξη είναι η πιο αποδοτική οικονομικά μέθοδος, όταν τα αέρια τροφοδοσίας περιέχουν συστατικά με πολύ διαφορετικά σημεία βρασμού και όταν το αέριο τροφοδοσίας είναι διαθέσιμο σε υψηλή πίεση και τα περισσότερα από τα προϊόντα απαιτούνται επίσης σε υψηλή πίεση. Η απόσταξη χαμηλής θερμοκρασίας επιτρέπει την άμεση παραγωγή υγρού CO<sub>2</sub>, το οποίο μπορεί να αποθηκευτεί ή να εναποτεθεί σε υψηλή πίεση, μέσω της υγρής άντλησης. Το σημαντικότερο μειονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι ότι εάν είναι παρόντα άλλα συστατικά που έχουν σημείο ψύξης πάνω από τις κανονικές θερμοκρασίες λειτουργίας, πρέπει να αφαιρεθούν προτού ψυχθεί το ρεύμα αερίου, για να αποφευχθεί η ψύξη και ενδεχόμενη παρεμπόδιση του εξοπλισμού της διαδικασίας. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την παροχή της απαραίτητης ψύξης για τη διαδικασία.

Οι περισσότερες εκπομπές του CO<sub>2</sub> που εξετάζονται για την κατακράτησή του, παράγονται κατά τις διαδικασίες καύσης. Τέτοια ρεύματα περιέχουν νερό και άλλα ίχνη υποπροϊόντων της καύσης, όπως NO<sub>x</sub> και SO<sub>x</sub>, αρκετά από τα οποία πρέπει να αφαιρεθούν προτού εισαχθεί το ρεύμα στη διαδικασία χαμηλής θερμοκρασίας. Αυτά τα υποπροϊόντα παράγονται συνήθως κοντά στην ατμοσφαιρική πίεση. Αυτές οι ιδιότητες, συνδυασμένες με την ενεργοβόρα ψύξη χαμηλής θερμοκρασίας, τείνουν να καταστήσουν την απόσταξη λιγότερο οικονομική από άλλες διαδρομές. Η εφαρμογή της απόσταξης χαμηλής θερμοκρασίας, επομένως, αναμένεται να περιοριστεί σε πηγές τροφοδοσίας υψηλής πίεσης και υψηλών συγκεντρώσεων CO<sub>2</sub> (π.χ. αέριο φρεατίων).

Για την επέκταση της βιωσιμότητας των διαδικασιών της απόσταξης χαμηλής θερμοκρασίας, απαιτούνται διάφορα βήματα ανάπτυξης:

- Κυκλική διαδικασία ανάπτυξης και μελέτες για ενσωμάτωση της διαδικασίας σε συγκεκριμένες εφαρμογές.
- Ο συνδυασμός των μελετών με διαδικασίες εναπόθεσης και η ανάπτυξη νέων και αποδοτικών κύκλων ψύξης μπορεί να επιτρέψει ανταγωνιστικές και χαμηλής θερμοκρασίας διαδικασίες απόσταξης. Η σύγκριση με άλλες τεχνολογικές μεθόδους θα εξαρτηθεί τελικά από τη συγκεκριμένη εφαρμογή και ευκαιρία.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»

*A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)*

### 3.1.4. Μεμβράνες Διαχωρισμού Αερίου

Οι μεμβράνες διαχωρισμού αερίου είναι πολλών διαφορετικών τύπων. Η δυνατότητά τους αντιμετωπίζεται γενικά ως πολύ καλή, αν και η αποτελεσματικότητα μόνο μερικών εξ αυτών στον διαχωρισμό και την κατακράτηση του CO<sub>2</sub> έχει καταδειχθεί. Οι μηχανισμοί διάχυσης στις μεμβράνες είναι πολυάριθμοι και διαφέρουν πολύ ανάλογα με τον χρησιμοποιούμενο τύπο μεμβράνης. Γενικά, ο διαχωρισμός του αερίου επιτυγχάνεται μέσω κάποιας αλληλεπίδρασης μεταξύ της μεμβράνης και του αερίου που διαχωρίζεται. Παραδείγματος χάριν, οι πολυμερείς μεμβράνες μεταφέρουν τα αέρια με έναν μηχανισμό διάλυσης – διάχυσης (δηλ. το αέριο διαλύεται στη μεμβράνη και μεταφέρεται μέσω αυτής με μια διαδικασία διάχυσης). Οι πολυμερείς μεμβράνες αν και αποτελεσματικές, επιτυγχάνουν τυπικά χαμηλή ροή μεταφοράς αερίου και υπόκεινται στην υποβάθμιση. Εντούτοις, οι πολυμερείς μεμβράνες είναι ανέξοδες και μπορούν να επιτύχουν υψηλές αναλογίες περιοχής μεμβράνης και όγκου ενότητας.

Οι μεμβράνες παλλαδίου είναι αποτελεσματικές στον διαχωρισμό του υδρογόνου από το CO<sub>2</sub>, αλλά οι ροές αερίου είναι τυπικά πολύ χαμηλές και το παλλάδιο υπόκειται σε υποβάθμιση στα περιβάλλοντα που περιέχουν θείο. Οι πορώδεις ανόργανες μεμβράνες, μεταλλικές ή κεραμικές, είναι ιδιαίτερα ελκυστικές, εξαιτίας των πολλών μηχανισμών μεταφοράς που χρησιμοποιούν ώστε να μεγιστοποιήσουν τον παράγοντα διαχωρισμού για πολλαπλούς διαχωρισμούς αερίου. Οι πορώδεις ανόργανες μεμβράνες μπορούν να είναι από 100 έως 10.000 φορές πιο διαπερατές από τις πολυμερείς μεμβράνες. («Permeance» είναι ο όγκος του αερίου που μεταφέρεται μέσω μιας μεμβράνης ανά μονάδα περιοχής επιφάνειας, ανά μονάδα χρόνου, ανά μονάδα διαφορικής πίεσης). Ωστόσο, το κόστος των ανόργανων μεμβρανών είναι υψηλό και η αναλογία της περιοχής μεμβράνης προς τον όγκο ενότητας είναι 100 έως 1.000

φορές μικρότερη από αυτήν των πολυμερών μεμβρανών. Αυτοί οι παράγοντες τείνουν να εξισώσουν το κόστος ανά ενότητα μεμβρανών. Ο κύκλος ζωής των ανόργανων μεμβρανών είναι γενικά πολύ πιο μεγάλος. Οι ανόργανες μεμβράνες έχουν μακροχρόνιους κύκλους ζωής παρόλο που χρησιμοποιούνται σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες και σε οξειδωτικά περιβάλλοντα. Είναι επίσης λιγότερο επιρρεπείς σε γέμισμα των πόρων τους από ακαθαρσίες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπου οι πολυμερείς μεμβράνες δε μπορούν.

Για τη δημιουργία μιας μεμβράνης με μοριακά χαρακτηριστικά κοσκινίσματος, έχει στραφεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα υλικά με «zeolite». Εντούτοις, το «permeance» τέτοιων μεμβρανών τείνει να είναι σημαντικά χαμηλότερο από το επιθυμητό. Αυτές είναι μεμβράνες υψηλού κόστους, επειδή οι μέθοδοι για την κατασκευή τους είναι δαπανηρές.

Οι ανόργανες μεμβράνες μπορούν να κατασκευαστούν με αποτελεσματικές διαμέτρους πόρων, τόσο μικρές όσο 5 nm και τόσο μεγάλες όσο επιδιώκεται. Οι μεμβράνες μπορούν να κατασκευαστούν από ένα ευρύ φάσμα υλικών και το μέγεθος των πόρων και το υλικό μπορούν να αλλάξουν για να βελτιωθεί ο παράγοντας «permeance» και διαχωρισμού. Μεγάλοι παράγοντες διαχωρισμού είναι ουσιαστικοί για να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα σε ένα στάδιο. Οι ανόργανες μεμβράνες μπορούν να κατασκευαστούν ώστε να διαχωρίζουν τα μικρά από τα μεγαλύτερα μόρια (μοριακά κόσκινα) ή να διαχωρίζουν ορισμένα μεγάλα μόρια από τα μικρότερα (ενισχυμένη ροή επιφάνειας). Αυτή η τελευταία επίδραση είναι σημαντική, επειδή επιτρέπει τον διαχωρισμό ο οποίος θα κρατήσει το επιθυμητό αέριο είτε στην υψηλής πίεσης, είτε στην χαμηλής πίεσης πλευρά της μεμβράνης. Οι λειτουργικές συνθήκες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της αλλαγής στο μέρος πέρα από μια μεμβράνη και του ποσού του επιθυμητού αερίου που μπορεί να ανακτηθεί (κατακρατηθεί). Για να επιτευχθεί ροή του αερίου μέσω μιας μεμβράνης, πρέπει να υπάρξει μια απόκλιση μερικής πίεσης του επιθυμητού αερίου πέρα από αυτήν.

Με όλες τις παραμέτρους διαθέσιμες, αν μπορούν να επιτευχθούν οι κατάλληλες λειτουργικές συνθήκες είναι πιθανό να κατασκευαστεί μια ανόργανη μεμβράνη η οποία θα είναι χρήσιμη για τον διαχωρισμό του CO<sub>2</sub> από σχεδόν οποιοδήποτε άλλο αέριο. Εντούτοις, για τα πολλαπλά μίγματα αερίου μπορεί να απαιτηθούν πολλές μεμβράνες με διαφορετικά χαρακτηριστικά, για να διαχωρίσουν και να κατακρατήσουν το υψηλής καθαρότητας CO<sub>2</sub>.

Ιδιαίτερη έρευνα και ανάπτυξη απαιτείται για εκμετάλλευση της δυνατότητας των μεμβρανών για διαχωρισμό και κατακράτηση του CO<sub>2</sub>, ιδιαίτερα σε υψηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις. Οι τομείς που θα ήταν καλό να αναπτυχθούν και να ερευνηθούν είναι:

- Η έρευνα στις πολυμερείς μεμβράνες είναι ουσιαστικά περιορισμένη στην αλλαγή της σύστασης του πολυμερούς σώματος, ώστε να αυξηθούν τα ποσοστά διάλυσης και διάχυσης των επιθυμητών συστατικών του αερίου.
- Η εμπειρία έχει δείξει ένα προφανές όριο στην αποτελεσματικότητα των πολυμερών μεμβρανών. Η πολυμερής σύνθεση μπορεί να αλλάξει για να αυξήσει το «permeance» της μεμβράνης, το οποίο μειώνει αμετάβλητα τον παράγοντα διαχωρισμού. Επίσης ισχύει και το αντίθετο: η αλλαγή της σύνθεσης ώστε να αυξηθεί ο παράγοντας διαχωρισμού, μειώνει το «permeance» της μεμβράνης. Αν και δεν υπάρχουν τόσα πολλά στοιχεία για τις ανόργανες μεμβράνες, τα διαθέσιμα δε δείχνουν μια αντίστοιχη σχέση για αυτές.
- Απαιτείται έρευνα πάνω στη μοριακή μοντελοποίηση για να φανεί η δυνατότητα των μεμβρανών για διαχωρισμό του CO<sub>2</sub>.

- Πρέπει να χρησιμοποιηθεί κινητική μοντελοποίηση για να διαπιστωθεί η πιθανή ροή των αερίων στα συστήματα των μεμβρανών.
- Πρέπει να αναπτυχθούν νέες μέθοδοι σύνθεσης μεμβρανών.
- Θα μπορούσαν να αναπτυχθούν ανόργανες, βασισμένες στο παλλάδιο συσκευές μεμβρανών που μετατρέπουν τα καύσιμα υδρογονανθράκων σε μίγματα υδρογόνου και CO<sub>2</sub> και που συγχρόνως διαχωρίζουν το υψηλής αξίας υδρογόνο. Το υπόλοιπο αέριο, κυρίως CO<sub>2</sub>, θα μπορούσε να ανακτηθεί σε συμπιεσμένη μορφή. Το υδρογόνο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε μελλοντικά συστήματα κυψελών καυσίμου ή σε προηγμένα συστήματα στροβίλων. Το καθαρό υδρογόνο, όταν καίγεται για να παράγει ενέργεια, παράγει υδρατμό ως μόνο προϊόν της καύσης. Αποθαρρυντικά ζητήματα αποτελούν οι κύριες δαπάνες και η σταθεροποίηση της μεμβράνης στα ιδιαίτερα διαβρωτικά αέρια, όταν χρησιμοποιείται άνθρακας.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»

*A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)*

### 3.2. Επεξεργασία, Μετατροπή και Μεταφορά Προϊόντων

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το προϊόν της λειτουργίας του διαχωρισμού και της κατακράτησης θα είναι το CO<sub>2</sub>. Εντούτοις, οι ιδιότητες του CO<sub>2</sub>, όπως η συγκέντρωση, οι ακαθαρσίες, η πίεση και η θερμοκρασία θα διαφέρουν για τους διαφορετικούς συνδυασμούς πηγών και μεθόδων διαχωρισμού και κατακράτησης που υιοθετούνται. Οι διαδικασίες απορρόφησης, για παράδειγμα, μπορούν να χειριστούν ώστε να παράγουν ρεύματα CO<sub>2</sub> πολύ υψηλής καθαρότητας, τα οποία θα βρίσκονται γενικά στις πιέσεις της πηγής. Για εκείνες τις μεθόδους που θα εναποθέσουν τον άνθρακα ως CO<sub>2</sub>, εννοείται ότι το CO<sub>2</sub> θα επεξεργαστεί ώστε να αποκτήσει την καθαρότητα και την πίεση που απαιτούνται για τη μεταφορά και την εναπόθεση. Το παραγόμενο CO<sub>2</sub> μπορεί να έχει καθαρότητα από 90 έως 99%, σε θερμοκρασίες που φτάνουν έως μερικούς εκατοντάδες °C και σε πιέσεις από ατμοσφαιρικές έως και περισσότερο από 3,5 MPa. Για μερικές από τις μεθόδους εναπόθεσης μπορεί επίσης να απαιτηθούν διαφορετικές μορφές άνθρακα (εκτός από το CO<sub>2</sub>). Πρέπει να εξεταστούν :

- Η ανάλυση του πλήρη κύκλου της επεξεργασίας και μετατροπής των προϊόντων, ώστε να καλυφθούν οι απαιτήσεις της μεταφοράς και της εναπόθεσης.
- Η μετατροπή του CO<sub>2</sub> στην απαιτούμενη μορφή για την εκάστοτε μέθοδο εναπόθεσης.
- Η διάθεση της ποικιλίας των υποπροϊόντων που μπορούν να παραχθούν κατά τη διάρκεια της μετατροπής του CO<sub>2</sub> σε άλλα προϊόντα.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science» A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

Σε μερικά σενάρια η διαδικασία διαχωρισμού και κατακράτησης θα είναι εντελώς διαφορετική από τη διαδικασία εναπόθεσης. Οποιοδήποτε πρόγραμμα κατακράτησης πρέπει να περιλαμβάνει τη μεταφορά του άνθρακα στην περιοχή της εναπόθεσης και πρέπει πρώτιστα να εξετάζει τις πτυχές των συστημάτων, όπως η βελτιστοποίηση των πηγών άνθρακα, ο διαχωρισμός και η κατακράτηση, η μεταφορά και η εναπόθεση.

### 3.3. Προηγμένα Σχέδια – Προγράμματα

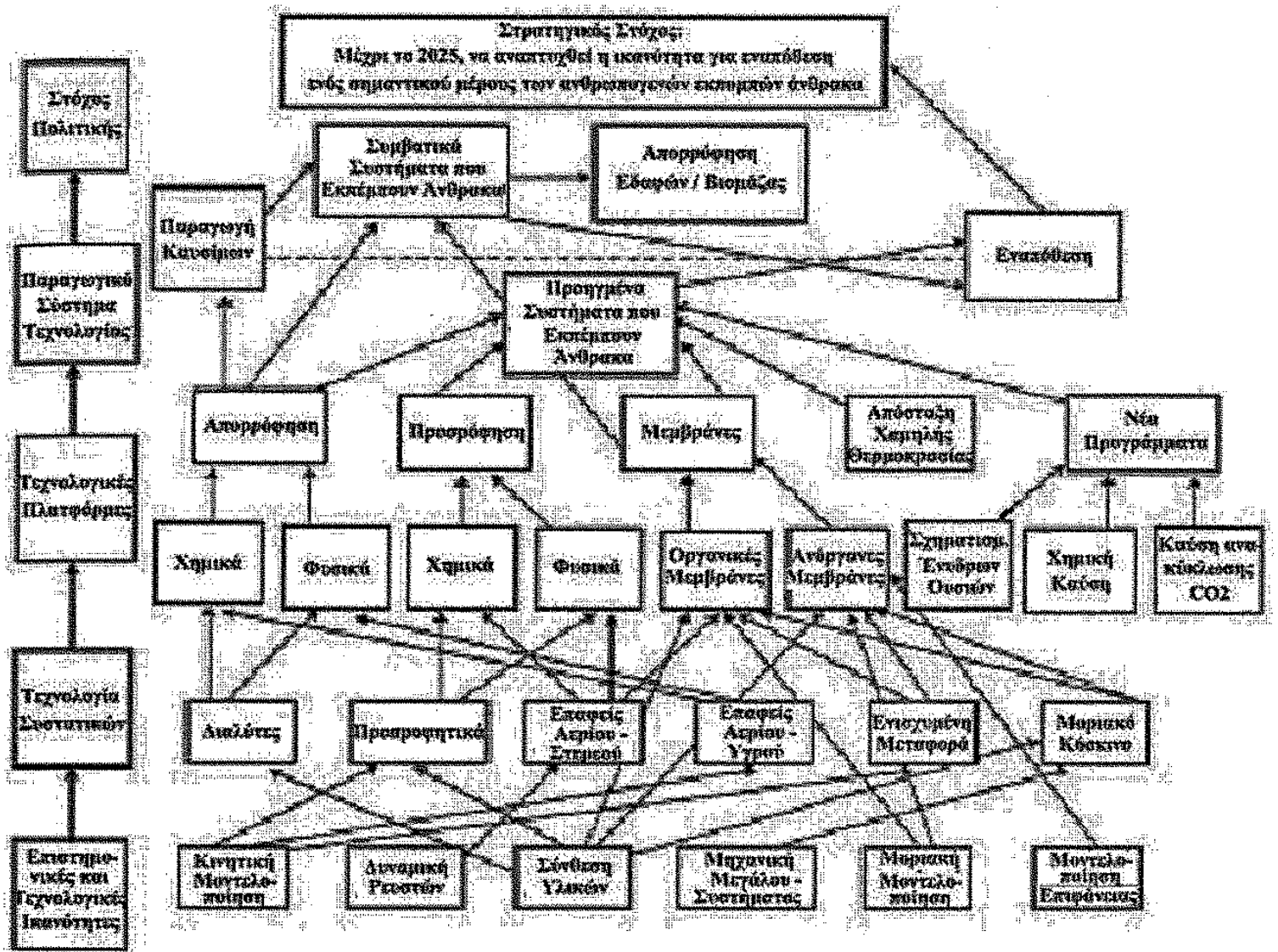
Αυτή η παράγραφος εξετάζει τα προηγμένα προγράμματα που έχουν σημαντική δυνατότητα για διαχωρισμό και κατακράτηση του CO<sub>2</sub>. Στο πρώτο από τα προηγμένα πρόγραμμα, αέρια που περιέχουν CO<sub>2</sub> διαλύονται στο νερό και στη συνέχεια δημιουργείται ο σχηματισμός ένυδρων ουσιών του CO<sub>2</sub> («CO<sub>2</sub> hydrates»), στον οποίο το CO<sub>2</sub> είναι παγιδευμένο σε ένα κρυστάλλινο στερεό που έχει τη μορφή πάγου. Η διαδικασία απαιτεί αέρια περίπου 0°C και από 1 έως 7 Μρα, ανάλογα με τα άλλα αέρια που είναι παρόντα και ανάλογα της μερικής πίεσης του CO<sub>2</sub> στο ρεύμα αερίου. Ο σχηματισμός των ένυδρων ουσιών του CO<sub>2</sub> μπορεί να καταστήσει ιδιαίτερα εύκολη την αφαίρεση του CO<sub>2</sub> από τα ρεύματα αέρα και με ελάχιστες ενεργειακές απώλειες.

Το δεύτερο από τα προηγμένα πρόγραμμα, το οποίο αναφέρεται ως ηλεκτρική προσρόφηση ταλάντευσης (ESA), εξετάζει πολλά από τα ζητήματα των συστημάτων PSA και TSA και χρησιμοποιεί μια νέα ενεργοποιημένη ίνα άνθρακα ως μέσο προσρόφησης (Burchell et al. 1997). Οι όροι ενεργοποίησης αυτών των προσροφητικών μπορεί να ποικίλουν για να αυξήσουν ή να μειώσουν το μέγεθος των πόρων, τον όγκο των πόρων και την περιοχή επιφάνειας και για να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα της ίνας του άνθρακα ως προσροφητικό του CO<sub>2</sub>. Αυτό το υλικό είναι ιδιαίτερα αγώγιμο ηλεκτρικά, ώστε τα προσροφόμενα αέρια να μπορούν γρήγορα, αποτελεσματικά και αποδοτικά να εκροφηθούν με τη διάβαση ενός χαμηλής τάσης ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του υλικού. Αυτή η διαδικασία προσρόφησης – εκρόφησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς την αλλαγή της πίεσης του συστήματος και με ελάχιστη αλλαγή της θερμοκρασίας του. Η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για την εκρόφηση είναι περίπου ίση με τη θερμότητα προσρόφησης του προσροφόμενου αερίου· κατά συνέπεια η διαδικασία ESA είναι ελπιδοφόρα ως μια ενεργειακά αποδοτική και οικονομική μέθοδος διαχωρισμού και κατακράτησης αερίου.

Τέλος, η τρίτη νέα τεχνολογία αναφέρεται ως «χημική επαναλαμβανόμενη καύση» («chemical – looping combustion»), ή πιο πρόσφατα ως «ενεργειακή μεταφορά απορροφητικών» («sorbent energy transfer»). Σε αυτή τη διαδικασία, τα απολιθωμένα καύσιμα (αεριοποιημένος άνθρακας ή φυσικό αέριο) μεταφέρουν την ενέργειά τους ώστε να μειώσουν τα οξειδία ενός μετάλλου, παράγοντας ατμό και υψηλής πίεσης CO<sub>2</sub>, το οποίο μπορεί να εναποτεθεί με λίγη επιπρόσθετη ενέργεια συμπίεσης. Ο ατμός χρησιμοποιείται σε έναν ατμοστρόβιλο για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Το μέταλλο στη συνέχεια ξανά οξειδώνεται στον αέρα, παράγοντας τη θερμότητα για να αυξήσει τη θερμοκρασία ενός υψηλής πίεσης ρεύματος αέρα ή αζώτου, το οποίο θα οδηγήσει έναν αεριοστρόβιλο στην παραγωγή περισσότερης ηλεκτρικής ενέργειας. Το οξειδωμένο μέταλλο επιστρέφει στην αρχή για να επαναληφθεί ο κύκλος.

### 3.4. Εξισορρόπηση των Απαιτήσεων και των Ικανοτήτων

Πολυάριθμες ανάγκες για έρευνα και ευκαιρίες υπάρχουν για βελτίωση του διαχωρισμού και της κατακράτησης του CO<sub>2</sub>. Το σχήμα 3.3. παρουσιάζει έναν χάρτη των διαδικασιών για τον διαχωρισμό και την κατακράτηση του CO<sub>2</sub>. Όπως φάνηκε, ο διαχωρισμός και η κατακράτηση του CO<sub>2</sub> από ανθρωπογενείς πηγές για εναπόθεση μέσω πολλών διαφορετικών επιλογών είναι εφικτός. Παρά τη δυνατότητα αυτή, ένα πειθαρχημένο πρόγραμμα έρευνας που κατευθύνεται στις βελτιώσεις της διαθέσιμης τεχνολογίας, στην επέκταση των πρόσφατων εξελίξεων και στην αναζήτηση νέων προσεγγίσεων είναι κρίσιμο για την εξασφάλιση της δυνατότητας αποτελεσματικής και αποδοτικής κατακράτησης του CO<sub>2</sub>, με δαπάνες που δεν είναι απαγορευτικές.



**Σχήμα 3.3.** Χάρτης έρευνας και ανάπτυξης για τον διαχωρισμό και την κατακράτηση

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»

A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)



## 4. ΩΚΕΑΝΙΑ ΕΝΑΠΙΟΘΕΣΗ

Ο ωκεανός αντιπροσωπεύει μια μεγάλη πιθανή δεξαμενή για την εναπόθεση των ανθρωπογενών εκπομπών του CO<sub>2</sub>. Αν και η μακροπρόθεσμη αποτελεσματικότητα και οι πιθανές παρενέργειες της χρήσης των ωκεανών με αυτόν τον τρόπο είναι άγνωστες, δύο μέθοδοι εναπόθεσης έχουν προταθεί:

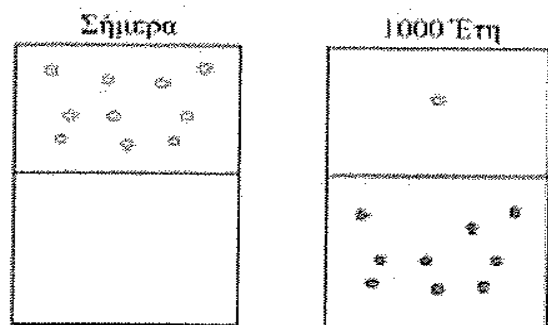
- Η άμεση έγχυση ενός σχετικά καθαρού ρεύματος CO<sub>2</sub>, το οποίο έχει παραχθεί, για παράδειγμα, σε εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας ή από μια βιομηχανική διαδικασία.
- Η ενίσχυση της φυσικής διάλυσης άνθρακα στον ωκεανό από την ατμόσφαιρα, για παράδειγμα, μέσω «λίπανσης σιδήρου» (iron fertilization).

Άλλοι τρόποι είναι επίσης δυνατοί, αλλά πιθανόν απαιτούν πιο μακροχρόνιες διαδικασίες για να αναπτυχθούν. Για έναν δεδομένο τρόπο, ο στόχος είναι να αναλυθούν οι εναλλαγές μεταξύ κόστους, μακροπρόθεσμης αποτελεσματικότητας και ανεπιθύμητων αλλαγών στο ωκεάνιο οικοσύστημα.

Κατά μέσο όρο, ο ωκεανός έχει περίπου 4.000 m βάθος και περιέχει 40.000 GtC (IPCC 1996). Αποτελείται από ένα επιφανειακό στρώμα (ονομαστικά 100m, αλλά το βάθος ποικίλλει), μια «θερμοκλίνη» («thermo cline», βάθους περίπου 1.000 m) η οποία είναι σταθερά στρωματοποιημένη και τον βαθύ ωκεανό κάτω από τα 1.000 m. Τα ύδατα κυκλοφορούν μεταξύ επιφανειακών και βαθέων στρωμάτων για διαφορετικά χρονικά διαστήματα, από 250 έτη στον Ατλαντικό ωκεανό, μέχρι 1.000 έτη για μέρη του Ειρηνικού ωκεανού. Η ποσότητα άνθρακα που θα προκαλούσε διπλασιασμό της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης, θα άλλαζε τη συγκέντρωση των βαθέων στρωμάτων του ωκεανού κατά λιγότερο από 2%.

Σήμερα, η καθαρή φυσική ωκεάνια λήψη των  $2 \pm 0,8$  GtC ανά έτος, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ανθρωπογενούς CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα. Σε ένα χρονικό διάστημα περίπου 1.000 ετών, περίπου το 90% των σημερινών ανθρωπογενών εκπομπών του CO<sub>2</sub> θα έχουν μεταφερθεί στον ωκεανό (Σχήμα 4.1).

Οι στρατηγικές θαλάσσιας εναπόθεσης προσπαθούν να επιταχύνουν αυτήν τη διαδικασία, ώστε να μειωθούν και οι μέγιστες ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις του CO<sub>2</sub> και το ποσοστό αύξησής τους.



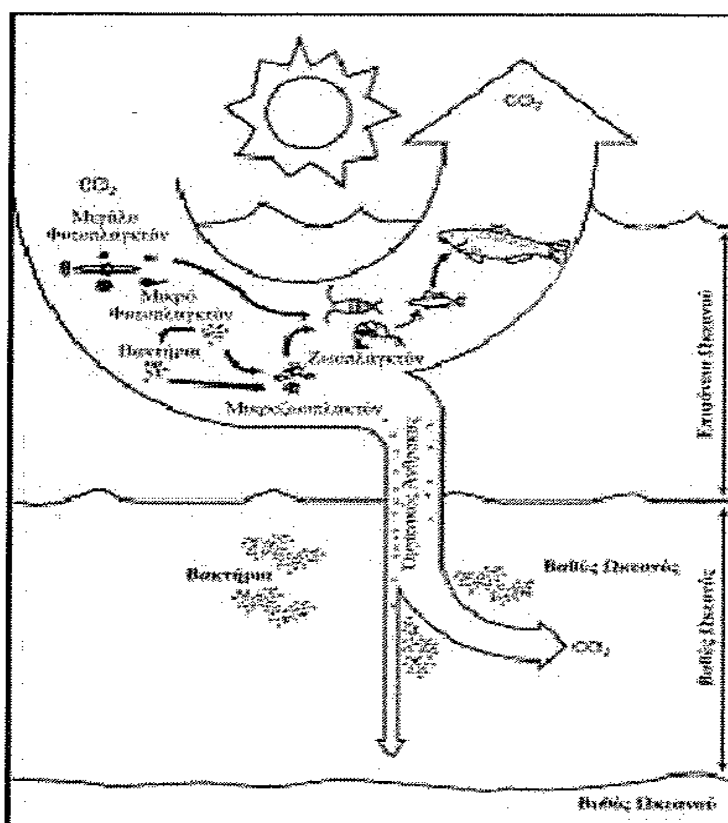
**Σχήμα 4.1.** Κάθε έτος ο ωκεανός λαμβάνει ενεργά το 1/3 των ανθρωπογενών εκπομπών του CO<sub>2</sub>. Τελικά (σε πάνω από 1.000 έτη), περίπου το 90% των σημερινών ανθρωπογενών εκπομπών του CO<sub>2</sub> θα μεταφερθεί στον ωκεανό. Οι ωκεάνιες στρατηγικές εναπόθεσης προσπαθούν να επιταχύνουν αυτήν τη διαδικασία, για να μειώσουν και τη μέγιστη ατμοσφαιρική συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> και το ποσοστό αύξησής της.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
«Carbon Sequestration, State of the Science»

A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)



Παρόλο που η βιομάζα του ωκεανού αντιπροσωπεύει περίπου το 0,05% του χερσαίου οικοσυστήματος, μετατρέπει περίπου τόσο ανόργανο άνθρακα σε οργανικό υλικό (περίπου 50 GtC / έτος), όσο οι διαδικασίες στο έδαφος. Η φωτοσυνθετική σταθεροποίηση του CO<sub>2</sub> από τους ωκεάνιους οργανισμούς, ακολουθούμενη από τη βύθιση και τη μετατροπή του οργανικού άνθρακα είναι μια φυσική διαδικασία για εναπόθεση του CO<sub>2</sub> σε μεγάλα θαλάσσια βάθη. Αυτή η διαδικασία αναφέρεται συχνά ως «βιολογική αντλία» (biological pump), (σχήμα 4.2.).



**Σχήμα 4.2.** Σχηματικό διάγραμμα της βιολογικής αντλίας. Στον ωκεανό, το CO<sub>2</sub> καθορίζεται από το φυτοπλαγκτόν μέσω της φωτοσύνθεσης. Το φυτοπλαγκτόν καταναλώνεται από το ζωοπλαγκτόν, που μπορεί στη συνέχεια να καταναλωθεί από υψηλότερους τροφικούς οργανισμούς, όπως τα ψάρια. Ο οργανικός άνθρακας βυθίζεται στον ωκεανό, όπου καθ' οδόν μετατρέπεται από τα βακτηρίδια σε CO<sub>2</sub>.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»

A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

Το ερώτημα που τίθεται είναι εάν μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα μεγάλα θαλάσσια βάθη, ως περιοχή για την εναπόθεση πρόσθετου ανθρωπογενούς CO<sub>2</sub>. Πολλοί άνθρωποι είναι επιφυλακτικοί με την ωκεάνια εναπόθεση, γιατί είναι γνωστό ότι μικρές αλλαγές στους βιογεωχημικούς κύκλους, μπορεί να έχουν μεγάλες συνέπειες, πολλές από τις οποίες είναι δευτερεύουσες και δύσκολα προβλέψιμες. Εντούτοις, η ωκεάνια εναπόθεση εμφανίζεται σε μεγάλη κλίμακα σήμερα και οι επιχειρηματίες προσπαθούν ήδη να εμπορευματοποιήσουν τις ωκεάνιες τεχνολογίες εναπόθεσης. Επομένως, είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί έρευνα για την καλύτερη κατανόηση των κινδύνων, καθώς επίσης και των ευκαιριών. Ο ωκεανός παίζει σημαντικό ρόλο στη στήριξη της βιόσφαιρας και έτσι οποιαδήποτε αλλαγή της λειτουργίας του ωκεάνιου οικοσυστήματος πρέπει να αντιμετωπιστεί με ιδιαίτερη προσοχή.

Εξαιτίας των υψηλών πιέσεων που επικρατούν στα ωκεάνια συστήματα μεγάλου βάθους, μπορεί να διαλυθεί μια μεγάλη ποσότητα CO<sub>2</sub> (που υπερβαίνει τις εκτιμηθείσες πηγές απολιθωμένων καυσίμων των 5.000 – 10.000 GtC). Εντούτοις, ένα ρεαλιστικότερο κριτήριο πρέπει να βασιστεί στην κατανόηση της βιογεωχημείας των ωκεανών. Προς το παρόν, δεν υπάρχουν αρκετές πληροφορίες για να εκτιμηθεί πόσος άνθρακας μπορεί να εναποτεθεί, χωρίς να διαταράζει τη δομή και λειτουργία του ωκεάνιου οικοσυστήματος.

#### 4.1. Άμεση Έγχυση του CO<sub>2</sub>

Η άμεση έγχυση του CO<sub>2</sub> στον ωκεανό απαιτεί, αρχίζοντας από ένα αρκετά συγκεντρωμένο ρεύμα CO<sub>2</sub>, τη μεταφορά του στις θέσεις του ωκεανού όπου θα εναποτεθεί αποτελεσματικά για εκατοντάδες χρόνια, εάν όχι περισσότερα. Για να επιτευχθεί αυτό, το CO<sub>2</sub> θα είναι πιθανότατα εγχυμένο ως υγρό, κάτω από τη θερμοκλίνη, σε βάθη μεγαλύτερα από 1.000 m (Herzog 1998). Ένας περιορισμός αυτής της προσέγγισης είναι ότι είναι καταλληλότερη για μεγάλες, στάσιμες πηγές του CO<sub>2</sub> με πρόσβαση στις περιοχές εναπόθεσης μεγάλου βάθους, οι οποίες αποτελούν περίπου το 15-20% των ανθρωπογενών εκπομπών του CO<sub>2</sub>.

Η τεχνολογία για να προχωρήσει αυτή η μέθοδος είναι διαθέσιμη. Εντούτοις, δεν υπάρχει επαρκής γνώση για τη βελτιστοποίηση των δαπανών, τον καθορισμό της αποτελεσματικότητας της εναπόθεσης (δηλ, τον αντίκτυπο στην αλλαγή κλίματος) και την κατανόηση του αποτελέσματος των αλλαγών στον βιογεωχημικό κύκλο των ωκεανών.

Υπάρχουν πολλές τεχνικές μέθοδοι για εναπόθεση με άμεση έγχυση CO<sub>2</sub>. Για παράδειγμα, εγχύσεις μπορούν να γίνουν σε μέτρια βάθη (1.000 – 2.000 m), σε μεγαλύτερα βάθη (> 3.000 m), στις καταθλίψεις επάνω στον πάτο του ωκεανού, ή ακόμα και στην υποθαλάσσια κρούστα της γης. Το CO<sub>2</sub> μπορεί να εναποτεθεί μέσω διάλυσης μέσα στην υδάτινη στήλη ή μέσω σχηματισμού ένυδρου CO<sub>2</sub>, το οποίο είναι στερεές παγοκρυσταλικές ενώσεις. Η μεταφορά του CO<sub>2</sub> μπορεί να γίνει είτε με σωλήνωση, είτε με βυτιοφόρο. Σε όλες τις περιπτώσεις, σε κλίμακα χιλιομέτρων γύρω από το σημείο έγχυσης, χρειάζονται υπολογιστικά μοντέλα του κοντινού πεδίου, για την κατανόηση των φυσικών και χημικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ του CO<sub>2</sub> και του ύδατος και της αλληλεπίδρασης μεταξύ του εμπλουτισμένου με CO<sub>2</sub> ύδατος και του περιβάλλοντος στρωματοποιημένου ύδατος. Μια πρόκληση είναι να καθοριστεί ο τρόπος με τον οποίο θα χρησιμοποιηθεί η αποθηκευτική δυνατότητα των κατώτατων ιζημάτων (π.χ. η δυνατότητα του ανθρακικού άλατος ασβεστίου να αντιδράσει με το CO<sub>2</sub>) για να αυξηθεί η ικανότητα και αποτελεσματικότητα της ωκεάνιας εναπόθεσης (Archer 1996). Μια άλλη πρόκληση είναι να κατανοηθεί η κινητική που σχετίζεται με τον σχηματισμό ένυδρου CO<sub>2</sub> και να γίνουν προσπάθειες εκμετάλλευσης των ιδιοτήτων του (π.χ., αυξανόμενη πυκνότητα, χαμηλότερος συντελεστής μαζικής μεταφοράς) για την εναπόθεση του άνθρακα. Τέλος, απαιτείται μηχανική ανάλυση για να υπολογιστούν οι δαπάνες των διάφορων μεθόδων έγχυσης.

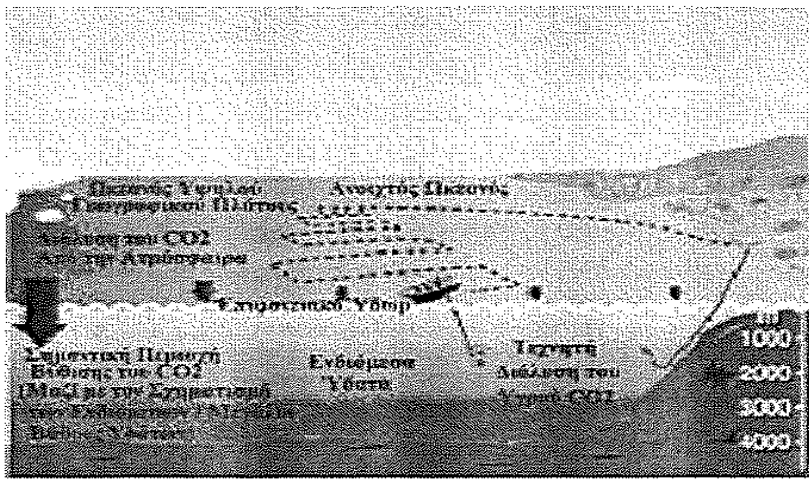
Η αποτελεσματικότητα της εναπόθεσης εξαρτάται από το ακριβές βάθος του σημείου έγχυσης. Γενικά, όσο βαθύτερα εγχέεται το CO<sub>2</sub>, τόσο αποτελεσματικότερα εναποτίθεται, αλλά η βαθύτερη έγχυση απαιτεί περισσότερο προηγμένες τεχνολογίες και μπορεί να αυξήσει το κόστος. Απαιτούνται τοπικά και παγκόσμια ωκεάνια πρότυπα κυκλοφορίας (OGCMs) για να ποσοτικοποιηθεί η αποτελεσματικότητα της εναπόθεσης (μέσω υπολογισμού της μείωσης του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> σαν αποτέλεσμα

ποικίλων στρατηγικών εναπόθεσης). Ωστόσο, τα OGCMs πρέπει να βελτιωθούν έτσι ώστε να μειωθεί η αβεβαιότητα για τα αποτελέσματα.

Πρέπει να εκτεθούν λεπτομερώς οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις κοντά στο σημείο έγχυσης και να κατανοηθούν οι μακροπρόθεσμες, ευρείας κλίμακας επιδράσεις στη λειτουργία του ωκεάνιου οικοσυστήματος. Η πιο σημαντική περιβαλλοντική επίδραση αναμένεται να σχετίζεται με τη μείωση του pH, ως αποτέλεσμα της αντίδρασης του CO<sub>2</sub> με το νερό της θάλασσας. Θαλάσσιοι οργανισμοί, οι οποίοι δεν κολυμπούν και κατοικούν σε βάθη περίπου 1.000 m ή και μεγαλύτερα είναι πιθανότερο να επηρεαστούν αρνητικά, από πιο όξινο νερό της θάλασσας· το μέγεθος του αντίκτυπου θα εξαρτηθεί και από το επίπεδο αλλαγής του pH και από τη διάρκεια έκθεσης. Μπορεί επίσης να επηρεαστεί η μικροβιακή κοινότητα, προκαλώντας άγνωστες επιδράσεις στις βιογεωχημικές διαδικασίες που παίζουν κρίσιμο ρόλο στον κύκλο του ωκεάνιου άνθρακα. Οι τοπικές περιβαλλοντικές επιδράσεις μπορούν να ελαχιστοποιηθούν, σχεδιάζοντας το σύστημα έγχυσης έτσι ώστε να διασκορπίζει το CO<sub>2</sub>. Συγκεκριμένες ερευνητικές ανάγκες περιλαμβάνουν συγκέντρωση των βασικών στοιχείων και εφαρμογή του οικονομικώς αποδοτικού ελέγχου. Ισχυρά μοντέλα πρόβλεψης θα μπορούσαν να βοηθήσουν τη μείωση των δαπανών ελέγχου, μέσω επικέντρωσης στη δειγματοληψία σε περιοχές με μεγαλύτερο πιθανό αντίκτυπο.

Με οδηγό την παράκτια εξερεύνηση και τις παραγωγικές δραστηριότητες της βιομηχανίας του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, έχουν γίνει τεράστια βήματα στην ανάπτυξη υποθαλάσσιας παράκτιας τεχνολογίας. Έχει γίνει πλέον κοινή η εργασία σε βάθη που πλησιάζουν τα 2.000 m. Εργασία σε ακόμη μεγαλύτερα βάθη, που πλησιάζουν ακόμα και τα 10.000 m, είναι δυνατή σε μειωμένη κλίμακα ή / και σε χρονικό ορίζοντα, όπως έχει εφαρμοστεί σε βαθιά διάτρηση και άλλα επιστημονικά προγράμματα. Εντούτοις, υπάρχουν ακόμα πολλές τεχνικές προκλήσεις, όπως η πρόσβαση σε μεγάλου βάθους και μεγάλης κλίμακας επιχειρήσεις, για παρατεταμένα διαστήματα. Επομένως, σαν πρώτο βήμα, φαίνεται ότι η καλύτερη στρατηγική είναι να ελευθερωθεί το CO<sub>2</sub> κάτω από τη θερμοκλίνη, σε βάθη μεταξύ 1.000 και 2.000 m.

Αρκετές μέθοδοι έγχυσης προτάθηκαν για να εφαρμοστεί αυτή η στρατηγική (Σχήμα 4.3). Μια μέθοδος είναι να μεταφερθεί το υγρό CO<sub>2</sub> από την ακτή μέσα σε αγωγό και να ελευθερωθεί στον πυθμένα του ωκεανού, διαμορφώνοντας έναν αυξανόμενο όγκο σταγονιδίων. Μια άλλη μέθοδος είναι να μεταφερθεί το υγρό CO<sub>2</sub> με βυτιοφόρο και έπειτα να ελευθερωθεί από έναν αγωγό που ρυμουλκείται από ένα σκάφος. Αν και τα μέσα μεταφοράς είναι διαφορετικά, οι όγκοι των σταγονιδίων οι οποίοι δημιουργούνται από τις δύο αυτές μεθόδους είναι παρόμοιοι και, επομένως, οι έρευνες για τις δυο αυτές μεθόδους έγχυσης πρέπει να θεωρηθούν συμπληρωματικές.

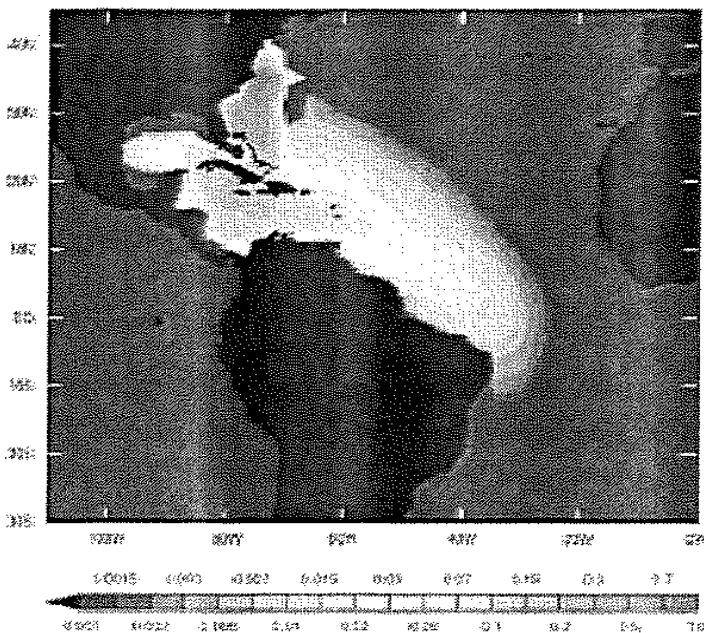


**Σχήμα 4.3.** Για την έγχυση του  $CO_2$  σε βάθη 1.000 έως 2.000 m, έχει προταθεί να μεταφέρεται το υγρό  $CO_2$  μέσω μιας σωλήνωσης και να απελευθερώνεται στον πυθμένα του ωκεανού. Μια άλλη πρόταση είναι να μεταφέρεται το υγρό  $CO_2$  με βυτιοφόρο και έπειτα να απελευθερώνεται από έναν σωλήνα που ρυμουλκείται από το κινούμενο σκάφος.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»  
A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

Μόλις το  $CO_2$  αφήσει τον αγωγό, οι τρέχουσες ικανότητες είναι περιορισμένες. Τα πρότυπα υπάρχουν για να χαρακτηρίσουν τον όγκο του κοντινού πεδίου, αλλά δεν έχουν αξιολογηθεί με πειραματικά δεδομένα. Είναι γνωστό ότι ένυδρο  $CO_2$  μπορεί να σχηματιστεί από το  $CO_2$  που έχει εγχυθεί. Η θερμοδυναμική συμπεριφορά των ένυδρων ουσιών έχει κατανοηθεί επαρκώς και η κινητική τους έχει ερευνηθεί εκτενώς. Ωστόσο, δεν έχει κατανοηθεί πλήρως η κινητική που ελέγχει τον σχηματισμό και τη διάλυση των ένυδρων ουσιών στο νερό της θάλασσας, ειδικά υπό τις δυναμικές συνθήκες στον όγκο.

Τοπικά και παγκόσμια OGCMs είναι διαθέσιμα για να περιγραφεί η τελική έκβαση του  $CO_2$  που έχει εγχυθεί, μέσω μοντελοποίησης της συμπεριφοράς του στο κέντρο του πεδίου (δεκάδες – εκατοντάδες χιλιόμετρα από το σημείο έγχυσης) και στο μακρινό πεδίο (εκατοντάδες χιλιόμετρα και πέρα από το σημείο έγχυσης), (Σχήμα 4.4). Αυτά τα πρότυπα μπορούν να προσομοιώσουν τα χαρακτηριστικά των παρατηρηθέντων στοιχείων των πεδίων (π.χ., χλωροφθοράνθρακες, άνθρακας – 14 και τρίτιο), των οποίων οι κινήσεις μπορούν να ανιχνευθούν στον ανοικτό ωκεανό. Εντούτοις, για τη μοντελοποίηση των διεργασιών μιας σημειακής πηγής, όπως το  $CO_2$  που εγχύθηκε, η αβεβαιότητες είναι μεγάλες και τα αποτελέσματα δεν θα είναι οριστικά.



**Σχήμα 4.4.** Προσομοίωση της διανομής του άνθρακα που εγχέεται στον ωκεανό, σε ένα βάθος 1.720 m από την ακτή Hatteras, στη Βόρεια Καρολίνα, μετά από 20 έτη συνεχούς έγχυσης, όπως υπολογίζεται από το τρισδιάστατο ωκεάνιο μοντέλο του εθνικού εργαστηρίου Lawrence Livermore. Σε αυτό το βάθος, το μοντέλο προβλέπει ότι ο άνθρακας θα είχε παρασυρθεί νότια, από ένα υπόγειο ρεύμα που ρέει από τον Περσικό Κόλπο. Αυτό το είδος προσομοίωσης είναι απαραίτητο για να καθορίσει τα αποτελεσματικότερα βάθη και θέσεις για έγχυση του  $CO_2$  σε μεγάλο βάθος.

Η περιοχή η οποία είναι λιγότερο κατανοητή είναι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της έγχυσης CO<sub>2</sub>. Η ικανότητα του ωκεανού να ελαχιστοποιεί το ύδωρ που οξύνεται από την έγχυση του CO<sub>2</sub> είναι γνωστή. Υπάρχουν πρότυπα για την πρόβλεψη των αλλαγών του pH, δεκάδες χιλιόμετρα από το σημείο έγχυσης. Ωστόσο, πολύ λίγα είναι γνωστά για το πώς αλλάζει το pH ή για άλλες επιδράσεις που έχει η έγχυση του CO<sub>2</sub>, οι οποίες θα επηρεάσουν τη βιογεωχημεία και το οικοσύστημα στα βάθη του ωκεανού.

Οι σημαντικότερες ερευνητικές δραστηριότητες, για την αξιολόγηση της ωκεάνιας εναπόθεσης του CO<sub>2</sub> είναι:

*Διεθνές πείραμα πεδίου.* Ένα διεθνές ερευνητικό πρόγραμμα εξετάζει εάν η ωκεάνια εναπόθεση του CO<sub>2</sub> είναι τεχνικά εφικτή, τις περιβαλλοντικές της επιδράσεις και το εάν μπορούν αυτές οι επιδράσεις να ελαχιστοποιηθούν οικονομικά. Η Ιαπωνία, η Νορβηγία και οι ΗΠΑ υπέγραψαν ένα Πρόγραμμα Συμφωνίας για Διεθνή Συνεργασία (PAIC) για την ωκεάνια εναπόθεση του CO<sub>2</sub>, τον Δεκέμβριο του 1997. Από τότε, ο Καναδάς και η ABB (Ελβετία) μπήκαν στο πρόγραμμα, το οποίο συνεχίστηκε μέχρι τις 31 Μαρτίου του 2002. Ένα πείραμα πεδίου διενεργήθηκε το καλοκαίρι του 2000 στην ακτή Κόνα της Χαβάης. Οι ερευνητικές οργανώσεις είναι το Research Institute of Innovative Technology for the Earth (Ιαπωνία), το Norwegian Institute for Water Research (Νορβηγία), το Institute of Ocean Sciences (Καναδάς) και το Massachusetts Institute of Technology [(MIT) ΗΠΑ]. Ο γενικός ανάδοχος για το πρόγραμμα είναι το Pacific International Center for High – Technology Research στη Χαβάη. Για να ερευνηθεί η μακροπρόθεσμη οξύτητα και οι χρόνιες βιολογικές επιδράσεις, ένα πρόγραμμα μπορεί να διεκπεραιωθεί σε ένα απομονωμένο ή ημι – απομονωμένο περιβάλλον. (Adams et al. 1998)

*Πειράματα στο Monterey Bay Aquarium Research Institute (MBARI).* Τον Απρίλιο του 1998, επιστήμονες του MBARI πραγματοποίησαν επιτυχώς ένα ελεγχόμενο πείραμα με την απελευθέρωση 9 – L υγρού CO<sub>2</sub>, σε βάθος 3.650 m (θερμοκρασίας περίπου 1,6 °C) από την Tiburon, με ένα τηλεκατευθυνόμενο, τηλεχειριζόμενο όχημα (ROV), δεμένο σε ένα σκάφος. Για αρκετές ώρες παρατήρησαν τον μετασχηματισμό του υγρού CO<sub>2</sub> σε ένυδρη στερεά ουσία.

*Σύγκριση του ωκεάνιου άνθρακα. Μοντέλα κύκλων.* Το International Geosphere – Biosphere Programme άρχισε το Ocean Carbon – Cycle Model Intercomparison Project (OCMIP) το 1995, μέσω των ομάδων εργασίας Global Analysis, Interpretation και Modeling. Το OCMIP είναι ένα διεθνές πρόγραμμα αφοσιωμένο στη βελτίωση των ωκεάνιων προτύπων του κύκλου του άνθρακα, συγκρίνοντάς τα μεταξύ τους και αξιολογώντας τα, χρησιμοποιώντας δεδομένα παρατήρησης. Συγκεκριμένα, οι έρευνες θα συγκρίνουν τα μοντέλα της διασποράς του CO<sub>2</sub>, από 7 υποθετικές σημειακές πηγές για να κατανοήσουν καλύτερα την αποτελεσματικότητα της εναπόθεσης.

*Το ωκεάνιο πρόγραμμα εναπόθεσης του CO<sub>2</sub> στην Ιαπωνία.* Τον Απρίλιο του 1997 ένα εθνικό πρόγραμμα 5 ετών που εξετάζει την ωκεάνια εναπόθεση του CO<sub>2</sub>, άρχισε στην Ιαπωνία. Η ετήσια χρηματοδότησή του είναι παραπάνω από €8,3 εκατομμύρια ετησίως. Τα βασικά ερευνητικά ιδρύματα για αυτό το πρόγραμμα είναι το Research Institute of Innovative Technology for the Earth και το Kansai Environmental Engineering Center. Αυτό το πρόγραμμα καλύπτει τις κοινές ερευνητικές δραστηριότητες των εθνικών ιδρυμάτων, ιδιωτικών επιχειρήσεων και πανεπιστημίων. Οι προγραμματισμένες δραστηριότητες της έρευνας περιλαμβάνουν τη μελέτη της συμπεριφοράς του υγρού CO<sub>2</sub> που απελευθερώνεται στον ωκεανό, την ανάπτυξη ενός μηχανικού συστήματος για την έγχυση του CO<sub>2</sub>, την αξιολόγηση των επιδράσεων του

CO<sub>2</sub> στους θαλάσσιους οργανισμούς, την ανάπτυξη ενός μοντέλου εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κοντά στο πεδίο, την πρόβλεψη του μακροπρόθεσμου μέλλοντος του CO<sub>2</sub> που έχει εναποτεθεί και τη συμμετοχή στο διεθνές πείραμα πεδίου (Masuda 1998).

Στο σχήμα 4.5. από το πείραμα MBARI φαίνεται η υπερχειλίση του υγρού CO<sub>2</sub> στον πυθμένα της θάλασσας. Μια προτεινόμενη στρατηγική για την ωκεάνια εναπόθεση του CO<sub>2</sub> μέσω άμεσης έγχυσης είναι να δημιουργηθεί μια μακρόβια «λίμνη του CO<sub>2</sub>» στον πυθμένα του ωκεανού. Για να ερευνηθεί αυτό το σχέδιο, μια ομάδα επιστημόνων του MBARI εκτέλεσαν μια σειρά ωκεάνιων πειραμάτων σε μεγάλο βάθος, για τη διάθεση του CO<sub>2</sub> από απολιθωμένα καύσιμα, υπό μορφή ένυδρης στερεάς ουσίας. Ένα πρόσφατο πείραμα πραγματοποιήθηκε στην κεντρική ακτή της Καλιφόρνιας, με το «ROV Tiburon» του MBARI. Το ROV έφερε περίπου 9 L υγρού CO<sub>2</sub> σε ένα βάθος 3.650 m, όπου η πίεση είναι ~36 MPa και η θερμοκρασία 1,6 °C. Το CO<sub>2</sub> βρισκόταν σε έναν χαλύβδινο συσσωρευτή, στον οποίο προσαρμόστηκε ένα έμβολο. Το CO<sub>2</sub> αποβλήθηκε με την εφαρμογή πίεσης στο έμβολο, από μια υδραντλία που τροφοδοτήθηκε από την υδραυλική του οχήματος. Επειδή το CO<sub>2</sub> είναι πυκνότερο από το ύδωρ της θάλασσας σε αυτό το βάθος, ο σχηματισμός ένυδρων ουσιών διαφέρει σημαντικά από αυτόν που παρατηρείται σε πιο ρηχά βάθη. Οι επιστήμονες του MBARI παρατήρησαν ότι η επαφή CO<sub>2</sub> – ύδατος αυξήθηκε, προκαλώντας υπερχειλίση του υγρού επάνω στον πυθμένα της θάλασσας, περίπου 100 λεπτά αφότου άρχισε το πείραμα. Απέδωσαν αυτήν την επίδραση στον σχηματισμό μιας ένυδρης ουσίας, που θεωρήθηκε ως μια συσσώρευση μάζας στο κατώτατο σημείο του ωκεανού. Αυτή η ενσωμάτωση μεγάλων ποσών ύδατος σε στερεά φάση, οδήγησε σε μια επέκταση του όγκου του συστήματος (περίπου για έναν παράγοντα 7), αναγκάζοντας το υπόλοιπο υγρό CO<sub>2</sub> να «χυθεί». Η υψηλή επιφανειακή πίεση διατήρησε ένα ισχυρό εμπόδιο, αποτρέποντας το απελευθερωμένο υγρό CO<sub>2</sub> από την αλληλεπίδραση με ιζήματα



**Σχήμα 4.5.** Σχηματισμός ένυδρων ουσιών του CO<sub>2</sub>, στα μεγάλα θαλάσσια βάθη

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
«Carbon Sequestration, State of the Science»

A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)



Συγκρίνοντας τις τεχνικές ικανότητες με τις τεχνικές απαιτήσεις για αποτελεσματική ανάπτυξη και οικονομικά και περιβαλλοντικά αποδεκτές τεχνολογίες ωκεάνιας εναπόθεσης, προέκυψαν τα ακόλουθα προβλήματα:

- Από την πλευρά των μηχανικών, οι παρακάτω τομείς πρέπει να εξεταστούν:
  - Ανάπτυξη της τεχνολογίας έγχυσης. Ακόμα και αν το CO<sub>2</sub> μπορεί να εγχυθεί τώρα, χρειάζεται μια τεχνολογία που έχει χαμηλότερο κόστος και συντήρηση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγαλύτερα θαλάσσια βάθη, αν είναι απαραίτητο.
  - Πειραματική παρουσίαση της συμπεριφοράς του CO<sub>2</sub> κοντά στο σημείο έγχυσης. Αυτή η κατανόηση μπορεί να οδηγήσει σε στρατηγικές έγχυσης που ελαχιστοποιούν οποιεσδήποτε περιβαλλοντικές επιδράσεις.
  - Καλύτερη κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς (δηλ. κινητική συμπεριφορά) των ένυδρων σχηματισμών και της διάλυσης. Αυτό είναι το πρώτο βήμα για την ανάπτυξη στρατηγικών που θα μπορούσαν να εκμεταλλευτούν τους ένυδρους σχηματισμούς, για την εναπόθεση του CO<sub>2</sub>.
  - Αν υποθεθεί ότι δεν υπάρχουν περιβαλλοντικοί περιορισμοί, τότε θα αναπτυχθούν στρατηγικές οι οποίες μεγιστοποιούν την «ουδετεροποίηση» του όξινου νερού με ιζήματα ανθρακικού άλατος ασβεστίου, στα βάθη του ωκεανού. Αυτή η προσέγγιση θα έχει δύο θετικά αποτελέσματα: μείωση των αλλαγών του pH στην υδάτινη στήλη και αύξηση της ικανότητας εναπόθεσης του ωκεανού.
  - Ανάπτυξη τεχνολογίας ελέγχου για την παρατήρηση των αλλαγών των βιογεωχημικών διαδικασιών και των οικοσυστημάτων του ωκεανού.
- Σχετικά με την αποτελεσματικότητα των τεχνολογιών έγχυσης, μερικά συγκεκριμένα ερευνητικά προβλήματα μπορούν να διευθετηθούν, εάν οι ερευνητές επιτύχουν τα ακόλουθα:
  - Προσδιορισμός των αδυναμιών των OGCMs και έλεγχος των μοντέλων, χρησιμοποιώντας φυσικούς και πειραματικούς ανιχνευτές.
  - Συνδυασμός των επιπτώσεων της έγχυσης CO<sub>2</sub> σε κοντινές και μακρινές αποστάσεις από το πεδίο, μέσω της ιεράρχησης των μοντέλων. Συγκεκριμένα, οι μοντελοποιήσεις του όγκου (του CO<sub>2</sub>) πρέπει να συνδυαστεί με τη λεκάνη και με παγκόσμια κλίμακα θαλάσσια πρότυπα κυκλοφορίας.
- Σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιδράσεις της άμεσης έγχυσης, μερικά συγκεκριμένα ερευνητικά κενά μπορούν να καλυφθούν εάν οι ερευνητές επιτύχουν τα ακόλουθα:
  - Κατανόηση του κύκλου του άνθρακα στον ωκεανό, για να καθοριστεί η βασική γραμμή. Το CO<sub>2</sub> πηγαίνει στον ωκεανό φυσικά, ακόμα και χωρίς ενίσχυση ή άμεση έγχυση. Αυτές οι επιδράσεις πρέπει να γίνουν προσδιοριστούν.
  - Καθορισμός των παραμέτρων για άμεση έγχυση του CO<sub>2</sub>, που θα ελαχιστοποιήσει τις περιβαλλοντικές επιδράσεις.
  - Κατανόηση των επιδράσεων της συνεχούς απελευθέρωσης αυξανόμενων επιπέδων CO<sub>2</sub>, στη βιογεωχημεία και στο οικοσύστημα του ωκεανού. Προσδιορισμός άλλων σημαντικών επιπτώσεων, εκτός από τη μείωση του pH.
  - Πρέπει να απαντηθούν οι ακόλουθες ερωτήσεις: Πρέπει το ρεύμα του CO<sub>2</sub> που έχει εγχυθεί να είναι καθαρό (δηλ. >99%); Μπορεί το ωκεάνιο οικοσύστημα να ανεχθεί άλλα αέρια, όπως το άζωτο, το οξυγόνο, το υδρογόνο, το μονοξείδιο του άνθρακα, το αργό, τα σουλφίδια υδρογόνου, τα NO<sub>x</sub>, το SO<sub>2</sub> και ίχνη μετάλλων; Σε ποια επίπεδα; Τι αποτελέσματα έχουν αυτά τα αέρια στο ωκεάνιο οικοσύστημα;

- Έρευνα των επιπτώσεων που θα έχει το CO<sub>2</sub> στην «bioturbation» των ιζημάτων (bioturbation είναι η διάσπαση των θαλάσσιων ιζηματογενών δομών). Η «bioturbation» καθιστά το σκελετικό ανθρακικό άλας ασβεστίου, το οποίο είναι θαμμένο κάτω από 10 ή περισσότερα cm ιζημάτων, διαθέσιμο για την αντίδραση «ουδετεροποίησης» του CO<sub>2</sub> που έχει εναποτεθεί.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
«Carbon Sequestration, State of the Science»

*A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)*

## 4.2. Ενίσχυση της Φυσικής Εναπόθεσης του Άνθρακα στον Ωκεανό

Η φυσική διαδικασία σταθεροποίησης του άνθρακα από το φυτοπλαγκτόν (αρχική παραγωγή) έχει ως αποτέλεσμα την εναπόθεση του άνθρακα στον βαθύ ωκεανό, μέσω της βιολογικής αντλίας (Σχήμα 4.2). Η βιολογική αντλία περιλαμβάνει τους βαρυτικούς σταθεροποιητές, την αποσύνθεση και τον ενταφιασμό των βιογενικών «αποβλήτων», που διαμορφώνονται στα ανώτερα επίπεδα του ωκεανού. Φυτοπλαγκτόν στα επιφανειακά ύδατα καταναλώνεται γρήγορα από το ζωοπλαγκτόν, το οποίο με τη σειρά του θα καταναλωθεί από μεγαλύτερα ζώα, όπως τα ψάρια. Υπολογίζεται ότι το 70 – 80% του σταθερού άνθρακα ανακυκλώνεται στα επιφανειακά ύδατα (Sarmiento 1993), ενώ το υπόλοιπο μεταφέρεται ως οργανικός άνθρακας στον βαθύ ωκεανό, όπου ορυκτοποιείται αργά από τα βακτήρια.

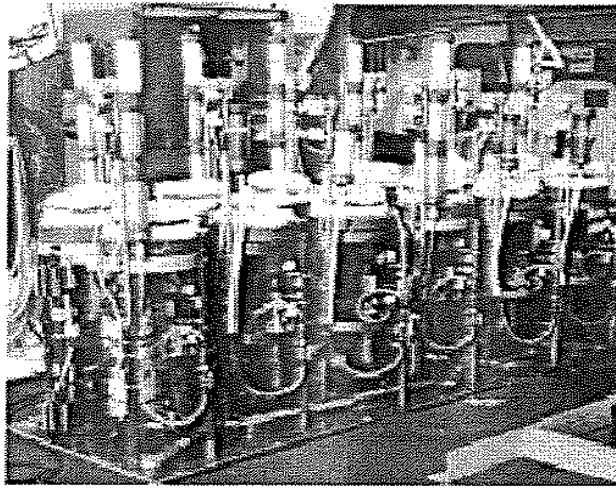
Η λίπανση των ωκεανών με συστατικά όπως ο σίδηρος και άλλα, όπως το άζωτο και ο φώσφορος, είναι μια στρατηγική που ενισχύει τη μείωση ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> και έτσι επιταχύνει τη βιολογική αντλία. Επειδή ορισμένες περιοχές του ωκεανού έχουν χαμηλά επίπεδα φυτοπλαγκτού και υψηλή συγκέντρωση αζώτου και φωσφόρου, μια μείωση του σιδήρου θα μπορούσε να περιορίσει την αύξηση του φυτοπλαγκτού (Chisholm 1992). Αρχικές μελέτες της λίπανσης σιδήρου σε ύδατα με υψηλές συγκεντρώσεις θρεπτικών συστατικών και μειωμένης χλωροφύλλης (HNLC), έδειξαν ότι είναι εφικτή η κανονική λίπανση επιφανειακών υδάτων με σίδηρο, σε κλίμακα δεκάδων km<sup>2</sup>, για να αυξηθεί το φυτοπλαγκτόν (Coale et al. 1996).

Μερικές εμπορικές επιχειρήσεις προσπαθούν να εφαρμόσουν την ωκεάνια λίπανση για αύξηση της συγκομιδής ψαριών. Ενώ αυτές οι επιχειρήσεις έχουν πρωταρχικό στόχο άλλον από την εναπόθεση άνθρακα, οι στρατηγικές λίπανσης και οι πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι οι ίδιες. Όλες οι εμπορικές επιχειρήσεις που χρησιμοποιούν λίπανση για να ενισχύσουν την παραγωγή ψαριών, χρησιμοποιούν την εναπόθεση του CO<sub>2</sub> ως δευτερεύον όφελος. Για παράδειγμα, η Ocean Farming Inc., έχει προγραμματίσει μιας μεγάλης κλίμακας λίπανση των παράκτιων υδάτων των νησιών Marshall με σίδηρο, πυρίτιο και φώσφορο για να αυξήσει την παραγωγή του τόνου. Αυτή η επιχείρηση αντιμετωπίζει την εναπόθεση του CO<sub>2</sub> ως δευτερεύον κέρδος. Ομοίως, αυτή την περίοδο, η Maricult, μια Ευρωπαϊκή κοινοπραξία της κυβέρνησης και της βιομηχανίας εξερευνά την εμπορική δυνατότητα της λίπανσης παράκτιων υδάτων για να αυξήσει την συγκομιδή ψαριών. Αυτές οι εμπορικές επιχειρήσεις προχωρούν, παρόλο που οι πιθανές οικολογικές επιπτώσεις της λίπανσης των ωκεανών δεν είναι ακόμα γνωστές. Τέτοιες επιπτώσεις θα μπορούσαν να κυμανθούν από αλλαγές στην ποικιλομορφία ειδών, μέχρι σημαντικά δυσμενή αποτελέσματα στη δομή και λειτουργία της κοινότητας. Το βασικό ερώτημα που πρέπει να απαντηθεί είναι εάν οποιεσδήποτε αλλαγές του ωκεάνιου οικοσυστήματος δικαιολογούνται από τα σχετικά οφέλη στην κοινωνία.

Υπάρχει επείγουσα ανάγκη να καθοριστούν οι πιθανές οικολογικές συνέπειες που έχει η λίπανση των ωκεανών μεγάλης κλίμακας, στη βιόσφαιρα και στη βιογεωχημική ανακύκλωση. Πρέπει να μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια ο τρόπος με τον οποίο θα αλλάξουν τα οικοσυστήματα, ως αποτέλεσμα, είτε της βραχύχρονης είτε της συνεχούς λίπανσης των ωκεανών. Πρέπει επίσης να εκτιμηθεί η συνολική αποδοτικότητα της φυσικής εναπόθεσης άνθρακα στους ωκεανούς. Επιπλέον, η δυνατότητα για ωκεάνια λίπανση εξαρτάται από τη βελτίωση του σχεδιασμού λίπανσης, τη μεταφορά και τον οικολογικό έλεγχο. Ο μακροχρόνιος οικολογικός έλεγχος μπορεί να αποδειχθεί εξαιρετικά δαπανηρός· για τον λόγο αυτόν, δυναμικά μοντέλα που προβλέπουν την αντίδραση του οικοσυστήματος θα είναι το κλειδί για τον σχεδιασμό μιας οικονομικής και αποτελεσματικής στρατηγικής ελέγχου.

Η μικρής κλίμακας ωκεάνια λίπανση είναι εφικτή και από μηχανικής και από οικονομικής άποψης. Η τεχνολογία για τη λίπανση επιφανειακών υδάτων είναι αρκετά απλή και περιλαμβάνει την απελευθέρωση θρεπτικών συστατικών, όπως ο σίδηρος, ο φώσφορος ή το άζωτο, από πλατφόρμες όπως βάρκες ή αεροπλάνα. Πρόσφατα πειράματα λίπανσης σιδήρου (IRONEX I και II) έδειξαν ανεπάρκεια σιδήρου αρχικής παραγωγής (φωτοσύνθεση) σε αρκετές περιοχές του ωκεανού, όπου το άζωτο και ο φώσφορος είναι άφθονα. Η εφαρμογή 500 kg σιδήρου σε 72 km<sup>2</sup> στον Ειρηνικό, είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση κατά 30 φορές της βιομάζας του φυτοπλαγκτού και κατά συνέπεια, δραματική μετατόπιση στη σύνθεση ειδών και υψηλά ποσοστά σταθεροποίησης άνθρακα.

Διάφορες τεχνολογίες είναι διαθέσιμες για τον έλεγχο των αντιδράσεων του οικοσυστήματος στη λίπανση (ή τη σκόπιμη έγχυση CO<sub>2</sub>), συμπεριλαμβανομένων των δοκιμών για πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια παραγωγή, χρησιμοποιώντας ραδιοανιχνευτικές τεχνικές. Για να καθοριστεί η αντίδραση του οικοσυστήματος κάτω από την «eurhotic» ζώνη (η ζώνη όπου το καθαρό ποσοστό της φωτοσύνθεσης είναι θετικό), θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές διήθησης, οι οποίες καθορίζουν το μέγεθος των διανομών και τη χημεία του άνθρακα, με ελάχιστη διαταραχή στα δείγματα (Bishop et al. 1987, Bishop 1999), (Σχήμα 4.6.). Μια ωκεάνια έρευνα άνθρακα χρησιμοποιεί βελτιωμένες τεχνολογίες, για να χαρακτηρίσει τις διαλυμένες και οργανικές και ανόργανες ποσότητες άνθρακα και τη λειτουργία του οικοσυστήματος. Αποδοτικότερες τεχνολογίες δειγματοληψίας με πλοίο, για πολλές βασικές παραμέτρους, έχουν αναπτυχθεί ή βρίσκονται υπό ανάπτυξη. Μια αυξανόμενη ακολουθία από άνθρακα που λειτουργεί αυτόνομα και από αισθητήρες θρεπτικών ουσιών βρίσκεται υπό ανάπτυξη, για επέκταση της σκιαγράφησης των πλατφόρμων. Γρήγορα αναπτύσσεται η χρήση οπτικών προσεγγίσεων για τηλεπισκόπιση της αρχικής παραγωγής της υδάτινης στήλης και της βιομάζας άνθρακα.



**Σχήμα 4.6.** Το «Multiple Unit Large – Volume in situ Filtration System» (MULVFS) επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό των ιδιοτήτων του μοριακού υλικού, το οποίο χρειάζεται για μια συστηματική έρευνα των τύπων ωκεάνιου άνθρακα και για την αξιολόγηση της λειτουργίας του οικοσυστήματος. Τα δείγματα MULVFS είναι αρκετά μεγάλα για να ικανοποιήσουν τις διάφορες ανάγκες των πολλαπλών ερευνητικών ομάδων.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»

*A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)*

Για την προσομοίωση της αποτελεσματικότητας της ωκεάνιας λίπανσης ως στρατηγική εναπόθεσης του CO<sub>2</sub>, δύο στόχοι πρέπει να εκπληρωθούν. Πρώτον, πρέπει να προβλεφθούν οι αλλαγές στην εξαγωγή βιολογικού άνθρακα από την επιφάνεια του ωκεανού στο βάθος του, ως αποτέλεσμα της ωκεάνιας λίπανσης. Δεύτερον, πρέπει να προβλεφθεί το μέλλον αυτού του άνθρακα, αφού φτάσει στον βαθύ ωκεανό.

Το πρόβλημα πρόβλεψης αλλαγών κατά την εξαγωγή του άνθρακα από την επιφάνεια του ωκεανού, ως αποτέλεσμα της λίπανσης, είναι δύσκολο, διότι εξαρτάται από δύσκολα προβλέψιμες αλλαγές της δομής του οικοσυστήματος. Βιολογικά μοντέλα της επιφάνειας του ωκεανού, έχουν προσομοιώσει την εξαγωγή του βιολογικού άνθρακα σε συγκεκριμένες τοποθεσίες με μεγάλη επιτυχία, αλλά αυτά τα μοντέλα έχουν «συντονιστεί» να ταιριάζουν με μερικές μόνο παρατηρήσεις, σ'αυτές τις συγκεκριμένες τοποθεσίες. Εργασίες υπό εξέλιξη προσπαθούν να αναπτύξουν ένα απλό, ενιαίο μοντέλο, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί στο σύνολο του ωκεανού για να προβλέψει την εξαγωγή άνθρακα. Μολονότι, έχει γίνει τεράστια πρόοδος σ'αυτόν τον τομέα, αυτός ο στόχος δεν έχει ακόμα επιτευχθεί. Θα ήταν σημαντικό να παρατηρηθεί προσεκτικά κάθε πείραμα ωκεάνιας λίπανσης, για να αναπτυχθούν δεδομένα και να χρησιμοποιηθούν στην αξιολόγηση της βιολογίας των ωκεανών και των μοντέλων του οικοσυστήματος.

Η πρόβλεψη του μέλλοντος του άνθρακα αφότου μεταφερθεί στα βάθη των ωκεανών αποτελεί επίσης σημαντικό πρόβλημα. Σημαντικό στοιχείο αυτής της πρόβλεψης είναι η εκτίμηση του βάθους στο οποίο ο οργανικός άνθρακας θα οξειδωθεί, βάθος το οποίο θα εξαρτηθεί από το εάν ο οργανικός άνθρακας είναι μοριακός ή διαλυμένος, από το μέγεθος των μορίων και από άλλους παράγοντες. Όταν ο οργανικός άνθρακας οξειδωθεί στο βάθος του ωκεανού, το πρόβλημα είναι κατά μεγάλο μέρος ισοδύναμο με το πρόβλημα έγχυσης CO<sub>2</sub> στον βαθύ ωκεανό – το να προβλεφθεί η ωκεάνια μεταφορά, η εξαέρωση του CO<sub>2</sub> (επιστροφή στην ατμόσφαιρα) και οι αλληλεπιδράσεις ιζημάτων. Διάφορες προσομοιώσεις αυτής της πτυχής του προβλήματος έχουν ήδη δημιουργηθεί, χρησιμοποιώντας υποθέσεις σχετικά με την αλλαγή της εξαγωγής βιολογικού άνθρακα και του βάθους της οξείδωσής του. Αυτές οι μελέτες

έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι η αποτελεσματικότητα της ωκεάνιας λίπανσης, ως στρατηγική εναπόθεσης του CO<sub>2</sub>, είναι πολύ ευαίσθητη σχετικά με το ποσοστό του ωκεανού που αναμειγνύεται μεταξύ των επιφανειακών στρωμάτων και των βαθύτερων. Αν άνθρακας στα βαθύτερα στρώματα μεταφερθεί στην επιφάνεια μέσω της ανάμιξης, τότε θα μπορούσε να επιστρέψει στην ατμόσφαιρα μέσω εξαέρωσης, αντί να θαφτεί στα ιζήματα.

Υπάρχει ένας αριθμός από σημαντικά προβλήματα σχετικά με την κατανόηση της ωκεάνιας λίπανσης ως στρατηγική για ενισχυμένη εναπόθεση άνθρακα:

- Ο αντίκτυπος της μακροχρόνιας ωκεάνιας λίπανσης στη δομή και λειτουργία των ωκεάνιων οικοσυστημάτων είναι άγνωστος. Αλλαγές στη δομή του φυτοπλαγκτού είναι μια αναπόφευκτη συνέπεια της λίπανσης και αυτό οδηγεί σε αλλαγές της δομής και δυναμικής της ωκεάνιας τροφικής αλυσίδας. Τέτοιες αλλαγές θα μπορούσαν να έχουν μακροχρόνιες (και θετικές και αρνητικές) επιδράσεις στην αλιεία, πολλές από τις οποίες έχουν ήδη σημειωθεί, πρώτιστα λόγω της υπερβολικής αλιείας. Η λίπανση με σίδηρο και φώσφορο σε οικοσυστήματα λιμνών, βοηθάει την ανάπτυξη κυανοβακτηρίων, αντί άλλου τύπου φυτοπλαγκτόν· αυτός ο πολλαπλασιασμός θα μπορούσε να είναι πρόβλημα, επειδή ορισμένα είδη κυανοβακτηρίων παράγουν ισχυρές τοξίνες. Το εάν μια τοξική ουσία κυανοβακτηρίων μπορεί να εμφανιστεί σε θαλάσσια οικοσυστήματα, είναι άγνωστο προς το παρόν.
- Το αντίκτυπο της συνεχούς λίπανσης στους φυσικούς βιογεωχημικούς κύκλους του ωκεανού είναι απολύτως άγνωστο. Οι βιογεωχημικοί κύκλοι του άνθρακα, του αζώτου, του φωσφόρου, του πυριτίου και του θείου, στα θαλάσσια περιβάλλοντα είναι ιδιαίτερα σύνθετοι και συνδυασμένοι. Μια διαταραχή ενός στοιχειώδους κύκλου, μπορεί να έχει απρόβλεπτες επιδράσεις.
- Ο πιθανός κίνδυνος να οδηγήσει η λίπανση σε ευτροφισμό, πρέπει να καθοριστεί. Ο ευτροφισμός προκαλεί μείωση οξυγόνου, η οποία θα μπορούσε να σκοτώσει είδη που το έχουν ανάγκη. Σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή μεθανίου (ένα ακόμη αέριο θερμοκηπίου) από μικροοργανισμούς. Από την άλλη μεριά, έλλειψη οξυγόνου στα ιζήματα του πυθμένα του ωκεανού, θα μπορούσε να οδηγήσει σε αύξηση της διατήρησης του θαμμένου άνθρακα, εξαιτίας του αργού ρυθμού ορυκτοποίησης. Ο αντίκτυπος της λίπανσης στους ιζηματογενείς οργανισμούς είναι άγνωστος.
- Αυτήν τη στιγμή, δεν έχει κατανοηθεί πλήρως η αποτελεσματικότητα της ωκεάνιας λίπανσης σε μεγάλη κλίμακα. Το εάν η σταθεροποίηση του άνθρακα στα επιφανειακά ύδατα, θα οδηγήσει σε αύξηση του άνθρακα που εναποτίθεται στον βαθύ ωκεανό είναι άγνωστο. Μερικές προκαταρκτικές εργασίες μοντελοποίησης έχουν γίνει, αλλά αυτά τα μοντέλα βασίζονται σε απλουστευμένες βιολογικές υποθέσεις και δεν έχουν επικυρωθεί από πραγματικά στοιχεία.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
«Carbon Sequestration, State of the Science»

*A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)*

### 4.3. Μακροπρόθεσμα, Καινοτόμα Προγράμματα για Ωκεάνια Εναπόθεση του CO<sub>2</sub>

Το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας για ωκεάνια εναπόθεση του CO<sub>2</sub>, έχει γίνει για έγχυση CO<sub>2</sub> σε μεγάλο βάθος και για ωκεάνια λίπανση. Οι δύο αυτές μέθοδοι είναι μικρότερες των 25 ετών και έτσι, ένα σχέδιο που αναπτύχθηκε 25 χρόνια πριν δεν τις περιλαμβάνει. Επομένως, πρέπει να ενθαρρυνθεί η ανάπτυξη καινοτόμων προγραμμάτων για ωκεάνια εναπόθεση του CO<sub>2</sub>, τα οποία θα αποτελέσουν τη βάση για προηγμένες τεχνολογίες στις επόμενες δεκαετίες. Παρακάτω περιγράφονται μερικά καινοτόμα προγράμματα:

- *Μετατροπή του συγκεντρωμένου CO<sub>2</sub> σε σχετικά ισχυρό ανθρακικό οξύ, σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας, χρησιμοποιώντας το οξύ για να διαλύσει μεταλλεύματα ανθρακικού άλατος και κατόπιν απελευθερώνοντας το διαλυμένο ανθρακικό άλας και τα διαλυμένα απολιθωμένα καύσιμα στον ωκεανό. Αυτή η τεχνική θα ενισχύσει σημαντικά την ικανότητα αποθήκευσης του ωκεανού και θα διαγράψει κάθε αμφιβολία για τις αλλαγές στο pH, επειδή το διαλυμένο μέταλλευμα ανθρακικού άλατος θα εξουδετερώσει ένα μεγάλο μέρος της οξύτητας του ανθρακικού οξέως. Αυτή η προσέγγιση, θα μειώσει κατά πολύ την πιθανότητα εξαέρωσης πίσω στην ατμόσφαιρα, εξαφανίζοντας την ανάγκη για άντληση CO<sub>2</sub> σε μεγάλες αποστάσεις και βάθη. Περιορισμό του προγράμματος, αποτελεί η ανάγκη για μεγάλα ποσά ύδατος και για μεταφορά τόσο ανθρακικού άλατος, όσος και ο άνθρακας στις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας.*
- *Ενταφιασμός του οργανικού άνθρακα στον ωκεανό. Τα οργανικά απόβλητα θα μπορούσαν να αποθηκευτούν ως παχύ στρώμα, στον πυθμένα του ωκεανού. Πηγές αυτού του οργανικού άνθρακα, θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν αγροτικά απόβλητα, μαύρο – άνθρακα από απανθρακωμένα καύσιμα, ή πλούσια σε οργανική ύλη ιζήματα. Η βιομάζα από τα φύκια ή από τα χερσαία φυτά, θα μπορούσε να συγκεντρωθεί για ενταφιασμό στον ωκεανό. Η μεταφορά μεγάλων όγκων βιομάζας στον πυθμένα του ωκεανού, ωστόσο, μπορεί να αποδειχθεί εξαιρετικά δαπανηρή. Επιπλέον, η ουδετεροποίηση της οξύτητας και η παραγωγή μεθανίου μπορεί να παρουσιάσουν σοβαρό πρόβλημα, με αυτήν την προσέγγιση.*
- *Εξόρυξη από μεταλλεία υδροξειδίων και διανθρακικών αλάτων (π.χ., υδροξείδιο νατρίου, υδροξείδιο καλίου, νιτρικό διανθρακικό άλας) και διάλυσή τους στον ωκεανό. Αυτά τα μεταλλεύματα, όταν διαλυθούν, θα εξουδετερώσουν την οξύτητα που παράγεται από το ανθρωπογενές CO<sub>2</sub> και θα εναποθέσουν αποτελεσματικά αυτό το CO<sub>2</sub>, στους ωκεανούς. Η περιορισμένη διαθεσιμότητα αυτών των υλικών, μέσα στη φύση, μπορεί να δυσκολέψει αυτήν την προσέγγιση.*

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
«Carbon Sequestration, State of the Science»

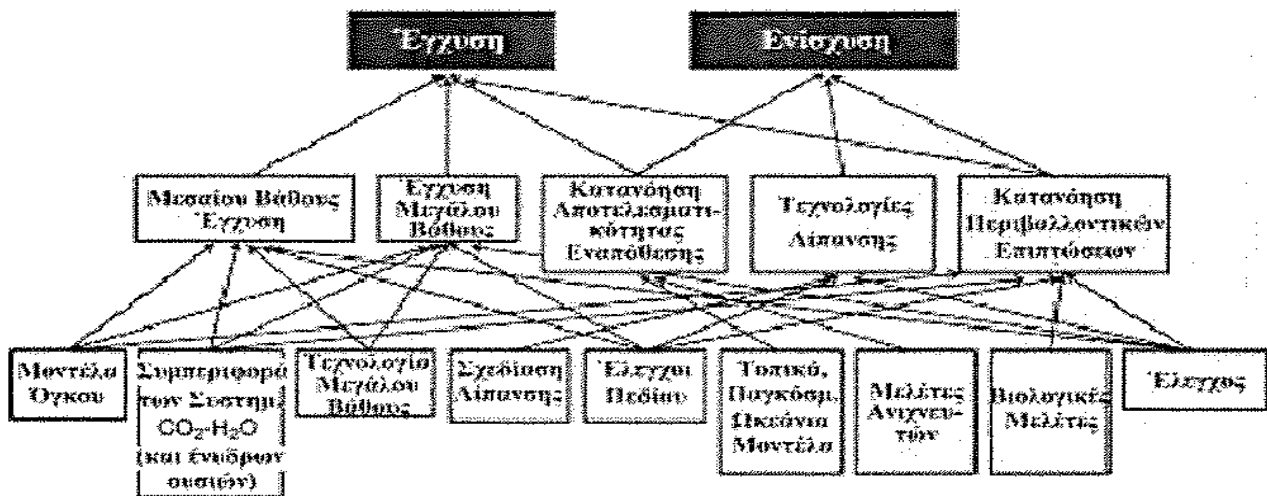
A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)



## 4.4. Συμπεράσματα

Η άμεση έγχυση CO<sub>2</sub> ή η ενίσχυση της σταθεροποίησης του CO<sub>2</sub> μέσω λίπανσης δεν είναι παράλογο να θεωρηθούν ως πιθανές επιλογές για εναπόθεση άνθρακα, διότι ο ωκεανός αποτελεί ήδη μια τεράστια αποθήκη άνθρακα του πλανήτη. Υπάρχουν τεχνολογίες για άμεση και σε βάθος έγχυση CO<sub>2</sub> και για λίπανση των ωκεανών με θρεπτικές ουσίες. Εντούτοις, δεν υπάρχει ικανοποιητική γνώση των συνεπειών της ωκεάνιας εναπόθεσης στη βιόσφαιρα και στον φυσικό βιογεωχημικό κύκλο. Τέτοια γνώση είναι σημαντική για την υπεύθυνη χρήση των ωκεανών, ως επιλογή για εναπόθεση άνθρακα. Χρειάζονται μακροχρόνιες μελέτες, για την εκτίμηση του αντίκτυπου της ωκεάνιας εναπόθεσης στα οικοσυστήματα και στον παγκόσμιο βιογεωχημικό κύκλο (Σχήμα 4.7.). Ο ωκεανός παίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της βιόσφαιρας, έτσι οποιαδήποτε αλλαγή στη λειτουργία του ωκεάνιου οικοσυστήματος πρέπει να αντιμετωπιστεί με ιδιαίτερη προσοχή.

Αναμφισβήτητα, η κοινή γνώμη θα είναι ένα ζήτημα για την ευρύτερη αποδοχή της ωκεάνιας εναπόθεσης. Πολύς κόσμος, καθώς επίσης και οικολογικές οργανώσεις θεωρούν ότι οι ωκεανοί πρέπει να παραμείνουν όσο το δυνατό περισσότερο άθικτοι. Η βιομηχανία αλιείας είναι επίσης επιφυλακτική, λόγω των πιθανών οικονομικών συνεπειών που θα προέλθουν από τις δραστηριότητες της ωκεάνιας εναπόθεσης. Τα νομικά ζητήματα θα είναι σίγουρα περίπλοκα. Με εξαίρεση τις παράκτιες οικονομικές ζώνες, ο ωκεανός είναι διεθνής περιοχή και προστατεύεται από διεθνείς συνθήκες και συμφωνίες, όπως το *Marpol* και το *Law of the Sea*. Τελικά, και η επιστημονική κατανόηση και η δημόσια αποδοχή θα καθορίσουν αν η ωκεάνια εναπόθεση του άνθρακα είναι μια βιώσιμη επιλογή.



Σχήμα 4.7. Διάγραμμα στρατηγικών για την ωκεάνια εναπόθεση του CO<sub>2</sub>.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,

«Carbon Sequestration, State of the Science»

A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

## 5. ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΕ ΧΕΡΣΑΙΑ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Αυτό το κεφάλαιο, εξετάζει τις δυνατότητες εναπόθεσης του άνθρακα στη χερσαία βιόσφαιρα. Ο στόχος της ενισχυμένης εναπόθεσης άνθρακα στα χερσαία οικοσυστήματα είναι η απόκτηση γρήγορου κέρδους από την απόσυρση του CO<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας, κατά τη διάρκεια των επόμενων 50 ετών, προκειμένου να δοθεί χρόνος για εφαρμογή άλλων προηγμένων τεχνολογιών που θα βοηθήσουν στον περιορισμό των εκπομπών του CO<sub>2</sub>.

Η εναπόθεση άνθρακα στα χερσαία οικοσυστήματα είναι ή η καθαρή αφαίρεση του CO<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας, ή η παρεμπόδιση των καθαρών εκπομπών CO<sub>2</sub> από τα χερσαία οικοσυστήματα να απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα. Η εναπόθεση του άνθρακα μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση της φωτοσυνθετικής σταθεροποίησης του άνθρακα, με μείωση της αποσύνθεσης των οργανικών ουσιών, με αλλαγές στον τρόπο χρήσης της γης που συμβάλλει στις παγκόσμιες εκπομπές και με δημιουργία ενεργειακών συνόλων μέσω της χρήσης βιομάζας για καύσιμα ή άλλα προϊόντα. Οι τελευταίες δυο μέθοδοι μπορούν να αντιμετωπιστούν καλύτερα ως στρατηγικές διαχείρισης του άνθρακα.

Η χερσαία βιόσφαιρα υπολογίζεται ότι εναποθέτει τεράστια ποσά άνθρακα (~2 GtC ετησίως). Ο στόχος είναι να αυξηθεί σημαντικά αυτό το ποσό, ενώ ταυτόχρονα εξετάζονται όλες οι οικολογικές, κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις. Υπάρχουν δυο θεμελιώδεις προσεγγίσεις για την εναπόθεση του άνθρακα στα χερσαία οικοσυστήματα: α) προστασία των οικοσυστημάτων που αποθηκεύουν άνθρακα, ούτως ώστε η εναπόθεση να μπορεί να διατηρηθεί ή να αυξηθεί και β) διαχείριση των οικοσυστημάτων ώστε να αυξηθεί η εναπόθεση του άνθρακα πέρα από τις ισχύουσες συνθήκες.

### Έδαφος – η ζωντανή μεμβράνη της γης

Το έδαφος (το οποίο έχει περιγραφεί ως ζωντανή μεμβράνη της γης) είναι ένα οικοσύστημα που περιέχει μικροοργανισμούς και πολλούς τύπους ασπόνδυλων και σπονδυλωτών οργανισμών. Το έδαφος είναι σημαντικό για τη φυτική παραγωγή, αλλά είναι επίσης σημαντικό και για την εναπόθεση του άνθρακα (το έδαφος περιλαμβάνει ~75% του χερσαίου άνθρακα). Εδάφη τα οποία περιέχουν υψηλά επίπεδα άνθρακα ως εδαφολογική οργανική ουσία (SOM), έχουν βελτιωμένη απορρόφηση θρεπτικών ουσιών, διατήρηση του ύδατος, σύσταση και αντίσταση στη διάβρωση και επομένως είναι ιδιαίτερα χρήσιμα και για τη φυτική παραγωγή και για την εναπόθεση. Είναι πολύ σημαντική η καλύτερη διαχείριση των εδαφών, ούτως ώστε να αυξηθεί η εναπόθεση άνθρακα.

Η αποθήκευση του άνθρακα σε υπόγεια συστήματα είναι η καλύτερη μακροπρόθεσμη επιλογή για εναπόθεση, επειδή το μεγαλύτερο μέρος της SOM έχει μεγαλύτερο χρόνο παραμονής από ότι η φυτική βιομάζα. Η SOM είναι ένα σύνθετο μίγμα ενώσεων με διαφορετικούς χρόνους παραμονής. Για την εναπόθεση του άνθρακα πιο σημαντικές είναι οι σταθερότερες ενώσεις, επειδή έχουν κύκλους που χρονικά κυμαίνονται από εκατοντάδες μέχρι χιλιάδες χρόνια. Η έρευνα μπορεί να καθορίσει τρόπους αύξησης του ποσοστού των πιο σταθερών ενώσεων στη SOM.

Η παρεμπόδιση της διάβρωσης μπορεί να έχει ιδιαίτερη συνεισφορά στην εναπόθεση άνθρακα. Η Food and Agricultural Organization (FAO 1992) εκτιμά ότι 25 δισεκατομμύρια τόνοι εδάφους χάνονται μέσω της διάβρωσης, κάθε έτος. Η Commit-

tee for National Institute for the Environment (CNIE 1998) παρέχει μια περιγραφή του όγκου του χαμένου εδάφους : «εάν έπεφτε στην Ουάσιγκτον αυτή η ποσότητα εδάφους θα κάλυπτε την πόλη κάτω από περισσότερο από 100 m, θάβοντας το Capital dome». Εάν αυτό το έδαφος περιείχε κατά μέσο όρο 4% εδαφολογικού οργανικού άνθρακα, αυτό θα ήταν ισοδύναμο με εκπομπές ~ 1 GtC ετησίως ( CNIE 1998). Ακόμα και αν η διάβρωση δε μπορεί να αποτραπεί πλήρως, η έρευνα μπορεί να προσδιορίσει πιθανές στρατηγικές για να ενισχύσει την κατακράτηση και τη μακροβιότητα της SOM που απελευθερώνεται από τη διάβρωση και μεταφέρεται από τους ποταμούς σε υγρότοπους και παράκτιες περιοχές.

Η διαχείριση της χρήσης του εδάφους και οι γεωργικές πρακτικές, μέσω της προστασίας του εδάφους, έχουν μεγάλη ικανότητα εναπόθεσης του άνθρακα. Περίπου το 1/3 των 1,5 δισεκατομμυρίων τόνων άνθρακα που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα λόγω των αλλαγών στη χρήση των τροπικών εδαφών, προέρχεται από την οξείδωση του εδαφολογικού άνθρακα. Υπολογίζεται ότι 40 – 60 δισεκατομμύρια τόνοι άνθρακα μπορεί να έχουν χαθεί από το έδαφος, ως αποτέλεσμα της κοπής των δέντρων και της καλλιέργειας μετά τη μεγάλη γεωργική επέκταση του 1800. Όταν το έδαφος καλλιεργείται, η SOM μειώνεται κατά 50% στα πρώτα 20 cm εδάφους και κατά 20 – 30% στο πρώτο μέτρο εδάφους. Η SOM μειώνεται σημαντικά, επειδή λιγότερες οργανικές ουσίες εισάγονται στο έδαφος και επειδή τα εδάφη καταστρέφονται (προκαλώντας την απώλεια φυσικών μηχανισμών προστασίας που παγιδεύουν άνθρακα στο έδαφος). Επιπλέον, το καλλιεργημένο έδαφος εκτίθεται στον αέρα και για αυτό κατά τη διάρκεια της αποσύνθεσης από εδαφολογικούς οργανισμούς, η SOM οξειδώνεται και ο άνθρακας ελευθερώνεται ως CO<sub>2</sub>. Με καλή διαχείριση για την προστασία των εδαφών και με ανάπτυξη μεθόδων για βελτίωση των συστατικών του εδάφους, έτσι ώστε να παγιδεύουν περισσότερο άνθρακα, μπορεί να γίνει δυνατό να ξεπεραστεί η αρχική εγγενής περιεκτικότητα της SOM πολλών εδαφών.

### Πολλαπλά οφέλη της χερσαίας εναπόθεσης του άνθρακα

Αύξηση της αποθήκευσης του άνθρακα στη βλάστηση και στο έδαφος θα μπορούσε να προσφέρει σημαντικά συνοδευτικά οφέλη: βελτιωμένο έδαφος και ποιότητα νερού, μειωμένη θρεπτική απώλεια, μειωμένη διάβρωση εδάφους, καλύτεροι βιότοποι άγριας φύσης και περισσότερα προϊόντα βιομάζας. Η αποκατάσταση βιότοπων για την εναπόθεση μεγαλύτερων ποσοτήτων άνθρακα θα βοηθήσει επίσης στη διατήρηση της άγριας φύσης. Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο θα αυξηθούν τα αποθέματα άνθρακα στα γεωργικά εδάφη είναι κρίσιμη για την αύξηση της παραγωγής τροφίμων. Τέλος, η δημιουργία συνθηκών για μεγαλύτερη φυτική παραγωγή και η συσσώρευση του εδαφικού άνθρακα για αύξηση της εναπόθεσης άνθρακα, θα έχουν το δευτερεύον όφελος της αποκατάστασης των υποβαθμισμένων παγκόσμιων οικοσυστημάτων.

Οι αυξήσεις στην εναπόθεση του εδαφολογικού άνθρακα από μόνες τους, μπορούν να προσφέρουν σημαντικά οφέλη, καθυστερώντας την ανάγκη για περισσότερο σύνθετες τεχνικές λύσεις. Οι Edmonds et al (1996, 1997) εκτίμησαν ότι, μόνο για τον άνθρακα γεωργικών εδαφών, θα χρειαζόταν χρόνος 35 ετών (ενδεχομένως σώζοντας τουλάχιστον €83,3 εκατομμύρια), πριν οι ρυθμίσεις στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα παραγωγής να πετύχουν σημαντικά ποσοστά μείωσης του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub>. Κατά συνέπεια, μέχρι το επόμενο τέταρτο του αιώνα, άλλες μέθοδοι διαχείρισης του άνθρακα θα μπορούσαν να αξιολογηθούν και να εφαρμοστούν.

**Πίνακας 5.1.** Συνολικές εκτιμήσεις της περιοχής εδάφους, της καθαρής αρχικής παραγωγικότητας (NPP) και των αποθεμάτων άνθρακα στο φυτικό υλικό και το έδαφος, για τα οικοσυστήματα του κόσμου

Οικοσύστημα	Περιοχή (10 <sup>12</sup> m <sup>2</sup> )	NPP (gC/m <sup>2</sup> /έτος)	NPP (Pg C/έτος)	Άνθρακας στα Φυτά (g/m <sup>2</sup> )	Άνθρακας στα Φυτά (Pg)	Εδαφικός Άνθρακας* (g/m <sup>2</sup> )	Εδαφικός Άνθρακας (Pg)	Σύνολο (Pg)
Δάση, τροπικά	14.8	925	13.7	16500	244.2	8300	123	367
Δάση, φυτείες	7.5	670	5.0	12270	92.0	12000	90	182
Δάση, βόρεια	9.0	355	3.2	2445	22.0	15000	135	157
Δασώδεις περιοχές	2.0	700	1.4	8000	16.0	12000	24	40
«Charrahal»	2.5	360	0.9	3200	8.0	12000	30	38
Σαβάνα, τροπική	22.5	790	17.8	2930	65.9	11700	263	329
Λιβάδια	12.5	350	4.4	720	9.0	23600	295	304
Τούνδρα, αρκτική και αλπική	9.5	105	1.0	630	6.0	12750	121	127
Ημι-έρημος	21.0	67	1.4	330	6.9	8000	168	175
Έρημος	9.0	11	0.1	35	0.3	2500	23	23
Διαρκής πάγος	15.5	0	0.0	0	0.0	0	0	0
Λίμνες και ρεύματα	2.0	200	0.4	10	0.0	0	0	0
Υγρότοποι	2.8	1180	3.3	4300	12.0	72000	202	214
Τύρφη, βόρεια	3.4	0	0.0	0	0.0	133800	455	455
Καλλιεργημένα εδάφη	14.8	425	6.3	200	3.0	7900	117	120
Κατοικημένες περιοχές	2.0	100	0.2	500	1.0	5000	10	11
<b>Σύνολο</b>	<b>150.8</b>		<b>59.1</b>		<b>486.4</b>		<b>2056</b>	<b>2542</b>

\*Οι τιμές του άνθρακα είναι για το ανώτερο 1m του εδάφους μόνο, εκτός από την τύρφη, στην οποία λαμβάνεται υπ' όψιν το συνολικό βάθος της τύρφης.

Πηγή: Amthor et al. 1998

## 5.1. Χερσαία Οικοσυστήματα

Το συνολικό ποσό άνθρακα που αποθηκεύεται στα χερσαία οικοσυστήματα είναι μεγάλο (~ 2.000 ± 500 GtC). Ο πίνακας 5.1. παρουσιάζει εκτιμήσεις της διανομής αυτού του άνθρακα στα σημαντικότερα οικοσυστήματα του κόσμου. Η εναπόθεση του άνθρακα σε αυτά τα χερσαία οικοσυστήματα θα ενισχυθεί, μέσω αύξησης του άνθρακα που είναι αποθηκευμένος στο ενεργό φυτικό υλικό, στις ρίζες, σε μακρόβια υλικά που περιέχουν ξυλώδεις ουσίες και του εδαφολογικού άνθρακα (ανόργανος, οργανικός), ή μέσω μετατροπής του ξύλου σε μακρόβια προϊόντα άνθρακα. Η καθα-

ρή αφαίρεση του CO<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα στα χερσαία οικοσυστήματα (~2 GtC ετησίως) εμφανίζεται όταν η φυτική φωτοσύνθεση υπερβαίνει όλες τις διαδικασίες κατανάλωσης και αναπνοής, με συνέπεια την υπέργεια αύξηση των φυτών και την αύξηση των ριζών και της μικροβιακής βιομάζας στο έδαφος. Η φυτική ύλη καταναλώνεται όταν τρώγεται, νεκρή ή ζωντανή, από ένα ζώο. Επιπλέον, τα φυτά επιστρέφουν αποθηκευμένο άνθρακα στην ατμόσφαιρα μέσω της αναπνοής, όπως τα ζώα μέσω των αποβλήτων ή του θανάτου και της αποσύνθεσής τους. Όταν ένα φυτό ρίχνει τα φύλλα και πεθαίνουν οι ρίζες του, αυτές οι οργανικές ύλες αποσυντίθενται, προσθέτοντας άνθρακα στο έδαφος. Ο εδαφολογικός άνθρακας χάνεται στην ατμόσφαιρα μέσω της αποσύνθεσης εδαφολογικών οργανισμών (π.χ., μύκητες και βακτηρίδια). Αυτή η διαδικασία «ορυκτοποιεί» επίσης την οργανική ουσία, κάνοντας διαθέσιμες θρεπτικές ουσίες που απαιτούνται για την ανάπτυξη των φυτών. Το συνολικό ποσό του αποθηκευμένου άνθρακα σε ένα οικοσύστημα απεικονίζει τη μακροχρόνια ισορροπία μεταξύ της φυτικής παραγωγής (κέρδη) και των αναπνοών και αποσυνθέσεων (απώλειες).

Ο βιολογικός μετασχηματισμός του άνθρακα, αποτελεί και πιθανόν θα συνεχίσει να αποτελεί πρωταρχικό μηχανισμό αφαίρεσης του CO<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα. Αυτό απεικονίζεται στο μόνιμο απόθεμα βλάστησης και τη συσσώρευση εδαφολογικών οργανικών ουσιών. Μέθοδοι που στηρίζονται στον βιολογικό μετασχηματισμό, μπορεί να παίξουν κεντρικό ρόλο στη διαχείριση της εναπόθεσης άνθρακα στο μέλλον. Αυτή η εναπόθεση άνθρακα είναι ουσιαστικά μία τεράστια φυσική βιολογική «καταβόθρα» για όλες τις πηγές εκπομπής (π.χ., εγκαταστάσεις απολιθωμένων καυσίμων, τσιμεντοβιομηχανίες, αυτοκίνητα). Η ποσότητα των 2 GtC που αφαιρείται από την ατμόσφαιρα κάθε χρόνο, μέσω του γήινου μανδύα βλάστησης, είναι η καθαρή παραγωγή του οικοσυστήματος. Αυτή η ποσότητα είναι αβέβαιη, επειδή είναι μια κατ' εκτίμηση διαφορά μεταξύ της φωτοσύνθεσης και της αναπνοής. Συγχρόνως, μπορεί να παρατηρηθεί η παγκόσμια καθαρή διαφορά μεταξύ του συνολικού άνθρακα που απορροφάει η φωτοσύνθεση (P) και της απελευθέρωσης από την αναπνοή (R), μέσω της μέτρησης των ετήσιων αλλαγών του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> και υπολογισμού της δυναμικής του ωκεάνιου άνθρακα. Εντούτοις, δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτή η πληροφορία για να αξιολογηθεί το πώς η βιόσφαιρα θα ρυθμίσει το ατμοσφαιρικό CO<sub>2</sub> στο μέλλον. Αυτό γίνεται γιατί η P:R αναλογία είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στις περιβαλλοντικές αλλαγές, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και η θρεπτική διαθεσιμότητα και διαφέρει μεταξύ των οικοσυστημάτων. Αν το ατμοσφαιρικό CO<sub>2</sub> αυξηθεί αρκετά ώστε να προκαλέσει κλιματική αλλαγή, η παγκόσμια P:R αναλογία μπορεί να αλλάξει με τρόπους οι οποίοι δεν μπορούν σήμερα να προβλεφθούν ακριβώς. Μικρές αλλαγές σε αυτούς τους μεγάλους αριθμούς θα μπορούσαν να επισκιάσουν οποιαδήποτε στρατηγική διαχείρισης του άνθρακα, επιβεβλημένη από τους ανθρώπους.

## 5.2. Δυνατότητες για Εναπόθεση Άνθρακα

Τα «συστήματα βιομάζας» που αποτελούν το χερσαίο οικοσύστημα, κατηγοριοποιούνται στον πίνακα 5.2. Οι εκτιμήσεις για την εναπόθεση άνθρακα, περιλαμβάνουν το τρέχον φυσικό ποσοστό εναπόθεσης άνθρακα, το οποίο είναι συνολικά 2 GtC ετησίως. Επισημαίνεται ότι, για να επιτευχθούν οι πιθανότητες που φαίνονται στον πίνακα, ιδιαίτερα οι μεγαλύτεροι αριθμοί, χρειάζεται μια εντατική διαχείριση ενός σημαντικού μέρους των συνολικών συστημάτων βιομάζας. Επίσης, ο πίνακας για να επιτύχει ένα τέτοιο ποσοστό, δεν απεικονίζει εκτιμήσεις οικονομικών, ενεργειακών, ή πε-

ριβαλλοντικών δαπανών, το οποίο θα μπορούσε να είναι αδικαιολόγητα μεγάλο για υψηλότερους αριθμούς. Οι εκτιμήσεις περιλαμβάνουν επίσης τις αναμενόμενες προόδους από ένα εντατικό ερευνητικό πρόγραμμα.

**Πίνακας 5.2.** Κατηγοριοποίηση των συστημάτων εναπόθεσης άνθρακα. Η αρχική μέθοδος εναπόθεσης άνθρακα χαρακτηρίζεται ως υψηλού (H), μεσαίου (M) και χαμηλού (L) επιπέδου έντασης διαχείρισης, η οποία απαιτείται μακροπρόθεσμα. Τα συνολικά ποσοστά δυνατότητας εναπόθεσης άνθρακα υπολογίστηκαν ότι μπορεί να ισχύουν για μια περίοδο 20 – 25 ετών.

	Πρωταρχική Μέθοδος για Αυξημένη Εναπόθεση Άνθρακα	Ικανότητα Εναπόθεσης Άνθρακα (GtC/έτος)
<b>Γεωργικά Εδάφη</b>	Διαχείριση (H)	0,85-0,90
<b>Βιομάζα Καλλιεργημένων Εδαφών</b>	Εκμετάλλευση (H)	0,5-0,8
<b>Λιβάδια</b>	Διαχείριση (M)	0,5
<b>Εδάφη «της σειράς»</b>	Διαχείριση (M)	1,2
<b>Δάση</b>	Διαχείριση (M)	1-3
<b>Αστικά Δάση και Λιβάδια</b>	Δημιουργία και Συντήρηση (M)	
<b>Έρημοι και Υποβαθμισμένα Εδάφη</b>	Εκμετάλλευση (H)	0,8-1,3
<b>Επίγεια Ιζήματα</b>	Προστασία (L)	0,7-1,7
<b>Βόρεια Τύρφη και Άλλοι Υγρότοποι</b>	Προστασία (L)	0,1-0,7
<b>Σύνολο</b>		<b>5,65-10,1</b>

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»

A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

Ο υπολογισμός της δυνατότητας για αύξηση της εναπόθεσης άνθρακα στα χερσαία οικοσυστήματα είναι δύσκολος, επειδή η βιογεωχημική δυναμική που ελέγχει τη ροή του άνθρακα μεταξύ φυτών, εδάφους και ατμόσφαιρας είναι ανεπαρκώς κατανοητή. Επιπλέον, θα υπάρξουν κοινωνικοοικονομικά ζητήματα, ενεργειακές δαπάνες και πιθανές οικολογικές συνέπειες, τα οποία θα πρέπει να συγκριθούν με τα οφέλη της εναπόθεσης ή με άλλες μεθόδους διαχείρισης άνθρακα. Εντούτοις, αν το ανώτερο όριο της χερσαίας εναπόθεσης είναι μεγάλο, τότε θα απαιτούνται εξαιρετικά μέτρα στο μέλλον.

Χρησιμοποιώντας την κατ' εκτίμηση διανομή του άνθρακα που αποθηκεύεται στα σημαντικότερα οικοσυστήματα του κόσμου (πίνακας 5.1.), βρέθηκαν τα πιθανά ποσοστά εναπόθεσης άνθρακα, υποθέτοντας τις προόδους της έρευνας και με συνολική έμφαση στην εναπόθεση άνθρακα. Αυτά παρουσιάζονται για κάθε ένα από τα 9 συστήματα βιομάζας στον πίνακα 5.2. Αν και οι αλλαγές στη χρήση του εδάφους, όπως η αναδάσωση και η μείωση της κοπής των δέντρων, έχουν μεγάλη δυνατότητα να μετριάσουν τις αυξανόμενες εκπομπές άνθρακα, η δυνατότητα εναπόθεσης άνθρακα για μια τέτοια βελτιστοποίηση στα συνολικά συστήματα, απαιτεί μια περιεκτικότερη και συστηματικότερη ανάλυση. Η σημαντικότερη αλλαγή χρήσης του εδάφους που ενσωματώθηκε στην παρούσα ανάλυση είναι μια υπόθεση ότι τα αποτελέσματα της έρευνας, θα επέτρεπαν σε 10 – 15% της συγκομιδής του γεωργικού εδάφους να μετατραπεί σε παραγωγή ενεργειακής συγκομιδής βιομάζας. Η εκτίμηση για τις ερήμους και τα υποβιβασμένα εδάφη, περιέχει επίσης διάφορες υποθέσεις όσον αφορά την αλλαγή χρήσης του εδάφους (Lal, Hassan & Dumanski 1998). Με την «προειδοποίηση» των υποθέσεων που σημειώθηκαν παραπάνω και στον πίνακα 5.2., είναι δυ-



νατό ότι ~5 με 10 GtC ετησίως θα μπορούσαν να εναποθεθούν συνολικά, όταν εξετάζονται όλα τα οικοσυστήματα, έναντι των τρεχόντων ποσοστών των ~2 GtC ετησίως. Μια από τις βασικές ερευνητικές ερωτήσεις είναι πόσο καιρό αυτά τα ποσοστά εναπόθεσης άνθρακα σε αυτά τα συστήματα βιομάζας μπορούν να διατηρηθούν. Επίσης, σαφώς θα υπάρξει κάποια μέγιστη ικανότητα εναπόθεσης, αλλά αυτή η ικανότητα είναι αβέβαιη.

Αν και ίσως εκπληκτικά μεγάλες, αυτές οι σχετικά υψηλές τιμές της πιθανής εναπόθεσης άνθρακα μπορεί να μην είναι αδικαιολόγητες. Για παράδειγμα, μια αύξηση 5% στον συνολικό άνθρακα που περιλαμβάνεται στα συνολικά χερσαία οικοσυστήματα, κατά τη διάρκεια μιας περιόδου 25 ετών, θα εναπόθετε >100 GtC. Η εναπόθεση 100 GtC για πάνω από 25 έτη, απαιτεί αύξηση του ποσοστού εναπόθεσης άνθρακα στα χερσαία οικοσυστήματα (~2.000 GtC) κατά ένα μέσο όρο μόνο 0,2% ανά έτος – κατά προσέγγιση μόνο το μισό από αυτό που εκτιμήθηκε στο πρόγραμμα ως πιθανό.

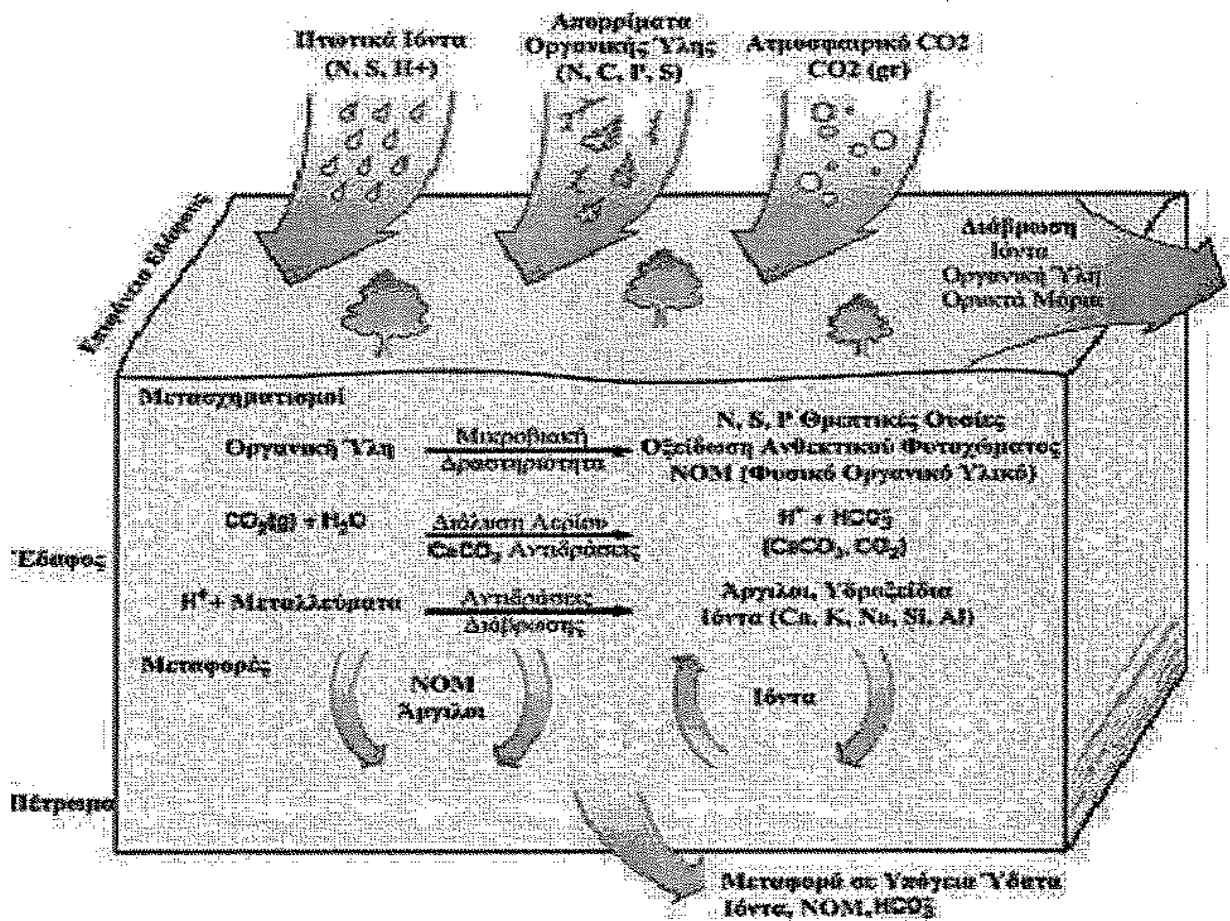
Οι στρατηγικές εναπόθεσης, σε μερικές δεκαετίες από τώρα θα εφαρμοστούν σε έναν κόσμο διαφορετικό από τον σημερινό. Οι ανθρώπινες αντιδράσεις στις κλιματολογικές αλλαγές και άλλα περιβαλλοντικά ζητήματα, αύξηση πληθυσμών, οικονομική ανάπτυξη και τεχνολογική αλλαγή, μπορούν να οδηγήσουν σε αλλαγές στα σχέδια χρήσης εδάφους, φυτών και διαχείρισης πόρων. Φαίνεται απίθανο ότι η εναπόθεση άνθρακα θα είναι η πρώτη προτεραιότητα στη χρήση οποιουδήποτε εδάφους· αντί αυτού, η εναπόθεση θα πρέπει να είναι συμβατή με ένα πλήθος άλλων απαιτήσεων για τα αγαθά και τις υπηρεσίες οικοσυστήματος.

Υπάρχουν μερικοί περιορισμοί και αβεβαιότητες, σχετικά με τη δυνατότητα εναπόθεσης άνθρακα στα χερσαία οικοσυστήματα. Κατ' αρχάς, είναι σημαντικό για την έναρξη να υιοθετηθεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για το οικοσύστημα. Το να υπάρχει η ικανότητα αξιολόγησης των πιθανών επιδράσεων από την εναπόθεση άνθρακα, σε ένα συγκεκριμένο οικοσύστημα είναι μια σημαντική ανάγκη. Για παράδειγμα, η δυναμική της αποθήκευσης άνθρακα και η κατανομή, δεν είναι προς το παρόν ευρέως γνωστές υπό θερμοκρασία, υγρασία και θρεπτικές συνθήκες μεταβαλλόμενου κλίματος. Δεύτερον, οι στρατηγικές εναπόθεσης άνθρακα μπορεί να έχουν συνέπειες πέρα από την απλά αυξανόμενη αποθήκευση άνθρακα. Η αυξανόμενη οργανική ουσία στους υγρότοπους θα μπορούσε να οδηγήσει σε υψηλότερες εκπομπές μεθανίου, ένα αέριο θερμοκηπίου με 20 φορές υψηλότερη συμβολή στην παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου από το CO<sub>2</sub>, αν και οι υδρολογικοί έλεγχοι ή οι αυξήσεις της οργανικής ουσίας θα μπορούσαν να αντισταθμίσουν αυτήν τη διαδικασία. Η μετατροπή των εδαφοκαλλιεργειών σε λιβάδια μπορεί να αυξήσει τις εκπομπές του νιτρικού οξειδίου (N<sub>2</sub>O), άλλο ένα αέριο θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα (Marland et al. 1998).

Τρίτον, η χρήση εδάφους και οι ενέργειες εναπόθεσης θα μπορούσαν επίσης να αλλάξουν τη ροή των θρεπτικών ουσιών. Για παράδειγμα, ως αποτέλεσμα των ελέγχων στη διάβρωση, οι ροές φωσφορικού και νιτρικού άλατος στα υδρόβια συστήματα θα μπορούσαν να αυξηθούν ή να μειωθούν στα επίπεδα που προκαλούν οικολογικές επιπτώσεις. Οι στρατηγικές για «βελτίωση» της εναπόθεσης άνθρακα στις ερήμους μέσω αυξήσεων της βλάστησης που είναι ανθεκτική στην ξηρασία, θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μειωμένες ροές των μεταδιδόμενων μέσω του ανέμου θρεπτικών ουσιών, όπως ο σίδηρος, με πιθανές δυσμενείς επιδράσεις στην ικανότητα των ωκεανών να εναποθέτουν τον άνθρακα μέσω λίπανσης σιδήρου του φυτοπλαγκτού (κεφ.4). Κατά συνέπεια, πρέπει να υποστηριχθεί η ανάπτυξη αποτελεσματικών, αλλά και εύκαμπτων στρατηγικών για την εναπόθεση άνθρακα και να επιδιωχθεί η κατα-

νόηση της αλληλεπίδρασης αυτών των στρατηγικών με άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες και στόχους.

Η δυναμική των μετασχηματισμών και της μεταφοράς του άνθρακα στο έδαφος είναι σύνθετη και μπορεί να οδηγήσει είτε σε εναπόθεση άνθρακα, είτε ακόμα και σε αυξανόμενες εκπομπές CO<sub>2</sub> (σχήμα 5.1.). Τα ιόντα διανθρακικών αλάτων (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) που διαλύονται στο ύδωρ, θα μπορούσαν να εναποτεθούν εάν το διαλυμένο ανθρακικό άλας εισαγόταν σε ένα βαθύ σύστημα υπόγειων υδάτων, το οποίο έχει ηλικία από εκατοντάδες μέχρι χιλιάδες έτη. Η φυσική οργανική ουσία είναι ένας άλλος τύπος εδαφολογικού άνθρακα, ο οποίος θα μπορούσε να μεταφερθεί σε συστήματα υπόγειων υδάτων μεγάλου βάθους. Η φυσική οργανική ουσία μπορεί να κινητοποιηθεί κατά τη διάρκεια της έντονης καθίζησης που ακολουθεί τις παρατεταμένες ξηρές περιόδους, βάση των παρατηρήσεων του Walker Branch Watershed, στο Oak Ridge. Αυτό το πλούσιο σε άνθρακα υλικό μπορεί να εναποτεθεί, εάν μεταφερθεί σε βαθύτερα συστήματα υπόγειων υδάτων, ή εάν κατατεθεί βαθύτερα στο έδαφος. Κατά συνέπεια, υπάρχουν ευκαιρίες να «ενθαρρυνθούν» τα γεωυδρολογικά συστήματα, ώστε να προωθήσουν τη μεταφορά του άνθρακα σε συστήματα υπόγειων υδάτων μεγάλου βάθους.



**Σχήμα 5.1.** Εδαφολογικές διαδικασίες που επηρεάζουν το μέλλον και τη μεταφορά άνθρακα  
 Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
 «Carbon Sequestration, State of the Science»  
 A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

### 5.3. Σημερινές Ικανότητες

Ιστορικά, λίγη έμφαση δόθηκε στην ανάπτυξη των στρατηγικών για την εναπόθεση άνθρακα. Μάλλον, άλλες προτεραιότητες και πρακτικές προώθησαν πραγματικά την απελευθέρωσή του. Για παράδειγμα, στις ΗΠΑ, το 50% των αρχικών υγρότοπων έχουν χαθεί. Ευτυχώς, η τάση που υπάρχει τώρα είναι να προστατευθεί ή ακόμα και να αυξηθεί η επιφάνεια των υγρότοπων, ώστε να διατηρηθούν τα οικοσυστήματα και η βιοποικιλία. Παγκόσμια, η απώλειες υγρότοπων δεν είναι επαρκώς καταμετρημένες, αλλά πιθανώς είναι τόσο μεγάλες ποσοστιαία, όσο και στις ΗΠΑ. Οι αλλαγές στα δασικά αποθέματα και η κοπή των δέντρων συνεχίζονται στο μεγαλύτερο μέρος του κόσμου.

Οι πρακτικές που δεν έχουν εφαρμοστεί μέχρι τώρα, η επιστροφή των υπολειμμάτων στο έδαφος και οι δραστηριότητες του Conservation Reserve Program αυξάνουν την ποσότητα άνθρακα στα γεωργικά συστήματα. (Ο κύριος λόγος: το έδαφος είναι λιγότερο εκτεθειμένο στον αέρα, οπότε λιγότερος εδαφολογικός άνθρακας οξειδώνεται και εναποτίθεται σαν CO<sub>2</sub>). Οι εκτιμήσεις δείχνουν ότι η δυνατότητα εναπόθεσης εδαφολογικού άνθρακα μπορεί να είναι 8 με 10 teragrams ετησίως (Tg / year, ή 1.012 g / year), αντισταθμίζοντας το 1/3 των 28 TgC / year εκπομπών απολιθωμένου από τη γεωργική παραγωγή (Lal et al. 1995· Lal, Kimble & Follett et al. 1998). Η συνακόλουθη αύξηση του υπεδάφιου άνθρακα μπορεί να είναι σημαντική· υπάρχουν στοιχεία ότι τα επίπεδα εδαφολογικού οργανικού άνθρακα έχουν διπλασιαστεί κατά τη διάρκεια των προηγούμενων 20 ετών στα ανώτερα 18 cm του εδάφους, με βάση το Conservation Reserve Program (Gutknecht 1998).

Η κοπή των δασών ανατολικά της Βορείου Αμερικής κατά τον προηγούμενο αιώνα, αντικαθίσταται τώρα με αναδάσωση και αυτή τη στιγμή μπορεί ακόμα και να αποτελεί δεξαμενή άνθρακα (Fan 1998). Δάση στις ΗΠΑ διαχειρίζονται, ώστε να διατηρηθούν και να αυξηθεί η αποθήκευση ύδατος και απορριμμάτων. Παγκόσμια ωστόσο, υπάρχουν ακόμα σημαντικές προκλήσεις για την επιβράδυνση του ποσοστού μείωσης των δασών. Η πρόκληση είναι να αντιστραφεί η μείωση των δασών, ώστε να κερδίζουν 1,4 GtC τον χρόνο και να υπερβούν ίσως τα 2 GtC τον χρόνο. Η Trexler (1998) και Sohngen et al. (1998) δημιούργησαν μοντέλα, τα οποία δείχνουν ότι τα δάση θα μπορούσαν να εναποθέτουν από 200 μέχρι 500 GtC μέχρι το 2090.

Αν και η χρήση της βιομάζας ως εναλλακτικό καύσιμο ανεφοδιασμού δεν εφαρμόζεται ακόμα σε μεγάλη κλίμακα, φαίνεται να είναι μία πολλά υποσχόμενη ανανεώσιμη ενεργειακή τεχνολογία. Η εναπόθεση 0,5 έως 0,8 GtC ετησίως από τη μετατροπή της συγκομιδής σε βιολογικά καύσιμα, θα μπορούσε να επιτευχθεί με τη μετατροπή 10 – 15% της γεωργικής εδαφοκαλλιέργειας σε ενεργειακή ύλη. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι η χρήση των προϊόντων βιομάζας μπορεί να έχει πρόσθετα οφέλη στη διαχείριση άνθρακα, πέρα από την εναπόθεση. Για παράδειγμα, μπορεί να αντικατασταθεί ένα προϊόν το οποίο απαιτεί πολύ ενέργεια για να κατασκευαστεί (π.χ., το βαμβάκι μπορεί να αντικαταστήσει το fiberglass ως μόνωση), ή μπορεί να είναι περισσότερο αποδοτικό ενεργειακά (π.χ., τα πλαστικά panels των αυτοκινήτων που κατασκευάζονται από βιομάζα, είναι ελαφρύτερα από τον χάλυβα).

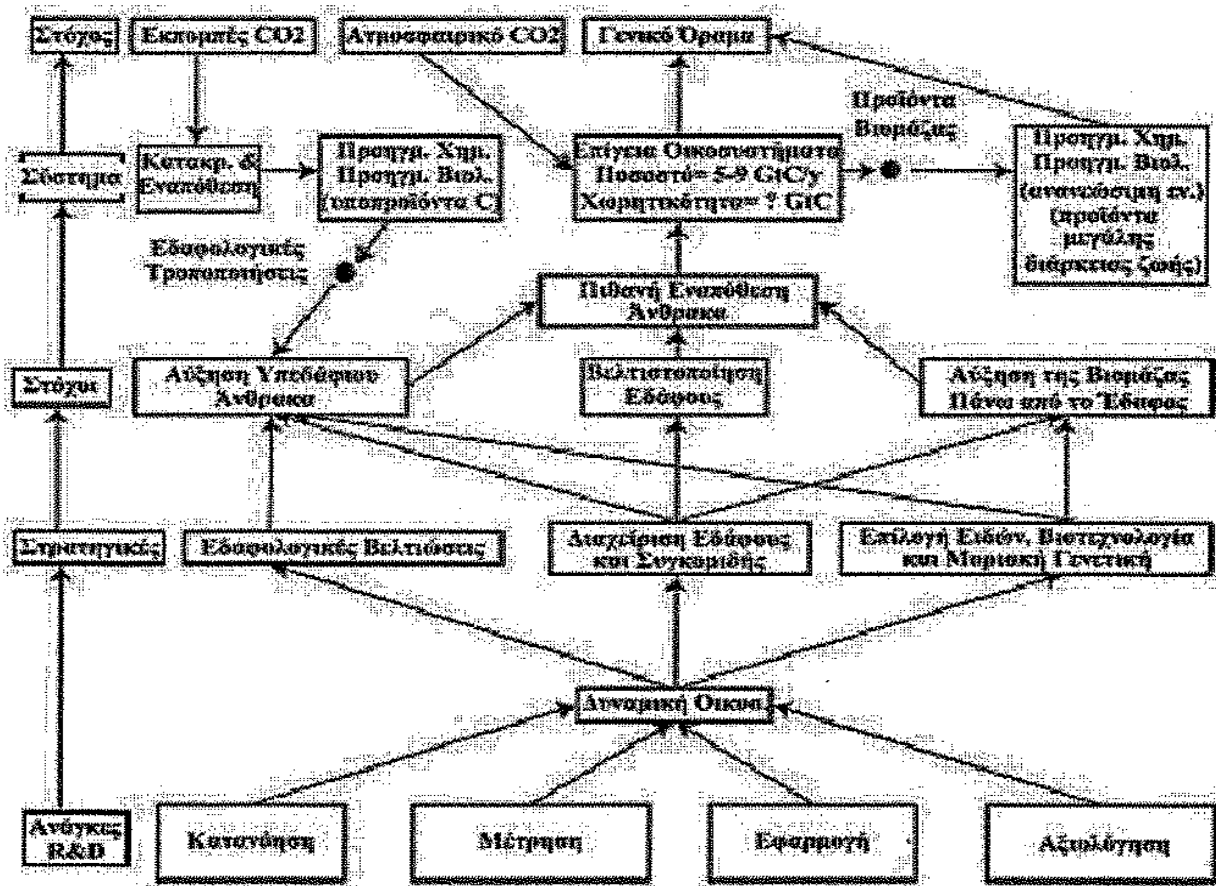
Για την τούνδρα και την τάϊγκα, δυστυχώς, υπάρχει λανθασμένη κατεύθυνση. Αυτές οι περιοχές τείνουν να γίνουν πηγές άνθρακα, παρά δεξαμενές. Η ερήμωση και η υποβάθμιση του εδάφους αυξάνονται παγκόσμια και δε δίνεται έμφαση στο πώς να χρησιμοποιηθούν αυτές οι περιοχές για εναπόθεση άνθρακα. Οι Lal, Hassan & Dumanski (1998) και οι Lal, Kimble & Follett et al. (1998) εκτιμούν ότι η εναπόθεση εδαφολογικού άνθρακα σε αυτά τα συστήματα μπορεί να προσφέρει ένα σημαντικό πλεονέκτημα.

Η αστικοποίηση κατέστρεψε 10 εκατομμύρια εκτάρια (ha) γεωργικού και δασικού εδάφους στις ΗΠΑ, μεταξύ του 1960 και του 1980. Αυτά τα περιβάλλοντα προσφέρουν ενδιαφέρουσες ευκαιρίες. Η πυκνότητα του άνθρακα στο πλαίσιο αυτών των «εντατικά διαχειριζόμενων» συστημάτων (π.χ., χορτοτάπητες με δέντρα) είναι υψηλά αποδοτική για μεγάλα ποσοστά λίπανσης και άρδευσης, με τους ρύπους οξειδίου του αζώτου να διαδραματίζουν δευτερεύοντα ρόλο. Τα δευτερεύοντα πλεονεκτήματα της «αστικής δάσωσης» μπορεί να περιλαμβάνουν τοπικά φαινόμενα ψύξης και διατήρησης ύδατος, που θα μείωναν τις εκπομπές από τη χρήση απολιθωμένων καυσίμων.

Εν περιλήψει, παρά τις παρελθοντικές και παρούσες πρακτικές, όπως η κοπή των δέντρων, πολλές πρακτικές εναπόθεσης άνθρακα είτε ήδη χρησιμοποιούνται, είτε αναπτύσσονται για εφαρμογή. Εντούτοις, αυτό από μόνο του δε μπορεί να εκπληρώσει τον στόχο της εναπόθεσης άνθρακα. Απαιτούνται πιο συγκεκριμένες και συγκεντρωμένες προσπάθειες.

### 5.4. Επιστημονικό και Τεχνολογικό Μοντέλο Χερσαίας Εναπόθεσης

Το σχήμα 5.2. συνοψίζει ένα επιστημονικό και τεχνολογικό μοντέλο για τα χερσαία οικοσυστήματα. Ο στόχος που θέτει το μοντέλο για την εναπόθεση του άνθρακα στα χερσαία οικοσυστήματα είναι κατ' εκτίμηση 4 – 10 GtC / έτος.

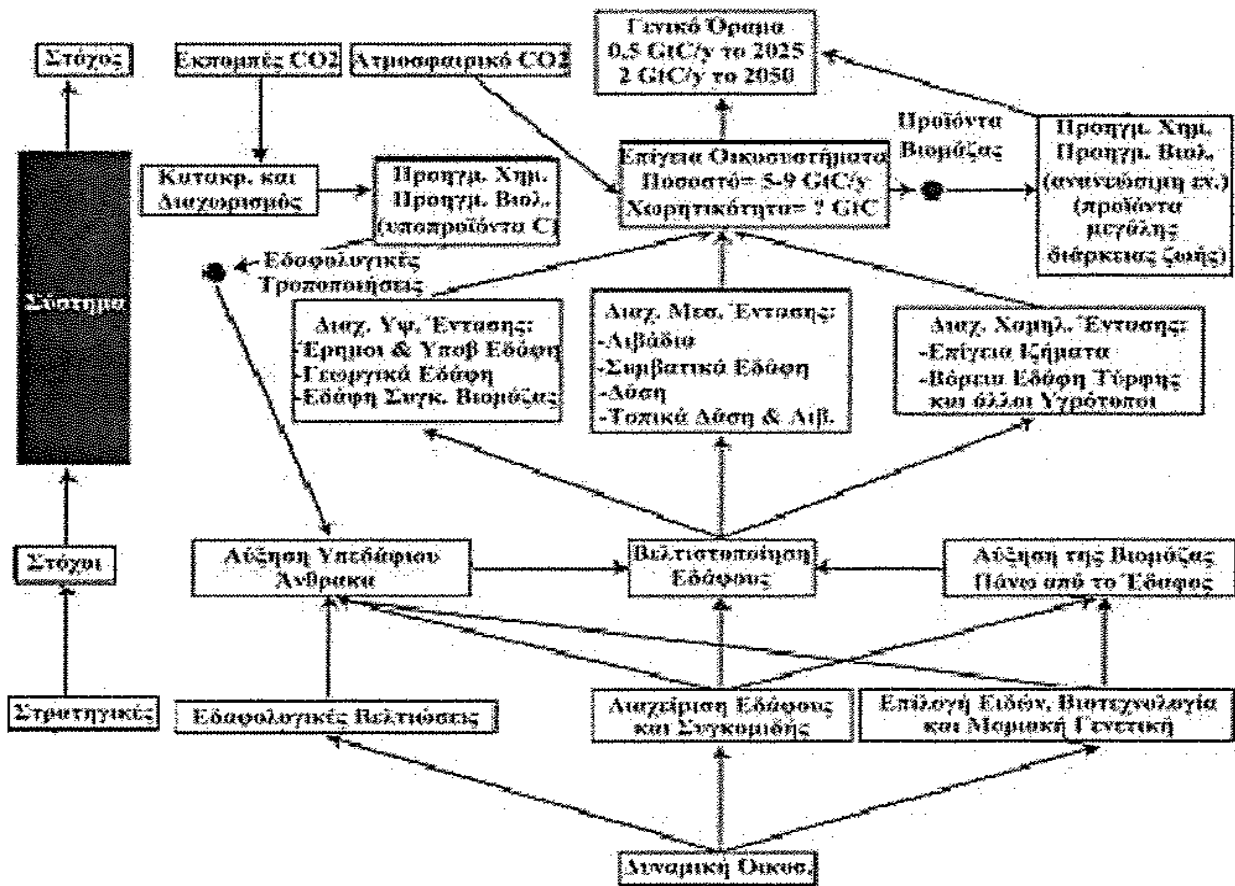


Σχήμα 5.2. Παρουσίαση των στρατηγικών για εναπόθεση στα χερσαία οικοσυστήματα.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»

A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

Η εξέταση των κύριων οικοσυστημάτων του κόσμου είναι πολύ σημαντική. Το μοντέλο εναπόθεσης στα χερσαία οικοσυστήματα επεκτείνεται στο σχήμα 5.3., το οποίο περιλαμβάνει τα σημαντικότερα οικοσυστήματα, ταξινομημένα με βάση την ανάγκη διαχείρισης.



Σχήμα 5.3. Μοντέλο των σημαντικότερων οικοσυστημάτων, ταξινομημένων με βάση την ανάγκη διαχείρισης

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»  
 A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

5.4.1. Στόχοι

Το σύστημα για τη χερσαία εναπόθεση άνθρακα, έχει τρεις στόχους (σχήμα 5.4.): αύξηση του ποσού του άνθρακα στα υπόγεια συστήματα (έδαφος ή ίζημα), αύξηση του άνθρακα στην υπέργεια βιομάζα, και/ή διαχείριση του εδάφους με έμφαση στην εναπόθεση άνθρακα. Μια απλή παρουσίαση του τρόπου με τον οποίο ποσοτικοποιείται η πιθανή εναπόθεση άνθρακα (PCS) είναι :

$$PCS = \hat{a} (a_i AGC_i + b_i BGC_i) + c_i LA_i \quad (1)$$

Όπου:

- $a_i$  = η πιθανή αύξηση του υπέργειου άνθρακα στο  $i^{th}$  οικοσύστημα
- $b_i$  = η πιθανή αύξηση του υπόγειου άνθρακα στο  $i^{th}$  οικοσύστημα
- $c_i$  = η πιθανή αλλαγή του εδάφους, λόγω της διαχείρισης για εναπόθεση άνθρακα στο  $i^{th}$  οικοσύστημα

$AGC_i$  = υπέργειος άνθρακας, βιομάζα του  $i^{th}$  οικοσυστήματος στο συγκεκριμένο έτος

$BGC_i$  = υπόγειος άνθρακας, ρίζες βιομάζας και εδαφολογικός άνθρακας (οργανικός και ανόργανος) του  $i^{th}$  οικοσυστήματος στο συγκεκριμένο έτος

$LA$  = περιοχή εδάφους του κάθε οικοσυστήματος στο συγκεκριμένο έτος.

Για να δημιουργηθεί ένα παγκόσμιο σύνολο για την πιθανή εναπόθεση άνθρακα, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι υπόγειοι και υπέργειοι τύποι άνθρακα για κάθε οικοσύστημα σε ένα συγκεκριμένο έτος, να πολλαπλασιαστεί αυτός ο αριθμός με τον πιθανό συντελεστή αλλαγής, να υποθεθεί η βέλτιστη χρήση εδάφους για μεγιστοποίηση της δυνατότητας αποθήκευσης άνθρακα και να προστεθεί σε όλα τα οικοσυστήματα.

Αν και παρουσιάζονται ως ανεξάρτητες μεταβλητές, οι τρεις όροι (υπέργειος άνθρακας, υπόγειος άνθρακας και περιοχή εδάφους) μπορούν να συνδεθούν στενά. Μπορεί να υπάρξει μεγάλη συνεργασία μεταξύ της φυτικής βιομάζας και του οργανικού εδαφολογικού άνθρακα. Οι αλλαγές στην περιοχή εδάφους μεταξύ διαφορετικών τύπων οικοσυστημάτων (π.χ., μετατροπή της ετήσιας εδαφοκαλλιέργειας σε φυτείες βιομάζας), μπορεί να αυξήσουν τον υπέργειο άνθρακα, ο οποίος μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του υπόγειου άνθρακα. Το ποσοστό αύξησης του υπέργειου άνθρακα θα είναι αρχικά πολύ γρηγορότερο από την αύξηση του υπόγειου άνθρακα, αλλά τα ποσοστά αλλαγής θα εξαρτηθούν από τον τύπο αναδιανομής του εδάφους. Επιπλέον, σημαντικές αλλαγές και στα δυο ποσοστά είναι δυνατές μέσα στους διάφορους τύπους οικοσυστημάτων (ανεξαρτήτως αναδιανομής εδάφους), μέσω των διαφόρων επεμβάσεων διαχείρισης.

Χρησιμοποιώντας την πιθανή εναπόθεση άνθρακα για να καθοριστούν οι μέθοδοι εναπόθεσης, συζητείται κάθε μια από τις μεταβλητές χωριστά. Η λεπτομερής παρουσίαση των στόχων στο σχήμα 5.4. δείχνει τέσσερις τρόπους αύξησης του υπόγειου άνθρακα:

- Αύξηση του βάθους του εδαφολογικού άνθρακα
- Αύξηση της πυκνότητας του άνθρακα (οργανικού ή/και ανόργανου) στο έδαφος.
- Αύξηση της μάζας ή/και του βάθους των ριζών
- Μείωση του ποσοστού αποσύνθεσης του εδαφολογικού άνθρακα

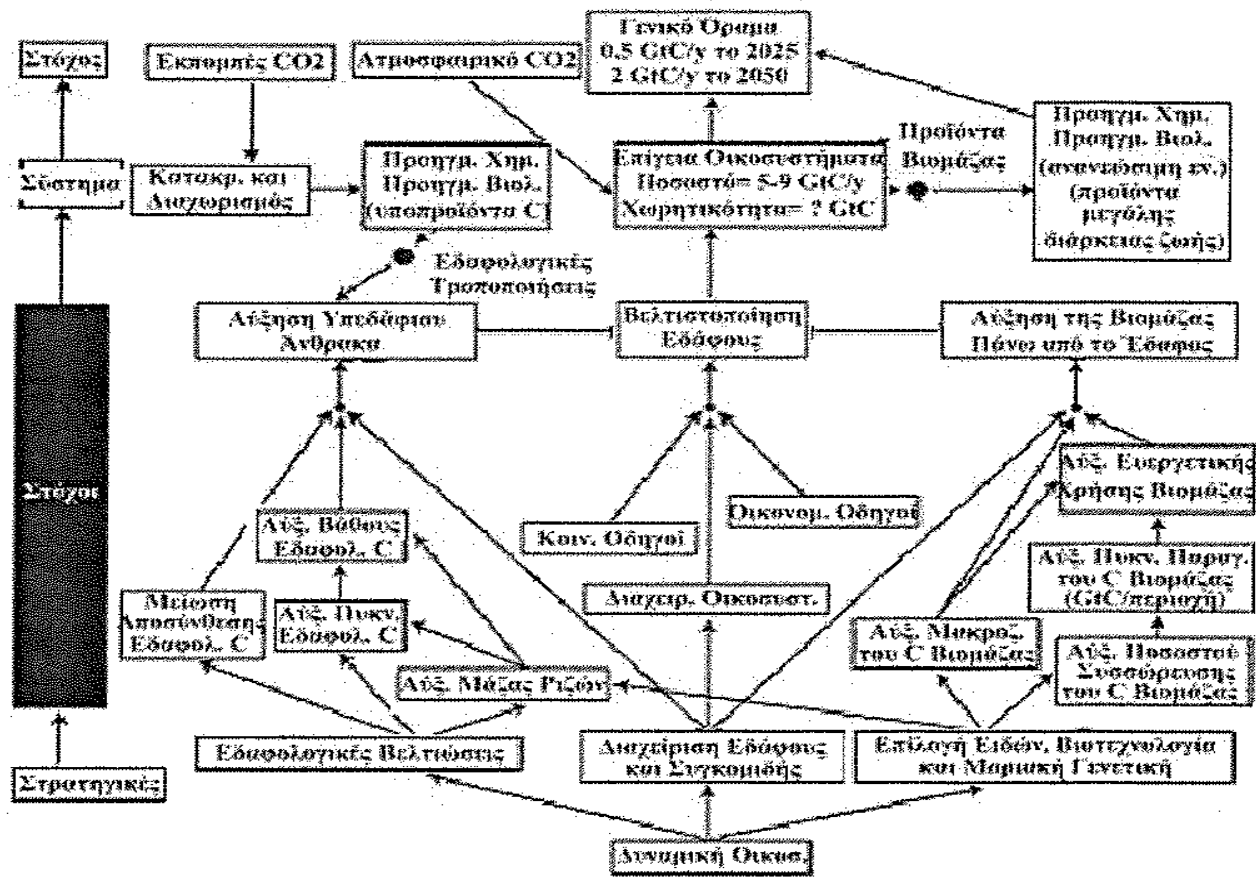
Μια βασική σύνδεση με ένα άλλο τεχνολογικό σύστημα, είναι η πιθανή χρήση των υποπροϊόντων που δημιουργούνται με προηγμένες χημικές ή βιολογικές μεθόδους, ως εδαφολογικές προσθήκες για να αυξήσουν το οργανικό περιεχόμενο, τη διατήρηση ύδατος και την προστασία της οργανικής ουσίας και για να βελτιώσουν τη σύσταση του εδάφους, έτσι ώστε να μπορεί να συγκρατήσει περισσότερο άνθρακα. Παράδειγμα αποτελεί η δημιουργία των «έξυπνων λιπασμάτων» ή η χρήση μεταλλευτικών μιγμάτων (π.χ., ανθρακικά άλατα, πυριτικά άλατα και οξειδία) που διαμορφώθηκαν στις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας απολιθωμένων καυσίμων (κεφ. 8) και συνδυάζονται με «βιοστερεά».

Για το υπέργειο σύστημα, υπάρχουν επίσης τέσσερις τρόποι να αυξηθεί η εναπόθεση άνθρακα (σχήμα 5.4.):

- Αύξηση του ποσοστού συσσώρευσης της υπέργειας βιομάζας
- Αύξηση της πυκνότητας της συνολικής βιομάζας ανά περιοχή ή/και την πυκνότητα του άνθρακα στην υπέργεια βιομάζα



- Αύξηση της μακροζωίας της βιομάζας του άνθρακα (μείωση του ποσοστού αποσύνθεσης)
- Αύξηση της ευεργετικής χρήσης της βιομάζας άνθρακα στα μακρόβια προϊόντα



Σχήμα 5.4. Λεπτομερής ανασκόπηση των στόχων του συστήματος, οι οποίοι περιγράφονται στην εξίσωση (1).

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»

A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

Ένα σημαντικό συστατικό του όρου του υπέργειου άνθρακα είναι η χρήση των προϊόντων βιομάζας. Η αύξηση της πυκνότητας της συνολικής βιομάζας ή του ποσοστού συσσώρευσης, προσφέρει υψηλή δυνατότητα για εναπόθεση άνθρακα. Εντούτοις, η αποθήκευση λόγω της αυξανόμενης φυτικής παραγωγής είναι αποδοτικότερη εάν ο άνθρακας κινείται σε έναν μακροχρόνιο κύκλο, όπως η μακρόβια ξυλώδης βιομάζα ή το έδαφος. Εναλλακτική λύση αποτελεί η αντικατάσταση των προϊόντων που γίνονται χρησιμοποιώντας απολιθωμένα καύσιμα, με προϊόντα που κατασκευάζονται από βιομάζα, εξετάζοντας και την εναπόθεση και τη διαχείριση. Προφανή παραδείγματα, τα οποία αναφέρονται και στη διαχείριση και στην εναπόθεση άνθρακα αποτελούν τα βιοκαύσιμα και τα ξύλινα προϊόντα. Λιγότερο προφανή, αλλά ίσως σημαντικά παραδείγματα, τα οποία επικεντρώνονται στην εναπόθεση άνθρακα μπορεί να περιλαμβάνουν τη χρήση προϊόντων βιομάζας στα δομικά υλικά (π.χ., τσιμέντο) ή συνδυασμένα με άλλα υλικά δημιουργούν νέα εδάφη (σχήμα 5.3.).

Ο όρος περιοχής εδάφους είναι ο μεγάλος πολλαπλασιαστής. Όπως φαίνεται από τις μεγάλες περιοχές στον πίνακα 5.1., σε μερικά οικοσυστήματα μια μικρή αλ-

λαγή στην περιεκτικότητα άνθρακα, θα μπορούσε να οδηγήσει σε μεγάλες αυξήσεις του συνολικού άνθρακα που εναποτίθεται.

Η βελτιστοποίηση, μεταξύ των διάφορων οικοσυστημάτων, της εναπόθεσης άνθρακα θα είναι μια σύνθετη λειτουργία. Η έρευνα σε αυτόν τον τομέα θα πρέπει να περιλαμβάνει ζητήματα όπως μετασχηματισμός του εδάφους από χαμηλή χρήση εναπόθεσης άνθρακα σε υψηλή, καθώς επίσης και να αντιστρέφει αλλαγές στη χρήση εδάφους, οι οποίες έχουν μετατρέψει τις περιοχές εδάφους σε πηγές εκπομπών CO<sub>2</sub>.

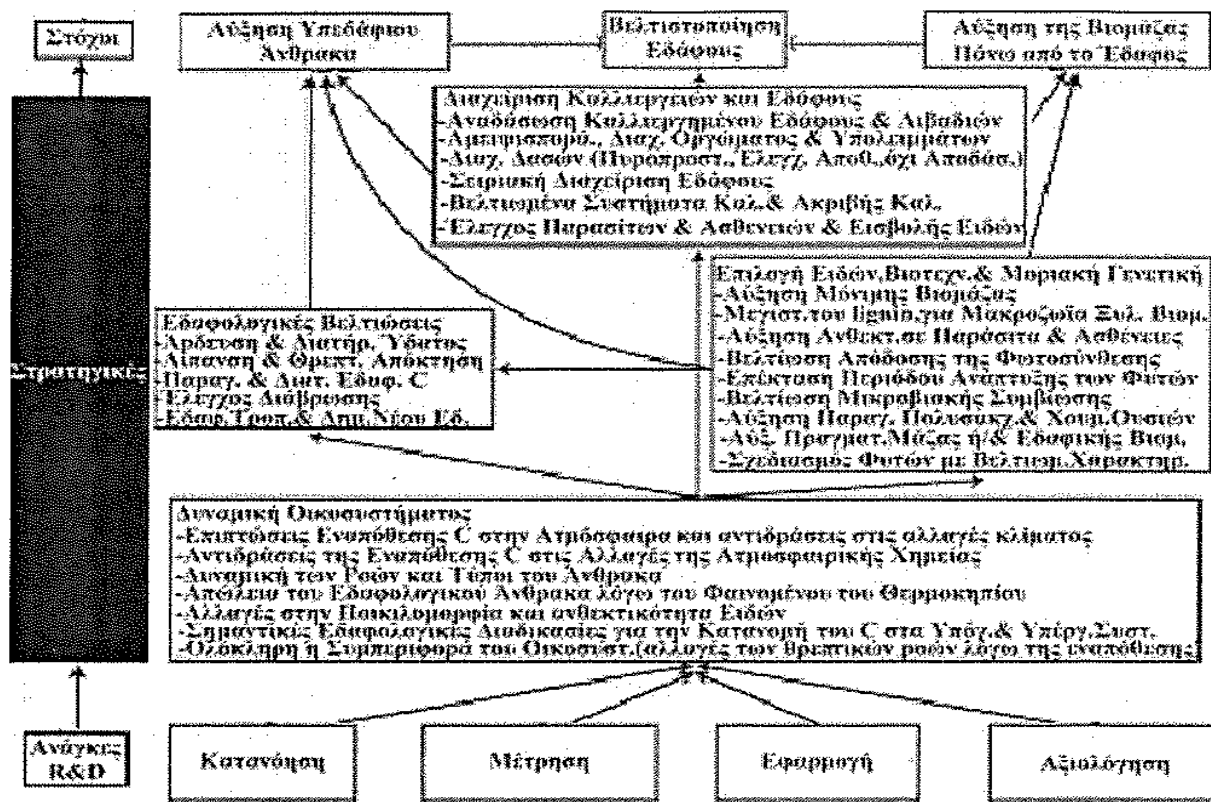
#### 5.4.2. Στρατηγικές

Το επόμενο επίπεδο του μοντέλου (σχήμα 5.5.) εξετάζει τις στρατηγικές που πρέπει να ακολουθηθούν. Τρεις γενικές στρατηγικές υποστηρίζουν άμεσα τους στόχους των χερσαίων οικοσυστημάτων. Η τέταρτη στρατηγική είναι περιεκτική και είναι σημαντική για τις προσπάθειες εναπόθεσης άνθρακα :

- *Εδαφολογικές βελτιώσεις*, για να υποστηριχθεί πρώτιστα ο στόχος για αύξηση του υπόγειου άνθρακα.
- *Διαχείριση καλλιεργειών και εδάφους*, για να επηρεαστούν οι στόχοι της υπέργεια βιομάζας, του υπόγειου άνθρακα και της βελτιστοποίησης της περιοχής εδάφους.
- *Επιλογή ειδών, βιοτεχνολογία και μοριακή γενετική*, που θα βοηθούσαν άμεσα και τα υπέργεια και τα υπόγεια συστήματα και έμμεσα τη χρήση εδάφους, για παράδειγμα, αύξηση γεωργικής παραγωγής στο ελεύθερο έδαφος για την εναπόθεση άνθρακα.
- *Η δυναμική οικοσυστήματος* εστίασε σε όλη τη συμπεριφορά του οικοσυστήματος, για να βελτιστοποιήσει την απόδοση της εναπόθεσης άνθρακα, καθώς επίσης και να αξιολογήσει την πιθανή αρνητική ανατροφοδότηση σε άλλα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του οικοσυστήματος.

##### A) Εδαφολογικές Βελτιώσεις

Ποικίλες λεπτομερείς στρατηγικές θα μπορούσαν να εφαρμοστούν ή να αναπτυχθούν για να αυξήσουν την περιεκτικότητα σε άνθρακα του εδάφους, αυξάνοντας άμεσα τον υπόγειο άνθρακα και έμμεσα τον υπέργειο. Μια από τις ερωτήσεις κλειδιά είναι εάν η εδαφολογική σύσταση, η τοπογραφική θέση και το κλίμα καθορίζουν, τελικά, την περιεκτικότητα σε άνθρακα ενός εδάφους ή εάν αυτή μπορεί να αλλάξει μέσω εκμετάλλευσης. Λίγα είναι γνωστά για τις διαδικασίες «humification» (σχηματισμός φυτοχώματος, το οποίο αποτελείται από αποσυντεθημένη οργανική ουσία, που παρέχει θρεπτικές ουσίες στα φυτά και αυξάνει την εδαφολογική διατήρηση του ύδατος), ή για τη σταθεροποίηση του αποσυντεθημένου οργανικού άνθρακα στο έδαφος. Εντούτοις, το σημερινό επίπεδο κατανόησης είναι επαρκές για τη ρύθμιση των διαδικασιών σταθεροποίησης και τη γνώση των συνεπειών στη φυτική παραγωγή και στις λειτουργίες του οικοσυστήματος.



**Σχήμα 5.5.** Λεπτομερής ανασκόπηση των στρατηγικών για εναπόθεση στα χερσαία οικοσυστήματα.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»

A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

Το σχήμα 5.5. δίνει μια λεπτομερή εικόνα των μεθόδων για εδαφολογική βελτίωση. Δυνατότητες για καινοτομίες υπάρχουν στις ακόλουθες περιοχές, εάν η έρευνα μπορεί να απαντήσει στις ακόλουθες ερωτήσεις κλειδιά:

- **Άρδευση και διατήρηση ύδατος.** Πώς μπορεί να ελαχιστοποιηθεί το ποσό ύδατος που απαιτείται, ή ίσως να χρησιμοποιηθεί ύδωρ χαμηλότερης ποιότητας για να αυξηθεί η συσσώρευση άνθρακα; Για παράδειγμα, τα υπόγεια ύδατα χαμηλής ποιότητας (γκρίζο ύδωρ) θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την αποκατάσταση μεγάλων κομματιών υποβιβασμένων εδαφών. Τα αστικά δάση και τα λιβάδια θα είχαν όφελος από τη χρησιμοποίηση γκριζού ύδατος από τα σπίτια, τις επιχειρήσεις, ή τις πόλεις, από ότι εάν χρησιμοποιούσαν άρδευση με πόσιμη παροχή νερού. Οι επεξεργασίες επιφάνειας ή οι εδαφολογικές τροποποιήσεις που βελτιώνουν τη διατήρηση του ύδατος στο έδαφος, μεταξύ βροχής και άρδευσης, θα είχαν επίσης πολλά πλεονεκτήματα. Μπορεί η αφαλάτωση να συνδεθεί με την άρδευση και την εναπόθεση άνθρακα, μέσω παραγωγής ανθρακικών αλάτων από άλμες και CO<sub>2</sub>;
- **Λίπανση και θρεπτική απόκτηση.** Μπορεί να βελτιωθεί η αποδοτικότητα στην οποία οι θρεπτικές ουσίες λαμβάνονται από τα φυτά, μέσω νέων μικροβιακών χειρισμών ή εδαφολογικών τροποποιήσεων; Μπορεί να καθοριστεί και να ενισχυθεί ο ρόλος της «mycorrhiza» (μια αμοιβαία ένωση μεταξύ ενός μύκητα και της ρίζας ενός φυτού που τον περιέχει) στην σταθεροποίηση άνθρακα και τη φυτική παραγωγή; Πρέπει να εξεταστεί η διαθεσιμότητα και άλλων σημαντικών θρεπτικών ουσιών και ιχνοστοιχείων, εκτός από του αζώτου και του φωσφόρου.

- *Ενισχυμένη παραγωγή και διατήρηση του εδαφολογικού άνθρακα.* Μπορεί ο σχηματισμός των υψηλής απορροφητικότητας οργανικών μακρομορίων να ενισχυθεί, μέσω εδαφολογικών τροποποιήσεων, μικροβιακού χειρισμού, ή γεωεπιδόσεων της βιομάζας; Μπορούν σχέδια για τον εδαφολογικό οργανικό άνθρακα να εμβαθύνουν για να παρέχουν μια μεγαλύτερη διαθέσιμη μάζα εδάφους για την εναπόθεση άνθρακα; Μπορούν οι σχηματισμοί ανόργανου άνθρακα να ενισχυθούν σε ένα ξηρό σύστημα;
- *Έλεγχος διάβρωσης.* Πέρα από τη γεωργία, ποιες μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ελαχιστοποίηση της εδαφολογικής διάβρωσης; Υπάρχουν εδαφολογικές προσθήκες ή επεξεργασίες επιφάνειας, οι οποίες θα περιορίσουν σημαντικά την ευαισθησία των εδαφών στη διάβρωση ύδατος; Υπάρχουν καινοτομίες εφαρμοσμένης μηχανικής για να παγιδεύσουν, τουλάχιστον, την οργανική ουσία που μπορεί να απελευθερωθεί από τη διάβρωση (π.χ., παγίδευση ιζημάτων για ενίσχυση των υγρότοπων); Μπορεί το σημερινό ~0,5 GtC (Stallard 1998) που παγιδεύεται στα ιζήματα κάθε χρόνο, να εναποτεθεί μόνιμα;
- *Εδαφολογικές τροποποιήσεις ή δημιουργία νέου εδάφους.* Μπορούν τα υποπροϊόντα αποβλήτων (τέφρα, σκυρόδεμα) να χρησιμοποιηθούν αυτόνομα ή σε μίγματα με άλλα υλικά, για να βελτιώσουν ακίνδυνα και οικονομικά τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά και έτσι να βοηθήσουν τη διατήρηση του άνθρακα; Μπορούν τα υλικά που δημιουργούνται από υποπροϊόντα να χρησιμοποιηθούν για την αναβάθμιση των εδαφών, ή ίσως ακόμα και για τον μετριασμό της καθίζησης του εδάφους, ενώ ταυτόχρονα εναποτίθεται ο άνθρακας;

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
 «Carbon Sequestration, State of the Science»  
 A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

## B) Διαχείριση Καλλιεργειών και Εδάφους

Οι ευκαιρίες για αύξηση της εναπόθεσης άνθρακα μέσω διαχειριστικών πρακτικών, ποικίλουν στην ένταση και είναι συγκεκριμένες για κάθε οικοσύστημα. Επίσης, υπάρχουν περιπλοκές στην εφαρμογή μερικών στρατηγικών. Για παράδειγμα, υπάρχουν πρακτικές που μειώνουν την οξείδωση της εδαφολογικής οργανικής ουσίας, αλλά δεν προάγουν απαραίτητα την αύξηση ενσωμάτωσης της επιφανειακής οργανικής ουσίας στο έδαφος, ώστε να ενισχύσουν ενδεχομένως τον εδαφολογικό οργανικό άνθρακα μακροπρόθεσμα. Επίσης, υπάρχουν ευκαιρίες να χρησιμοποιηθεί η φυσική βιοποικιλία. Η διαχείριση των γεωργικών οικοσυστημάτων με φύτευση δέντρων και οσπρίων, που αναμιγνύονται με τη συγκομιδή φυτών, μπορεί να προσθέσει οργανικό άνθρακα στο έδαφος. Οι στρατηγικές για τη διαχείριση των καλλιεργειών και του εδάφους περιλαμβάνουν:

- Αναδάσωση του καλλιεργημένου εδάφους και των λιβαδιών.
- Διαχείριση οργώματος, αμειψισπορά, διαχείριση υπολειμμάτων.
- Δασική διαχείριση (μειώνοντας την κοπή των δέντρων, βελτιώνοντας τον έλεγχο των αποθεμάτων και εφαρμόζοντας πυροπροστασία).
- Σειριακή διαχείριση εδάφους.
- Βελτιωμένα συστήματα καλλιέργειας και ακριβής καλλιέργεια, επικεντρωμένη στην εδαφολογική διαχείριση.
- Διαχείριση ελέγχου παρασίτων και ασθενειών και ελέγχου εισβολής ειδών.

- Μείωση αστικοποίησης και μετατροπής των δασικών εκτάσεων για γεωργική χρήση.

### Γ) Επιλογή Ειδών, Βιοτεχνολογία και Μοριακή Γενετική

Οι δυνατότητες επιλογής ή γενετικής μηχανικής ειδών, μπορούν άμεσα να επηρεάσουν και τον υπέργειο και τον υπόγειο άνθρακα. Είναι σημαντικό να κατανοηθεί η συμμετοχή του άνθρακα στη βιομάζα, καθώς γίνεται προσπάθεια να δημιουργηθούν ή να επιλεγθούν γνωρίσματα για την εναπόθεση άνθρακα. Η έρευνα μπορεί επίσης έμμεσα να καταστήσει διαθέσιμη περισσότερη περιοχή εδάφους για εναπόθεση του άνθρακα (π.χ., με τη βελτίωση παραγωγής τροφίμων ανά εκτάριο, ούτως ώστε περισσότερο έδαφος να είναι διαθέσιμο για την εναπόθεση άνθρακα). Αυτή η στρατηγική πρέπει να περιλαμβάνει α) έρευνα των φυτικών και μικροβιακών κοινοτήτων, με εστίαση στις βραχυπρόθεσμες (επόμενα 25 έτη) βιοτεχνολογικές μεθόδους και επιλογές ειδών, χρησιμοποιώντας την υπάρχουσα γνώση και β) βασική έρευνα, σχετική με την «genomic», που θα ασκήσει επιδράσεις στα επόμενα χρόνια (>50 ετών).

Για έρευνα στη γενετική των φυτών, γονίδια πρέπει να είναι διαθέσιμα για εισαγωγή στα επιλεγμένα φυτά. Πολλά γονίδια στη γεωργία έχουν προέλθει από ένα μικρό σύνολο εποχιακών φυτών (π.χ., *Arabidopsis*), για τα οποία πληροφορίες για τη λειτουργία τους (π.χ., ανθεκτικότητα στις ασθένειες ή σχηματισμός λουλουδιών) λαμβάνονται εύκολα. Τα περισσότερα γονίδια που βρίσκονται σε τέτοια φυτά δε θα είχαν άμεση αξία σε μια στρατηγική εναπόθεσης άνθρακα, επειδή τα γονίδια για μακροπρόθεσμη αποθήκευση άνθρακα έχουν μικρή αγρονομική αξία. Κατά συνέπεια για να επιτραπεί η χρήση της γενετικής μηχανικής για την εναπόθεση άνθρακα, υπάρχει η ανάγκη να ανακαλυφθούν γονίδια στα εποχιακά φυτά, τα οποία διαθέτουν περισσότερο άνθρακα στα υπόγεια συστατικά και τα οποία έχουν υψηλότερο περιεχόμενο εκχυλισμάτων (συστατικά τα οποία επιθυμούνται από τα φυτά), ή τα οποία παρέχουν αντίσταση στη μικροβιακή υποβάθμιση. Για να επιτραπεί η ανακάλυψη τέτοιων γονιδίων, μια λειτουργική «genomic» προσπάθεια πρέπει να προηγηθεί των προσπαθειών γενετικής μηχανικής.

Δεν είναι πάντα απαραίτητη η έναρξη με τη λειτουργική «genomic», για την τροποποίηση του γονιδιώματος των φυτών. Για παράδειγμα, τα γονίδια για την παραγωγή υψηλότερης «lignin» περιεκτικότητας σε αραβόσιτο, έχουν αναπαραχθεί από τις τρέχουσες ποικιλίες. (Το «lignin» είναι ένα συνθετικό πολυμερές σώμα που σκληραίνει και ενισχύει τα τοιχώματα των κυττάρων του φυτού και έτσι δεν αποσυντίθενται εύκολα). Υπάρχουν τα γενετικά αποθέματα που έχουν υψηλότερη περιεκτικότητα «lignin» και αυτά θα μπορούσαν να επανεισαχθούν, εάν ο στόχος ήταν να παραχθεί αυτό το χαρακτηριστικό για την εναπόθεση του άνθρακα. Η έρευνα για την αλλαγή του ενζύμου «Rubisco» αυξάνει την παραγωγή βιομάζας μέσω μιας αποδοτικότερης λήψης άνθρακα, που μπορεί επίσης να έχει τεράστια πιθανά οφέλη. Οι δυνατότητες σε αυτόν τον τομέα και σε άλλους, αναλύονται περαιτέρω στο κεφάλαιο 7. Βασικές στρατηγικές γι' αυτό το θέμα, περιλαμβάνουν την ανάπτυξη μεθόδων για:

- Αύξηση μόνιμης βιομάζας.
- Μεγιστοποίηση της περιεκτικότητας σε «lignin», για μακροζωία της ξυλώδους βιομάζας.
- Αύξηση ανθεκτικότητας στα παράσιτα και στις ασθένειες.
- Βελτίωση της απόδοσης της φωτοσύνθεσης.
- Επέκταση της περιόδου ανάπτυξης των φυτών.
- Αύξηση της αναλογίας βλαστός : ρίζα.

- Αύξηση της κατανομής άνθρακα στα υπόγεια συστατικά των λιγότερο αποσυντεθημένων ενώσεων άνθρακα (π.χ., lignin, phenolics)
- Σχεδιασμός νέων φυτών με βελτιωμένη αποδοτικότητα ύδατος, θρεπτική χρήση, ανοχή άλατος και ανοχή pH.

Οι Metting et al. (1998) παρέχουν πληροφορίες για μερικές από τις μεθόδους μικροβιακής τεχνολογίας, που είναι διαθέσιμες για την εναπόθεση περισσότερου άνθρακα στο έδαφος και τη βλάστηση, συμπεριλαμβανομένων της επιλογής ειδών και της γενετικής μηχανικής, για :

- Βελτίωση της μικροβιακής συμβίωσης (μύκητες «mycorrhizal», βακτηριακή σταθεροποίηση του αζώτου και άλλα θρεπτικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα του εδάφους).
- Αύξηση των μυκήτων «mycorrhizal» στη φύση (ειδικά εκείνους που μπορούν να βελτιώσουν το ύδωρ και τη θρεπτική λήψη).
- Αύξηση της παραγωγής πολυσακχαριτών και χουμικών ουσιών, για σταθεροποίηση της εδαφολογικής οργανικής ουσίας.

#### Δ) Δυναμική Οικοσυστήματος

Μια αποτελεσματική στρατηγική εναπόθεσης άνθρακα, πρέπει να εξετάζει όλα τα συστατικά του χερσαίου οικοσυστήματος. Τα απλά είδη δέντρων δε μπορούν να εξεταστούν απομονωμένα από άλλα φυτικά είδη ή από το έδαφος, λόγω των αλληλεπιδράσεων και των αλληλεξαρτήσεων μεταξύ των ειδών ενός οικοσυστήματος. Επιπλέον, η εδαφολογική διαχείριση δε μπορεί να διαχωριστεί από τη φυτική παραγωγή. Αυτή η περιεκτική στρατηγική – δυναμική οικοσυστήματος – βασίζεται σε τέσσερις κύριες ανάγκες:

- Εξισορρόπηση της αποσύνθεσης της βιομάζας και του εδαφολογικού οργανικού υλικού, ως πηγή απώλειας άνθρακα στην ατμόσφαιρα, ενάντια στην αποσύνθεση ως πηγή θρεπτικών ουσιών, ουσιαστικών για την ανάπτυξη των φυτών. Οι στρατηγικές εναπόθεσης που προσπαθούν να μειώσουν τα ποσοστά αποσύνθεσης, μπορεί να οδηγήσουν σε χαμηλότερη αποθήκευση άνθρακα στο οικοσύστημα, επειδή χωρίς αποσύνθεση ανεπαρκείς θρεπτικές ουσίες είναι διαθέσιμες για την ανάπτυξη των φυτών. Η ανακύκλωση των φυτών του εδάφους και των θρεπτικών συστατικών πρέπει να εξεταστεί από κοινού.
- Εξισορρόπηση της βέλτιστης φυτικής παραγωγής, με την επιθυμία για μακροπρόθεσμη και προβλέψιμη / σταθερή παραγωγικότητα. Η διαχείριση ενός οικοσυστήματος για ένα απλό είδος, πιθανότατα δε θα διατηρήσει την παραγωγικότητα κάτω από ένα ευρύ φάσμα συνθηκών, όπως οι κλιματολογικές ανωμαλίες ή οι εκδηλώσεις ασθενειών, χωρίς εντάτικες επεμβάσεις διαχείρισης. Τα είδη που ενδιαφέρουν, η ποικιλομορφία ειδών και η ανθεκτικότητα του οικοσυστήματος πρέπει να εξεταστούν από κοινού.
- Σχεδιασμός στρατηγικών οι οποίες είναι συμβατές με άλλες ανθρώπινες απαιτήσεις για το έδαφος και τους φυσικούς πόρους. Είναι απαραίτητη η κατανόηση και των επιδράσεων της διαχείρισης άνθρακα σε άλλες λειτουργίες του οικοσυστήματος και των τρόπων σχεδιασμού των στρατηγικών διαχείρισης άνθρακα, οι οποίες λειτουργούν σε συντονισμό με άλλους στόχους για τα χερσαία οικοσυστήματα, όπως η παραγωγή τροφίμων και καυσίμων, καθαρό ύδωρ, μετριασμός κλίματος και αισθητική ή πολιτιστική αξία.



- Καθορισμός της πιθανής ανατροφοδότησης από ενέργειες εναπόθεσης άνθρακα. Ποιο είναι το αντίκτυπο της εναπόθεσης άνθρακα στην παραγωγή ή την κατανάλωση αέριων ιχνών που επηρεάζουν την ακτινοβολία ( $N_2O$  και  $CH_4$ ) ή που έχουν σημαντικό ρόλο στην ατμοσφαιρική χημεία ( $CO$  και  $NO$ ); Για παράδειγμα, το αυξανόμενο περιεχόμενο οργανικής ουσίας στους υγρότοπους μπορεί να αυξήσει την καθαρή εκπομπή μεθανίου. Οι αυξανόμενες δεξαμενές οργανικής ουσίας στο έδαφος θα έχουν σημαντικές επιπτώσεις στη διάβρωση και στην επόμενη μεταφορά στους «ποταμούς» σιδήρου, πυριτίου και άλλων θρεπτικών ουσιών; Σε αυτήν την περίπτωση, σε ποια κατεύθυνση μπορούν να εμφανιστούν αλλαγές και ποιες είναι οι πιθανές επιδράσεις; Τι συνέπειες θα είχε μια έμφαση στην εναπόθεση άνθρακα στις ερήμους, στη μεταφορά του σιδήρου και άλλων μετάλλων ή θρεπτικών ουσιών στους ωκεανούς ή σε άλλα χερσαία οικοσυστήματα;

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
«Carbon Sequestration, State of the Science»

*A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)*

Η εναπόθεση άνθρακα στο έδαφος και στη βλάστηση, θα είναι διαφορετική και πρέπει να περιλαμβάνει αξιολόγηση, για να εξετάσει διάφορα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που θα επηρεάσουν ή θα επηρεαστούν από άλλες στρατηγικές εναπόθεσης άνθρακα. Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτών των αξιολογήσεων είναι α) τρόποι χρήσης εδάφους, β) αξιολόγηση ανά κλίμακες και γ) ανάλυση κύκλου ζωής, η οποία είναι η εκτίμηση όλων των δαπανών (πραγματικά δολάρια και δαπάνες άνθρακα) για την εκτέλεση της έρευνας και την εφαρμογή μεθόδων εναπόθεσης άνθρακα. Πολλές δυναμικές παράμετροι και διαδικασίες πρέπει να μετρηθούν και να αξιολογηθούν κατά τη διάρκεια του χρόνου, συμπεριλαμβανομένων:

- Επιπτώσεις εναπόθεσης άνθρακα στην ατμόσφαιρα (π.χ., αυξανόμενες εκπομπές  $CH_4$ ,  $CO$  ή  $N_2O$ ) και αντιδράσεις στις αλλαγές κλίματος (θερμοκρασία, ύδωρ,  $CO_2$ ) καθώς και «απόσυρση» του  $CO_2$  από την εναπόθεση άνθρακα.
- Απώλεια του εδαφολογικού άνθρακα που έχει εναποτεθεί στην ατμόσφαιρα, ως αποτέλεσμα της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου.
- Αντιδράσεις της εναπόθεσης άνθρακα στις αλλαγές της ατμοσφαιρικής χημείας (απόθεση και σταθεροποίηση αζώτου, όζον, οξειδωτικά, άλλοι ρύποι).
- Δυναμική των ροών και τύποι του άνθρακα σε όλες τις κλίμακες, όπως αλλάζουν μετά την εναπόθεση άνθρακα.
- Αλλαγές στην ποικιλομορφία και την ανθεκτικότητα ειδών (π.χ., αν σχεδιαστεί ένα είδος φυτού για πρόωρη και ταχεία ανάπτυξη, μπορεί να περιοριστεί η μακροπρόθεσμη ανάπτυξή του και / ή η υπολογιζόμενη διάρκεια ζωής του) ως απάντηση στην εναπόθεση άνθρακα.
- Σημαντικές εδαφολογικές διαδικασίες για την κατανομή του άνθρακα μεταξύ των υπόγειων συστημάτων (μετασχηματισμός, μεταφορά και μέλλον).
- Ολόκληρη η συμπεριφορά του οικοσυστήματος, ως απάντηση στην εναπόθεση άνθρακα (π.χ., αλλαγή των θρεπτικών ροών, συμπεριλαμβανομένων των εδαφών, της μεταφοράς από τον άνεμο σιδήρου και πυριτίου στους ωκεανούς και της μεταφοράς της οργανικής ουσίας στα υδρόβια συστήματα).

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
«Carbon Sequestration, State of the Science»

*A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)*

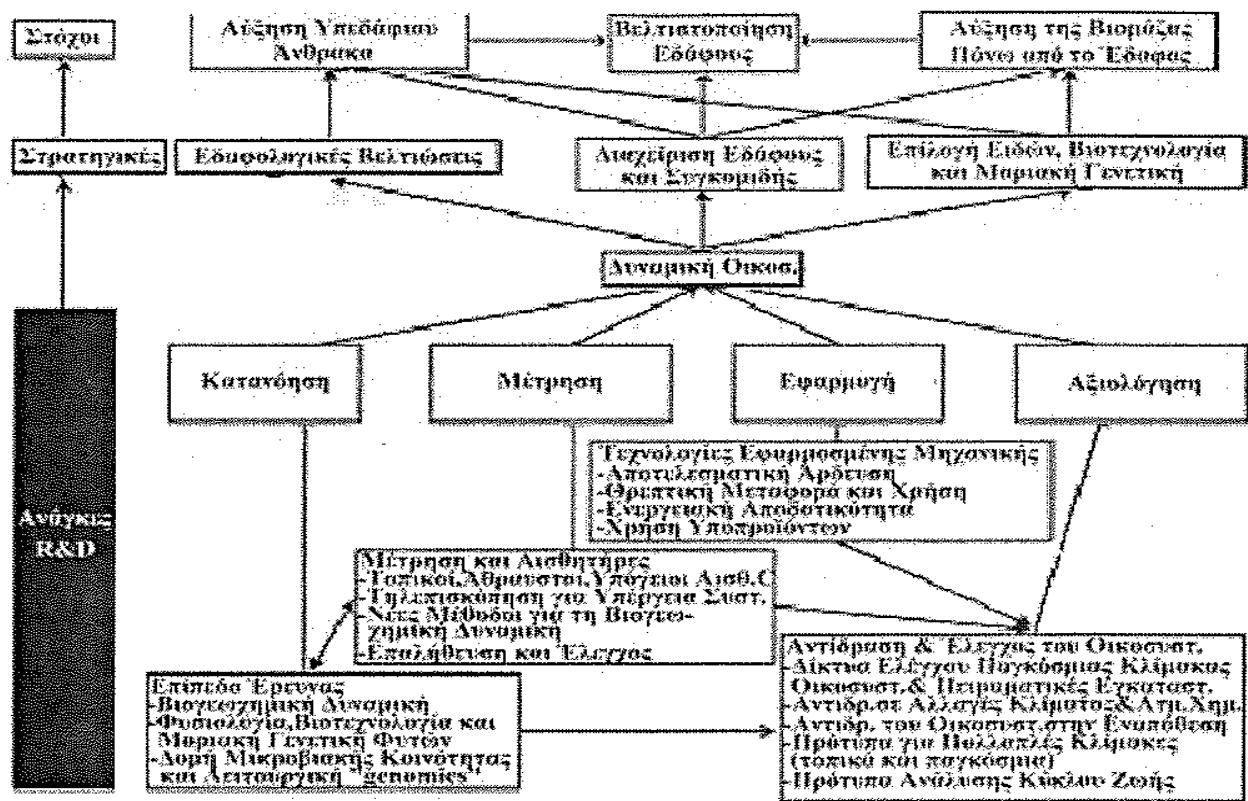
Η αρκτική τούνδρα και η βόρεια τάιγκα, αυτήν την περίοδο, αποθηκεύουν ένα μεγάλο μέρος της παγκόσμιας εδαφολογικής οργανικής ουσίας. Αν και λίγες προφανείς ευκαιρίες υπάρχουν για αποθήκευση άνθρακα σε αυτές τις περιοχές, υπάρχει μια νέα ευκαιρία για ενισχυμένη αποθήκευση άνθρακα, με αποκατάσταση της τούνδρας και με διαχείριση των σιβηρικών «loess», ώστε να γίνουν λιβάδια. Ρώσοι και Αμερικάνοι επιστήμονες επιδιώκουν να δημιουργήσουν ένα οικοσύστημα λιβαδιών που διατηρείται από μεγάλα βόρεια χορτοφάγα, τα οποία είναι παρόμοια με αυτά που υπήρχαν στην περιοχή πριν 10.000 – 100.000 έτη, κατά τη διάρκεια της πρόσφατης «Pleistocene» εποχής (Stone 1998). Η περιοχή δοκιμής του «Pleistocene Park» είναι 150 km<sup>2</sup>, αλλά η σιβηρική περιοχή που καλύπτεται από «loess» και η οποία θα μπορούσε ενδεχομένως να διαχειριστεί για την αποκατάσταση λιβαδιών, είναι περίπου 106 km<sup>2</sup>. Βίσονες, άλογα, βόδια και «caribou» θα εισάγονταν στο «Pleistocene Park», στη βορειοανατολική Σιβηρία. Αυτή η περιοχή φιλοξένησε μεγάλα κοπάδια αυτών των ζώων, καθώς επίσης και των μαμούθ, κατά τη διάρκεια της «Pleistocene» εποχής. Αυτά τα ζώα ήταν σημαντικά για τη διατήρηση του οικοσυστήματος των λιβαδιών, όπως τα μεγάλα χορτοφάγα σήμερα είναι σημαντικά για τη διατήρηση των αφρικανικών λιβαδιών. Η προτεινόμενη «μεταφορά», θα επανεγκαθίδρυε μια σημαντική περιοχή του βόρειου λιβαδιού, ενός τύπου οικοσυστήματος που έχει εξαφανιστεί, αλλά στο παρελθόν αποτελούσε μια από τις πιο διαδεδομένες παγκόσμια δεξαμενές άνθρακα. Αυτό το οικοσύστημα χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλότερο ποσοστό εδαφολογικού άνθρακα (και συνολικό άνθρακα οικοσυστήματος), απ' ό,τι τα οικοσυστήματα που βρίσκονται στην περιοχή σήμερα. Η μεταφορά βλάστησης αναμένεται να οδηγήσει σε θερμότερα, ξηρότερα εδάφη, τα οποία θα προάγουν είδη λιβαδιού με ρίζες μεγαλύτερου βάθους.

### 5.4.3. Ανάγκες για Έρευνα και Ανάπτυξη

Υπάρχουν τέσσερις κρίσιμες πτυχές που εξετάζονται κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος εναπόθεσης άνθρακα στα χερσαία οικοσυστήματα:

- Κατανόηση.
- Μέτρηση.
- Εφαρμογή.
- Αξιολόγηση.

Η διαδικασία – επιπέδου έρευνας θα εξετάσει άμεσα τις ερωτήσεις που πρέπει να απαντηθούν για να αυξηθεί η κατανόηση για τα συστήματα εναπόθεσης άνθρακα. Αυτή η έρευνα συνδέεται στενά και εξαρτάται από την έρευνα για τις μεθόδους μέτρησης και αισθητήρων, για να επιτρέψει τη μελέτη των διαδικασιών σε ποικίλες κλίμακες. Οι νέες μέθοδοι μέτρησης μπορούν επίσης να οδηγήσουν σε νέες σημαντικές ανακαλύψεις, για την κατανόηση των βασικών διαδικασιών. Οι πρόοδοι στη μέτρηση και τους αισθητήρες υποστηρίζουν άμεσα τη βασική ανάγκη για επαλήθευση και έλεγχο της εναπόθεσης άνθρακα. Και οι δύο αυτές περιοχές θα παράσχουν άμεσα οφέλη για την έρευνα της αντίδρασης και τον έλεγχο του οικοσυστήματος. Σαφώς, οι πρόοδοι στην τεχνολογία εφαρμοσμένης μηχανικής θα απαιτηθούν, ώστε να υποστηρίξουν την εφαρμογή των στρατηγικών εναπόθεσης άνθρακα. Παρουσιάζονται συγκεκριμένα ερευνητικά θέματα, όπως φαίνονται στις παύλες του σχήματος 5.6., για περυσότερη σαφήνεια.



**Σχήμα 5.6.** Λεπτομερής ανασκόπηση του επιπέδου αναγκών της έρευνας, παρουσιάζοντας τη θεμελιώδη έρευνα που απαιτείται για να υποστηρίξει την ανάπτυξη μεθόδων εναπόθεσης άνθρακα στα χερσαία οικοσυστήματα.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,

«Carbon Sequestration, State of the Science»

A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

### A) Η Διαδικασία – Επιπέδου Έρευνας

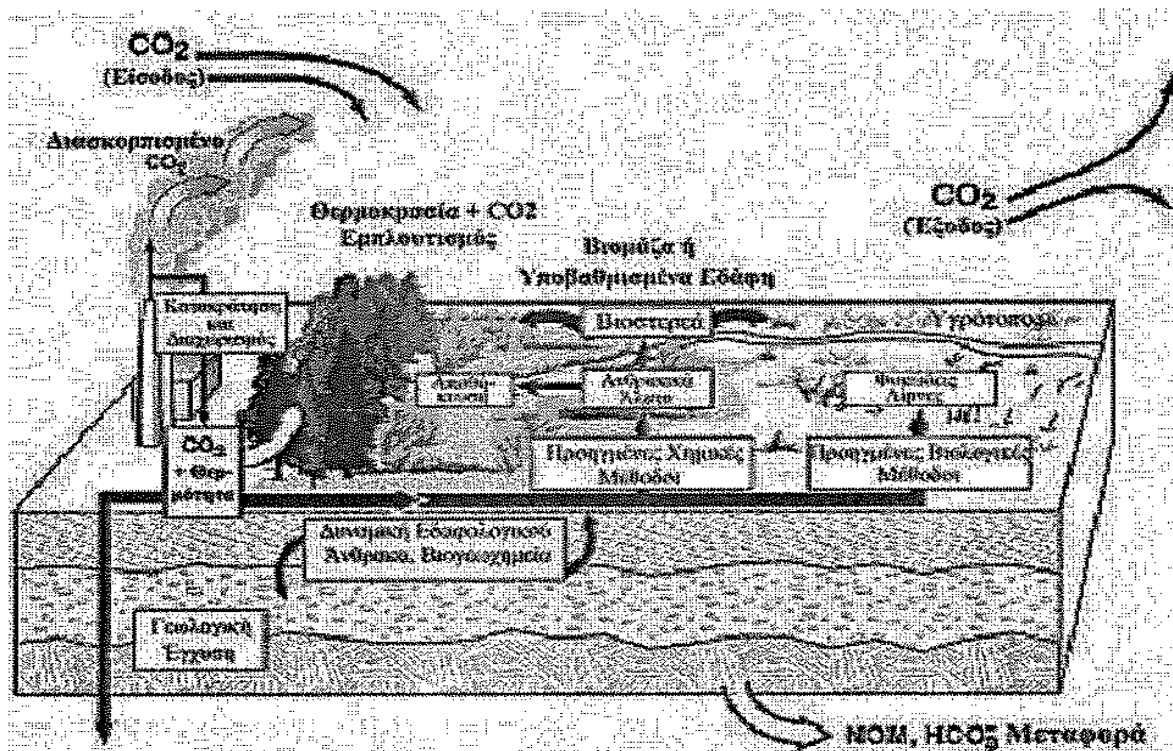
Η διαδικασία – επιπέδου έρευνας στις ακόλουθες περιοχές θα βοηθήσει άμεσα την κατανόηση για τα συστήματα εναπόθεσης άνθρακα. Η έρευνα πρέπει να εστιάσει στα ακόλουθα:

- Βιογεωχημική δυναμική του άνθρακα, αζώτου, φωσφόρου, ασβεστίου, μαγνησίου, καλίου και ιχνοστοιχείων που ελέγχουν τους μετασχηματισμούς του άνθρακα, τη μεταφορά του και το μέλλον του μεταξύ των φυτών, του εδάφους, του ύδατος και της ατμόσφαιρας. Η δυναμική πρέπει να ερευνηθεί μέσα στο πλαίσιο ενός οικοσυστήματος που περιλαμβάνει το έδαφος, το ύδωρ, τα φυτά, τα μικρόβια και τις αλληλεπιδράσεις κλίματος.
- Φυσιολογία φυτών, βιοτεχνολογία και μοριακή γενετική. Τα θέματα της έρευνας πρέπει να περιλαμβάνουν την ανάπτυξη των μεθόδων που επιλέγουν και κατασκευάζουν είδη φυτών για βελτιωμένη θρεπτική απόκτηση, ανάπτυξη, πυκνότητα άνθρακα ή / και εναπόθεση άνθρακα. Πώς μπορούν να αλλάξουν η σύνθεση των κυψελοειδών συστατικών και ο σχεδιασμός των φυτών, για αποτελεσματική χρήση των υποπροϊόντων, αυξάνοντας το ενεργειακό περιεχόμενο, τη διάρκεια και την περιεκτικότητα σε «lignin» για να μειωθούν τα ποσοστά αποσύνθεσης ή η ανακυκλωσιμότητα; Πώς μπορούν τα παράσιτα και η ανθεκτικότητα στις ασθένειες να βελτιωθούν;
- Δομή μικροβιακής κοινότητας και λειτουργική «genomics». Η έρευνα πρέπει να κατευθυνθεί προς α) τις μικροβιακές κοινοτικές λειτουργίες των ριζοσφαι-

ρών φυτών, β) τον ρόλο της μικροβιακής κοινότητας στη σταθεροποίηση της εδαφολογικής οργανικής ουσίας ή την επιβράδυνση της αποσύνθεσης της οργανικής ουσίας και γ) τις μελέτες επιπτώσεων των αποτελεσμάτων των αλλαγμένων εδαφολογικών διαδικασιών στη μεταλλοποίηση και σταθεροποίηση αζώτου και στη φυτική απόκτηση άλλων θρεπτικών ουσιών.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»  
A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

Η ανάπτυξη της επιστήμης και της τεχνολογίας που απαιτείται για τον μετριασμό της αλλαγής κλίματος που προκαλείται από τις εκπομπές του CO<sub>2</sub>, μέσω της εναπόθεσης άνθρακα, θα απαιτήσει μακροχρόνια έρευνα, αξιολόγηση και επίδειξη. Διάφορα ερευνητικά εδάφη και σχετικές εγκαταστάσεις, προσφέρουν περιοχές και πεδία δοκιμής, για την αξιολόγηση της εναπόθεσης στα χερσαία οικοσυστήματα (σχήμα 5.7.). Η αρχική έρευνα σε τοπική κλίμακα είναι πολύ σημαντική, για να οδηγήσει τις μετέπειτα έρευνες.



Σχήμα 5.7. Δυνατότητες για εναπόθεση άνθρακα στα χερσαία οικοσυστήματα

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science» A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

## B) Μέτρηση και Αισθητήρες

Η ανάπτυξη των τεχνικών μέτρησης και αισθητήρων, για να ελεγχθεί η εναπόθεση άνθρακα στα χερσαία οικοσυστήματα και για να ελεγχθούν τα αποτελέσματά της, θα αποτελέσει πρόκληση (Post et al. 1998). Χρειάζονται μέθοδοι για να εξασφαλιστεί ότι οι περιοχές ερευνητικών δειγμάτων, εμφανίζουν αλλαγές με τρόπους οι οποίοι μειώνουν τα λάθη δειγματοληψίας. Η ανίχνευση των αλλαγών του χερσαίου άνθρακα, σε μεγάλη κλίμακα, αποτελεί επίσης πρόκληση. Είναι δυνατό να μπορούν οι εμπειροτεχνικές μέθοδοι να καθοριστούν, για την εναπόθεση άνθρακα που ολοκληρώθηκε από συγκεκριμένες πρακτικές, αλλά αυτή τη στιγμή η βάση για την ποσοτικοποίηση έχει σοβαρή έλλειψη. Εξαιτίας αυτών των προκλήσεων, τα ακόλουθα ερευνητικά θέματα είναι ιδιαίτερα σημαντικά:

- Τοπικοί, μη καταστρέψιμοι υπόγειοι αισθητήρες απαιτούνται για να ποσοτικοποιήσουν τα ποσοστά και τα όρια της συσσώρευσης άνθρακα και στον χώρο και στον χρόνο. Τρεις τομείς σπουδαιότητας είναι α) εδαφολογικός άνθρακας, ύδωρ και θρεπτικές ουσίες, β) απεικόνιση βιομάζας (ρίζα και μικροβιακή κοινότητα) και γ) αλλαγές του πορώδους ή της δομής του εδάφους. Ένα παράδειγμα ενός αισθητήρα ο οποίος μπορεί να αναπτυχθεί για να μετρήσει τις αλλαγές στις συγκεντρώσεις άνθρακα του εδάφους, θα ήταν μια συσκευή μικρογραφημένης απεικόνισης πυρηνικής μαγνητικής αντίληψης, για έναν όγκο «χώματος» κάτω από το έδαφος.
- Η τηλεπισκόπηση (π.χ., από δορυφορική απεικόνιση) απαιτείται για τα υπέργεια συστήματα βιομάζας. Βελτιώσεις απαιτούνται στην ακρίβεια, τη συχνότητα και την κλίμακά των μετρήσεων, για να αξιολογηθεί η κάλυψη εδάφους και η διαχείριση διαφοροποίησης και για να εξεταστεί η μεταβλητότητα που προκαλείται από την ετερογένεια σε αυτές τις κλίμακες.
- Οι νέες μέθοδοι, πέρα από την κλίμακα των υπόγειων διαδικασιών, απαιτούνται για να επιτρέψουν την «παρεμπόδιση» των μετρούμενων αλλαγών στη βιογεωχημική δυναμική.
- Επαλήθευση και έλεγχος. Θα είναι οι νέοι αισθητήρες ή η γνώση των διαδικασιών (εμπειροτεχνικές μέθοδοι) επαρκείς για να υπολογιστεί η εναπόθεση του άνθρακα, βασισμένη στην εφαρμογή των «παρατηρητικών» πρακτικών;

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
«Carbon Sequestration, State of the Science»

A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

### Γ) Τεχνολογίες Εφαρμοσμένης Μηχανικής

Μόλις δοθεί έμφαση σε νέα προγράμματα, μερικά βασικά ζητήματα εφαρμοσμένης μηχανικής πρέπει να αντιμετωπιστούν, για να επιτραπεί η αποτελεσματική εφαρμογή των στρατηγικών. Τα ζητήματα αυτά είναι:

- Αποτελεσματική άρδευση. Πώς μπορεί η χρήση ύδατος να ελαχιστοποιηθεί; Υπάρχουν ευκαιρίες να αναπτυχθεί η διαχείριση του «γκρίζου» ύδατος για τις αστικές περιοχές; Πώς μπορεί η αποκατάσταση υγρότοπων να συνδυαστεί με την κατεργασία ύδατος αποβλήτων; Ποιες είναι οι επιπτώσεις της χρήσης των υπόγειων νερών υποβαθμισμένης ποιότητας;
- Θρεπτική μεταφορά και χρήση. Ένα βασικό ζήτημα θα είναι η σταθεροποίηση του αζώτου. Επίσης με γεγονός τη μείωση της αποσύνθεσης της οργανικής ουσίας, η θρεπτική διαθεσιμότητα θα είναι ένα ζήτημα. Υπάρχουν καινοτόμες εδαφολογικές τροποποιήσεις που μπορούν να αναπτυχθούν; Πώς μπορούν περισσότερο απορρίμματα να ενσωματωθούν αποτελεσματικά στο έδαφος; Υπάρχουν τρόποι να χρησιμοποιηθούν οι μεγάλοι όγκοι των ζωικών αποβλήτων για να βελτιωθεί η εναπόθεση του άνθρακα, λύνοντας αυτήν την περιβαλλοντική πρόκληση;
- Ενεργειακή αποδοτικότητα. Πολλές μέθοδοι εναπόθεσης άνθρακα, θα απαιτήσουν χρήση υλικών τα οποία πρέπει να χειριστούν με βαρύ εξοπλισμό: Πώς μπορεί η καταναλισκόμενη ενέργεια να ελαχιστοποιηθεί; Ποιες εναλλακτικές λύσεις έναντι των κλασικών λιπασμάτων μπορούν να αναπτυχθούν, για να αποφευχθούν οι εκπομπές των απολιθωμένων καυσίμων, κατά την παραγωγή λιπασμάτων;

- Χρήση υποπροϊόντων. Υπάρχουν σημαντικές ερευνητικές συνδέσεις με τα υπάρχοντα προγράμματα. Για παράδειγμα, το πρόγραμμα βιομάζας DOE εξετάζει την αντικατάσταση των απολιθωμένων καυσίμων και το Office of Industrial Technology της DOE εξετάζει προγράμματα αερίου πετροχημικής βιομηχανίας. Υπάρχουν καινοτόμες μέθοδοι για την αποθήκευση ή την ταφή των προϊόντων βιομάζας; Πώς μπορούν τα προϊόντα βιομάζας, όπως το ξύλο, να περιληφθούν στα δομικά υλικά (π.χ., για να αντικαταστήσουν το τσιμέντο, το οποίο παράγεται από το CO<sub>2</sub>) για να εναποθέσουν τον άνθρακα και να μειώσουν τις εκπομπές CO<sub>2</sub>;

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
«Carbon Sequestration, State of the Science»  
A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

#### Δ) Αντίδραση και Έλεγχος του Οικοσυστήματος

Η θεμελιώδης έρευνα που απαιτείται για την αντίδραση και τον έλεγχο του οικοσυστήματος (ERM), εμπίπτει σε δύο ευρείες κατηγορίες: Πρώτον, βασικές μετρήσεις θα απαιτηθούν για υπολογιστικά μοντέλα, τα οποία θα αξιολογούν τα μακροπρόθεσμα αποτελέσματα της εναπόθεσης άνθρακα. Αυτές οι μετρήσεις διαφέρουν σε σχέση με αυτές του κεφαλαίου 5.4.3.2., διότι απαιτούν μεγαλύτερες κλίμακες, πιθανά επεμβατικά πειράματα και ενσωμάτωση στρατηγικών μέτρησης. Δεύτερον, θα απαιτηθούν περιεκτικά μοντέλα, σε κλίμακες απλών επιφανειών εδάφους, μέχρι παγκόσμιων οικοσυστημάτων. Οι κύριοι τομείς που πρέπει να εξεταστούν είναι:

- Δίκτυα βασισμένα στις διαδικασίες, ενσωμάτωση ελέγχου παγκόσμιας κλίμακας οικοσυστήματος και πειραματικές εγκαταστάσεις.
- Μέτρηση των αντιδράσεων των φυτών και της κλίμακας του οικοσυστήματος, στις αλλαγές των μεταβλητών της ατμοσφαιρικής χημείας και του κλίματος, όπως το CO<sub>2</sub>, η θερμοκρασία, οι θρεπτικές ουσίες, το ύδωρ, το όζον και οι ρύποι. Για παράδειγμα, αυξήσεις στις εκπομπές του N<sub>2</sub>O, του CO και του CH<sub>4</sub>, ως ανατροφοδότηση από τις αυξανόμενες δραστηριότητες εναπόθεσης άνθρακα.
- Μέτρηση των αντιδράσεων του οικοσυστήματος στην εναπόθεση. Για παράδειγμα, η ποικιλομορφία ειδών και η ανθεκτικότητα, μπορούν να επηρεαστούν από την εφαρμογή μερικών στρατηγικών.
- Περιεκτικά πρότυπα που εξετάζουν τα φυτά και τις διαδικασίες της κλίμακας του οικοσυστήματος, από τα περιφερειακά μέχρι τα παγκόσμια οικοσυστήματα. Αυτά τα πρότυπα πρέπει επίσης να χρησιμοποιήσουν και να διευκολύνουν τη χρήση των ογκωδών συνόλων στοιχείων, που θα συλλεχθούν μέσω μερικών από τις δραστηριότητες. Για παράδειγμα, εργασία απαιτείται για να αξιολογηθούν οι πιθανές επιδράσεις από μία αποκατάσταση υποβιβασμένων εδαφών, ή εναπόθεση άνθρακα και για να ελεγχθούν οι διαβρώσεις στις ερήμους, που θα μπορούσαν να μειώσουν τη μεταφορά σιδήρου και πυριτίου από τα ρεύματα αέρα στον ωκεανό.
- Πρότυπα ανάλυσης του κύκλου ζωής, τα οποία μπορούν να αναγνωρίσουν τις δυνατότητες για κέρδη βιομάζας, να αξιολογήσουν τα κοινωνικά και οικονομικά ζητήματα και να υπολογίσουν τις συνολικές δαπάνες των συστημάτων (πραγματικές δαπάνες και δαπάνες άνθρακα).

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
«Carbon Sequestration, State of the Science»  
A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)



## 6. ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΤΟΥ CO<sub>2</sub> ΣΕ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί, όπως τα υδροφόρα στρώματα, τα πετρελαϊκά πεδία και τα κοιτάσματα γαιάνθρακα, είναι ιδανικά για να αποτελέσουν την πρώτη μεγάλη κλίμακας ευκαιρία, για συγκεντρωμένη εναπόθεση του CO<sub>2</sub>. Στην πραγματικότητα, εναπόθεση του CO<sub>2</sub>, ήδη γίνεται στο «Sleipner», δυτικά της ακτής της Νορβηγίας, όπου περίπου 1 εκατομμύριο τόνοι CO<sub>2</sub> εναποτίθενται ετησίως, ως μέρος ενός σχεδίου παραγωγής φυσικού αερίου. Οι ειδικοί που αναπτύσσουν τις τεχνολογίες για εναπόθεση του CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς, μπορούν να βασιστούν στην εμπειρία που έχει αποκτηθεί εδώ και έναν αιώνα για την παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου, διαχείριση των υπόγειων πηγών ύδατος και, πιο πρόσφατα, αποθήκευση του φυσικού αερίου (τομείς οι οποίοι συσχετίζονται με την τεχνολογία εναπόθεσης άνθρακα). Σε μερικές περιπτώσεις, η εναπόθεση μπορεί να συνοδεύεται από οικονομικά πλεονεκτήματα, όπως ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου (EOR), ενισχυμένη παραγωγή μεθανίου από κοιτάσματα άνθρακα, ενισχυμένη παραγωγή φυσικού αερίου από εξαντλημένα πεδία και βελτιωμένη αποδοτικότητα αποθήκευσης φυσικού αερίου, μέσω της χρήσης CO<sub>2</sub> ως ένα αέριο αντικατάστασης του μεθανίου από τον ταμειυτήρα.

### Μηχανισμοί Εναπόθεσης

Το CO<sub>2</sub> μπορεί να εναποτεθεί σε γεωλογικούς σχηματισμούς με τρεις βασικούς μηχανισμούς (Hitchon 1996 DOE 1993). Πρώτον, το CO<sub>2</sub> μπορεί να παγιδευτεί σαν αέριο κάτω από ένα χαμηλής διαπερατότητας πέτρωμα, παρόμοια με τον τρόπο που το φυσικό αέριο παγιδεύεται στους ταμειυτήρες αερίου, ή αποθηκεύεται στα υδροφόρα στρώματα. Αυτός ο μηχανισμός, που κοινά καλείται υδροδυναμική παγίδευση, θα γίνει πιθανόν σε μικρό χρονικό διάστημα, ο πιο σημαντικός για την εναπόθεση. Βρίσκοντας καλύτερες μεθόδους αύξησης του ποσοστού των πόρων που καταλαμβάνονται από το παγιδευμένο αέριο, θα μπορεί να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα της χρήσης της εναπόθεσης σε έναν γεωλογικό σχηματισμό. Δεύτερον, το CO<sub>2</sub> μπορεί να διαλυθεί μέσα σε υγρή φάση. Αυτός ο μηχανισμός διάλυσης του αερίου σε υγρό, όπως το πετρέλαιο, ονομάζεται παγίδευση διαλυτότητας. Στους ταμειυτήρες πετρελαίου, το διαλυμένο CO<sub>2</sub> μειώνει το ιξώδες του πετρελαίου και έτσι το κάνει να ρέει πιο εύκολα, διαδικασία η οποία αποτελεί τη βάση για μια από τις πιο κοινές τεχνικές EOR. Η σχετική σημασία της παγίδευσης διαλυτότητας εξαρτάται από έναν μεγάλο αριθμό παραγόντων, όπως η αποτελεσματικότητα της ροής (αποδοτικότητα της αντικατάστασης του πετρελαίου ή του ύδατος) της έγχυσης CO<sub>2</sub>, ο σχηματισμός των δακτύλων «fingers» (πορείες διέλευσης της ροής) και οι συνέπειες της ανομοιομορφίας του σχηματισμού. Η αποδοτική παγίδευση διαλυτότητας θα μειώσει την πιθανότητα το αέριο CO<sub>2</sub> να επιστρέψει γρήγορα στην ατμόσφαιρα.

Τέλος, το CO<sub>2</sub> αντιδρά, άμεσα ή έμμεσα, με τα μεταλλεύματα και την οργανική ουσία στους γεωλογικούς σχηματισμούς, για να γίνει μέρος της στερεάς ορυκτής μήτρας. Στους περισσότερους γεωλογικούς σχηματισμούς, ο σχηματισμός του ασβεστίου, του μαγνησίου και των ανθρακικών αλάτων σιδήρου αναμένεται να είναι οι αρχικές διαδικασίες ορυκτής παγίδευσης. Ωστόσο, η καθίζηση αυτών των ορυκτών φάσεων είναι μια σχετικά αργή διαδικασία, της οποίας η κινητική πολύ λίγο έχει κα-

τανοηθεί. Στους σχηματισμούς του άνθρακα, η παγίδευση επιτυγχάνεται από επιλεκτική απορρόφηση του CO<sub>2</sub> στη στερεά μήτρα. Οι προηγμένες μέθοδοι αύξησης του ποσοστού και της ικανότητας της ορυκτής παγίδευσης, θα δημιουργήσουν σταθερές «αποθήκες» άνθρακα, οι οποίες δε θα τον επιστρέψουν στη βιόσφαιρα και θα μειώσουν την ανεπιθύμητη διαρροή του CO<sub>2</sub> στην επιφάνεια.

Η εύρεση τρόπων να βελτιστοποιηθεί η ορυκτή παγίδευση, ενώ αυξάνεται το ποσοστό στο οποίο οι άλλοι μηχανισμοί παγίδευσης μετατρέπουν το CO<sub>2</sub> σε λιγότερο ευκίνητες και σταθερές μορφές, αποτελεί μια τεράστια πρόκληση.

## Πηγές και Μορφές του CO<sub>2</sub>

Το CO<sub>2</sub> παράγεται είτε από ανάφλεξη απολιθωμένων καυσίμων για παραγωγή ηλεκτρισμού, είτε από απανθράκωση απολιθωμένων καυσίμων για παραγωγή υδρογόνου. Στις επόμενες γενιές, το CO<sub>2</sub> θα διαχωρίζεται από τα καυσαέρια σε ποσοστό τουλάχιστον 90%. Το CO<sub>2</sub> θα μεταφέρεται ως υγρό με αγωγούς στον κοντινότερο γεωλογικό σχηματισμό, κατάλληλο για εναπόθεση. Η τεχνολογία, το κόστος και η ασφάλεια της μεταφοράς, δεν έχουν μελετηθεί.

### **6.1. Ικανότητα Γεωλογικών Σχηματισμών, Κατάλληλων για Εναπόθεση**

Τρεις βασικοί τύποι γεωλογικών σχηματισμών έχουν τη δυνατότητα για εναπόθεση μεγάλων ποσοτήτων CO<sub>2</sub>:

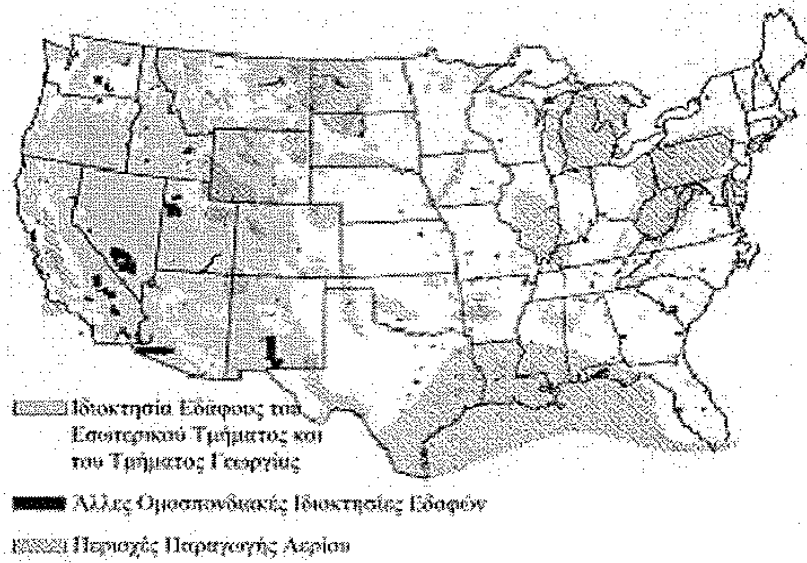
- Ενεργοί και εξαντλημένοι ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου
- Υδάτινοι σχηματισμοί μεγάλου βάθους, συμπεριλαμβανομένων και των αλατούχων σχηματισμών
- Κοιτάσματα άνθρακα μεγάλου βάθους και «coal – bed» σχηματισμοί μεθανίου

Άλλοι γεωλογικοί σχηματισμοί, όπως θαλάσσιες και αρκτικές ένυδρες ουσίες και ταμιευτήρες CO<sub>2</sub>, μπορεί να αυξήσουν την ικανότητα της εναπόθεσης ή να παρέχουν ειδικές δυνατότητες, αλλά δεν έχουν μελετηθεί ικανοποιητικά μέχρι σήμερα.

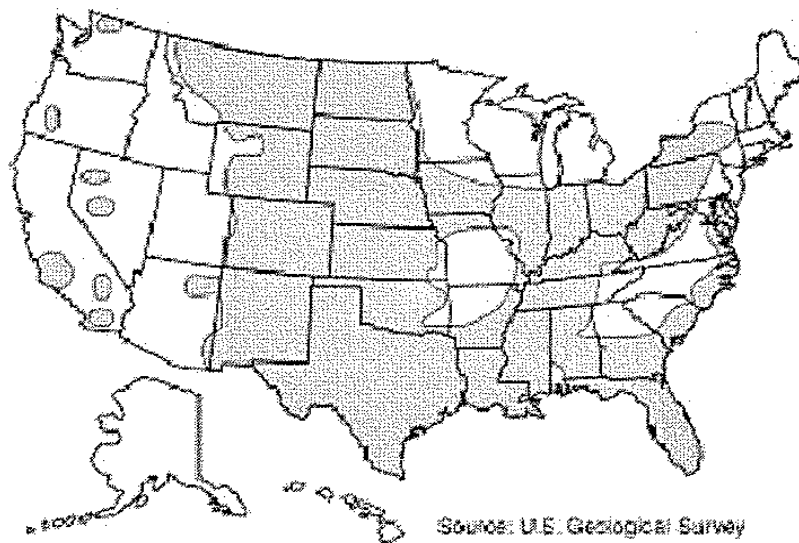
Χάρτες που δείχνουν την τοποθεσία των ενεργών και εξαντλημένων πεδίων άνθρακα και φυσικού αερίου, αλατούχων υδροφόρων στρωμάτων μεγάλου βάθους και σχηματισμών γαιάνθρακα, δίνονται στα σχήματα 6.1. – 6.3. Το σχήμα 6.3., επίσης, δείχνει την τοποθεσία των ενεργειακών σταθμών ανάφλεξης απολιθωμένων καυσίμων. Όπως φαίνεται, ένας ή περισσότεροι από αυτούς τους σχηματισμούς βρίσκεται ως και 500 km από καθέναν από τους ενεργειακούς σταθμούς ανάφλεξης απολιθωμένων καυσίμων των ΗΠΑ.

Εκτιμήσεις της ικανότητας της εναπόθεσης για καθέναν από αυτούς τους τύπους γεωλογικών μετασχηματισμών, δίνονται στον πίνακα 6.1. Ενώ η αβεβαιότητα αυτών των εκτιμήσεων είναι μεγάλη και σε μερικές περιπτώσεις τα κόστη δε λήφθηκαν υπόψη, φαίνεται ότι υπάρχει μια σημαντική ευκαιρία για εναπόθεση του CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς μετασχηματισμούς. Πιο συγκεκριμένα, οι ΗΠΑ έχουν σημαντική ικανότητα, ποικιλία και πλατιά γεωγραφική κατανομή γεωλογικών σχηματισμών, ώστε να προχωρήσουν σε γεωλογική εναπόθεση, ως ένα μεγάλο εγχείρημα μιας εθνικής στρατηγικής διαχείρισης του άνθρακα. Αυτό το οποίο είναι λιγότερο βέβαιο, είναι η μέγιστη ικανότητα την οποία έχουν οι γεωλογικοί σχηματισμοί. Μόνο μέσα από την ε-

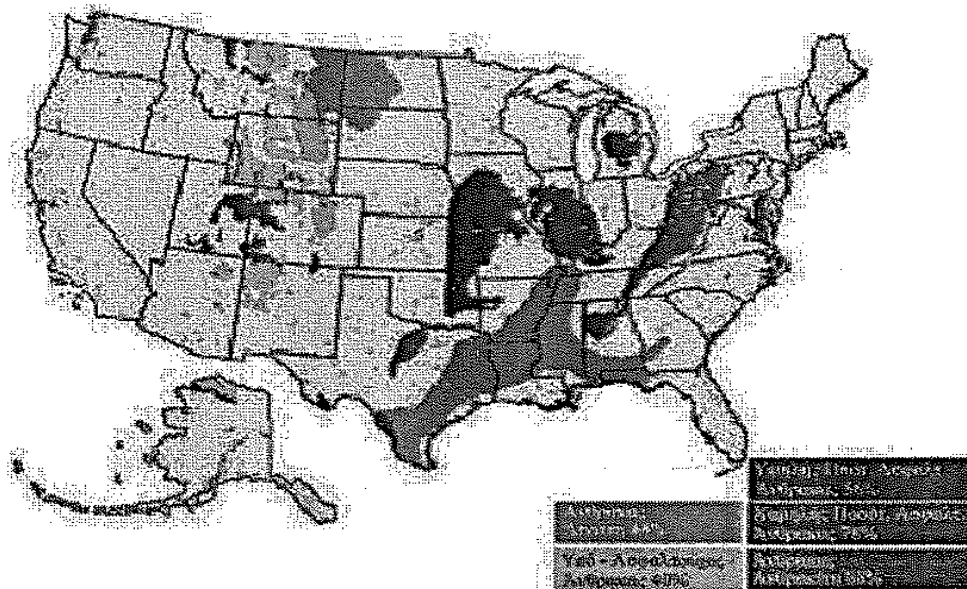
μπειρία και την εφαρμογή θα αποκτηθεί αρκετή γνώση για να βρεθεί η μέγιστη ικανότητα εναπόθεσης των γεωλογικών σχηματισμών.



**Σχήμα 6.1.** Θέση των περιοχών που παράγουν αέριο στις ΗΠΑ  
Πηγή: U.S. Geological Survey



**Σχήμα 6.2.** Θέση των αλατούχων στρωμάτων μεγάλου βάθους στις ΗΠΑ  
Πηγή: U.S. Geological Survey



**Σχήμα 6.3.** Θέση των περιοχών που παράγουν άνθρακα στις ΗΠΑ και εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας.

Πηγή: U.S. Geological Survey

**Πίνακας 6.1.** Σειρά εκτιμήσεων για την εναπόθεση του CO<sub>2</sub> στους γεωλογικούς σχηματισμούς των ΗΠΑ

Γεωλογικοί Σχηματισμοί	Εκτίμηση Χωρητικότητας (GtC)	Πηγές
Αλατούχα Υδροφόρα Στρώματα Μεγάλου Βάθους	1-130	Bergman και Winter 1995
Ταμιευτήρες Φυσικού Αερίου στις ΗΠΑ	25 <sup>α</sup> 10 <sup>β</sup>	R.C. Burruss 1977
Ενεργοί Ταμιευτήρες Αερίου στις ΗΠΑ	0,3/έτος <sup>γ</sup>	Baes et al. 1980
Ενισχυμένη Παραγωγή «coal-bed» Μεθανίου στις ΗΠΑ	10	Stevens, Kuuskraa και Spector 1998

α: Υποθέτοντας ότι όλη η χωρητικότητα αερίου στις ΗΠΑ χρησιμοποιείται για εναπόθεση

β: Υποθέτοντας ότι το παραγόμενο φυσικό αέριο αντικαθίσταται από CO<sub>2</sub>

γ: Υποθέτοντας ότι το παραγόμενο φυσικό αέριο αντικαθίσταται από CO<sub>2</sub>, στην αρχική πίεση του ταμιευτήρα

Αν και οι δυνατότητες για εναπόθεση του CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς φαίνεται να είναι πολλά υποσχόμενες, νέα γνώση, ενισχυμένη τεχνολογία και εμπειρία πρέπει να αποκτηθούν σε πολλούς σημαντικούς τομείς. Οι αρχικοί τομείς οι οποίοι πρέπει να ερευνηθούν, περιλαμβάνουν:

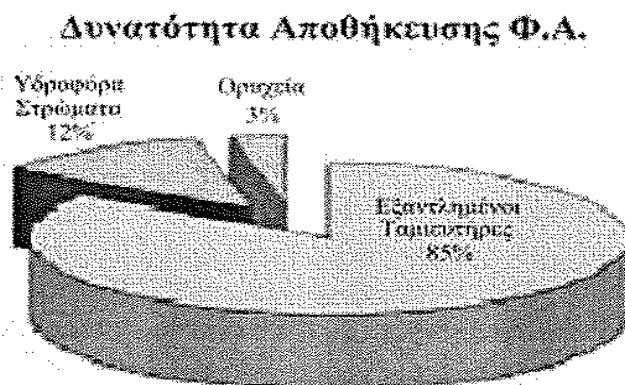
- Ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποτελεσματικών συστημάτων για παρατήρηση της μετανάστευσης του CO<sub>2</sub> στο υπέδαφος
- Εξασφάλιση μακροπρόθεσμης σταθερότητας του CO<sub>2</sub> που έχει εναποτεθεί (<100 έτη)
- Μείωση των οικονομικών και ενεργειακών απαιτήσεων για την εναπόθεση του CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς
- Δημόσια αποδοχή της γεωλογικής εναπόθεσης του CO<sub>2</sub>

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»

A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

## 6.2. Αξιολόγηση των Τρέχουσών Ικανοτήτων και των Ερευνητικών Αναγκών

Οι τρέχουσες ικανότητες και οι ανάγκες αξιολογούνται, για κάθε σημαντικό τύπο γεωλογικού σχηματισμού. Στη συνέχεια, εξετάζονται τα θεμελιώδη ζητήματα που είναι κοινά για όλους τους σχηματισμούς.



**Σχήμα 6.4.** Αποθήκευση Φυσικού Αερίου στους Γεωλογικούς Σχηματισμούς. Η καθημερινή και εποχιακή μεταβλητότητα της ζήτησης φυσικού αερίου απαιτεί την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων φυσικού αερίου, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί χρησιμοποιούνται για να αποθηκευτεί το φυσικό αέριο. Αυτήν την περίοδο, παρέχουν 3 τρισεκατομμύρια  $\text{ft}^3$  του χρησιμοποιούμενου φυσικού αερίου. Το περισσότερο αέριο αποθηκεύεται στους εξαντλημένους ταμιευτήρες αερίου, αλλά τα υδροφόρα στρώματα και τα ορυχεία, συμβάλλουν επίσης σημαντικά στην υπάρχουσα ικανότητα. Η αποθήκευση φυσικού αερίου παρέχει την εμπειρία και καταδεικνύει τη δυνατότητα πραγματοποίησης του μηχανισμού υδροδυναμικής παγίδευσης, για χρήση στην εναπόθεση του  $\text{CO}_2$

Πηγή: Beckman και Deter Meyer 1995

### 6.2.1. Δυνατότητες για Εναπόθεση του $\text{CO}_2$ σε Σχηματισμούς Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου

Οι ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι στόχοι με πολλές δυνατότητες για εναπόθεση του  $\text{CO}_2$ , για πολλούς λόγους. Πρώτον, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο βρίσκονται μέσα σε δομικές ή στρατογραφικές παγίδες και το πετρέλαιο και φυσικό αέριο που είχε αρχικά συσσωρευτεί σε αυτές τις παγίδες, δε δραπέτευσε μετέπειτα. Κατά συνέπεια, αυτοί οι ταμιευτήρες πρέπει επίσης να περιέχουν  $\text{CO}_2$ , εφόσον δε δημιουργήθηκαν διαβάσεις που οδηγούν στην επιφάνεια ή σε παρακείμενους σχηματισμούς, από τις μεγάλες πιέσεις του ταμιευτήρα ή από διαρροές γύρω από τα φρεάτια. Δεύτερον, η γεωλογική δομή και οι φυσικές ιδιότητες των περισσότερων πεδίων πετρελαίου και φυσικού αερίου έχουν μελετηθεί εκτενώς. Ενώ πρόσθετη μελέτη μπορεί να χρειαστεί – ιδιαίτερα της ακεραιότητας και της έκτασης του πετρώματος - , τα διαθέσιμα στοιχεία θα χαμηλώσουν το κόστος εκπλήρωσης των προγραμμάτων εναπόθεσης του  $\text{CO}_2$ . Τέλος, πολύπλοκα υπολογιστικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί από τη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, για να προβλεφθεί η συμπεριφορά και η παγίδευση του  $\text{CO}_2$  για EOR. Αυτά τα μοντέλα λαμβάνουν υπόψη τη ροή του πετρελαίου, του φυσικού αερίου και της άλμης σε τρεις διαστάσεις, τη συμπεριφορά των φάσεων, τη διαλυτότητα του  $\text{CO}_2$  στο πετρέλαιο και την άλμη και

τη μεγάλη ποικιλία των ιδιοτήτων των ταμιευτήρων. Αυτές οι διαδικασίες είναι υπεύθυνες για την υδροδυναμική παγίδευση και την παγίδευση διαλυτότητας του CO<sub>2</sub>.

**Πίνακας 6.2.** Προτεραιότητες της έρευνας για την εναπόθεση του CO<sub>2</sub> σε πεδία πετρελαίου και φυσικού αερίου

Βραχυπρόθεσμη Έρευνα & Ανάπτυξη (<2005)	Μεσοπρόθεσμη Έρευνα & Ανάπτυξη (2005-2010)	Μακροπρόθεσμη Έρευνα & Ανάπτυξη (>2010)
Κατανόηση της σπουδαιότητας των γεωχημικών αντιδράσεων στην: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Εξασφάλιση της ακεραιότητας</li> <li>• Μακροπρόθεσμη εναπόθεση</li> <li>• Καθίζηση του εδάφους</li> <li>• Μακροπρόθεσμη ανάκτηση πετρελαίου</li> </ul>	Ολοκλήρωση της αξιολόγησης των μεθόδων σεισμικού ελέγχου, για έλεγχο της εισχώρησης του CO <sub>2</sub>	Συγκέντρωση δεδομένων κόστους και απόδοσης από ένα ολοκληρωμένο μεγάλης κλίμακας πρόγραμμα εναπόθεσης του CO <sub>2</sub> , από μια εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας σε ένα εξαντλημένο ή εγκαταλελειμμένο πεδίο αερίου
Κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι φυσικοί ταμιευτήρες CO <sub>2</sub> σφραγίζονται και τι συμπεράσματα προκύπτουν για τις δυνατότητες εναπόθεσης του CO <sub>2</sub>	Ενισχυμένη ανάλυση των σεισμικών μεθόδων ελέγχου	Ανάπτυξη μεθόδων για αύξηση της αποτελεσματικότητας της εναπόθεσης, από τις παρούσες εκτιμήσεις (10-20% όγκο πόρων) σε πάνω από 50%
Συνέχιση της εργασίας για την ολοκλήρωση των δεδομένων, ώστε να χαρακτηριστούν οι ποικίλες ιδιότητες των ταμιευτήρων πετρελαίου και αερίου.	Ανάπτυξη συνδεδεμένων H-M-C-T (Hydrologic, Mechanical, Chemical, Thermal) προσομοιωτών για αξιολόγηση της βράχυ- και μακροπρόθεσμης αποτελεσματικότητας και ασφάλειας της εναπόθεσης	
Βελτίωση των μοντέλων οριζόντιων φρεατίων έγχυσης CO <sub>2</sub> για ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου και αποτελεσματικότητα εναπόθεσης	Διεξαγωγή μιας μικρής κλίμακας πιλοτικού προγράμματος για βελτιωμένη ανάκτηση αερίου από ένα εξαντλημένο πεδίο, μέσω έγχυσης CO <sub>2</sub>	
Αξιολόγηση και ανάπτυξη μεθόδων για εντοπισμό εγκαταλελειμμένων φρεατίων σε πεδία πετρελαίου και αερίου	Ανάπτυξη ικανοτήτων επαλήθευσης και ελέγχου για εναπόθεση CO <sub>2</sub> σε εφαρμογές ενισχυμένης ανάκτησης πετρελαίου	
Καθιέρωση κριτηρίων διαλογής για επιλογή τοποθεσίας εναπόθεσης σε πεδία πετρελαίου και αερίου <ul style="list-style-type: none"> <li>• Υψηλότερη προτεραιότητα πρέπει να δοθεί στα προγράμματα ενισχυμένης ανάκτησης πετρελαίου</li> <li>• Αμέσως μετά πρέπει να δοθεί προτεραιότητα στα εγκαταλελειμμένα πεδία αερίου</li> </ul>		
Ένωση των πηγών CO <sub>2</sub> με τις πιθανές τοποθεσίες εναπόθεσης, χρησιμοποιώντας κριτήρια διαλογής		

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»  
A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)



Η πρώτη και περισσότερο βιώσιμη επιλογή για εναπόθεση του CO<sub>2</sub> είναι η στήριξη στην τεράστια εμπειρία της βιομηχανίας για την ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου και φυσικού αερίου (EOR). Σήμερα, περίπου το 80% του εμπορικά χρησιμοποιούμενου CO<sub>2</sub>, χρησιμοποιείται για τους σκοπούς της EOR. Η τεχνολογία της έγχυσης CO<sub>2</sub> είναι εμπορικά αποδεδειγμένη και μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς μεγάλη δυσκολία. Η EOR έχει το πλεονέκτημα της εναπόθεσης του CO<sub>2</sub>, ενώ παράλληλα αυξάνει την παραγωγή των ενεργών πετρελαιοπηγών. Μακροπρόθεσμα, η ποσότητα του CO<sub>2</sub> που εναποτίθεται ως μέρος των προγραμμάτων της EOR, μπορεί να μην είναι συγκριτικά μεγάλη, αλλά πολύτιμη λειτουργική εμπειρία μπορεί να αποκτηθεί, η οποία θα ωφελήσει τη γεωλογική εναπόθεση σε άλλους τύπους σχηματισμών.

Το CO<sub>2</sub> μπορεί να εναποτεθεί σε δύο τύπους πεδίων φυσικού αερίου: α) εγκαταλελειμμένα πεδία και β) εξαντλημένα, αλλά ακόμη ενεργά πεδία, όπου η ανάκτηση αερίου μπορεί να ενισχυθεί με έγχυση CO<sub>2</sub>. Ο χάρτης 6.1. δείχνει ότι, εκτός από τα Βόρεια Κεντρικά και Ατλαντικά παράκτια, εγκαταλελειμμένα πεδία αερίου υπάρχουν σε πολλά μέρη των ΗΠΑ. Αποφασίζοντας ποιο από τα εγκαταλελειμμένα πεδία αερίου θα μπορούσε χρησιμοποιηθεί καλύτερα για ένα πρόγραμμα εναπόθεσης του CO<sub>2</sub>, θα ήταν σκόπιμη μια περιεκτική αναθεώρηση της σημερινής τους κατάστασης και του κόστους της επαναχρησιμοποίησής τους. Αυτό θα ήταν ένα τεράστιο ερευνητικό πρόγραμμα και η απαραίτητη τεχνολογία για να διεκπεραιωθεί είναι διαθέσιμη και γνωστή στη βιομηχανία φυσικού αερίου. Ο εντοπισμός και η επαναχρησιμοποίηση των εγκαταλελειμμένων φρεατίων μπορεί να είναι μια μεγάλη πρόκληση, για την εναπόθεση σε εγκαταλελειμμένα πεδία αερίου.

Σε προσφάτως εγκαταλελειμμένα πεδία αερίου, είναι πιθανό η έγχυση να μπορεί να παρατείνει την οικονομική ζωή του πεδίου, από παραμένουσες πιέσεις του ταμιευτήρα, πολύ περισσότερο απ' ό,τι σε άλλη περίπτωση θα ήταν δυνατό. Ωστόσο, η ενισχυμένη παραγωγή αερίου, μέσω έγχυσης ενός άλλου είδους αερίου ενώ το πεδίο συνεχίζει να λειτουργεί, δεν έχει επιδιωχθεί στις ΗΠΑ. Γι' αυτό, πιλοτικοί έλεγχοι και εργαστηριακές μελέτες θα χρειαστούν για να αναπτυχθεί αυτή η τεχνολογία. Κάποια εμπειρία μπορεί να αποκτηθεί από το «Gaz de France», το οποίο για τα προηγούμενα 10 – 15 χρόνια έχει μετατρέψει τα προγράμματα αποθήκευσης αερίου, ώστε να λειτουργούν με δύο είδη αερίου: φυσικό αέριο που εγχέεται κυκλικά και αποσύρεται όπως απαιτείται και ένα χαμηλού κόστους αέριο «cushion». Ένα παρόμοιο πρόγραμμα μπορεί να αναπτυχθεί για τον συνδυασμό της εναπόθεσης του CO<sub>2</sub>, με την ενισχυμένη παραγωγή φυσικού αερίου από εξαντλημένα πεδία.

Ο πίνακας 6.2. απαριθμεί τις συγκεκριμένες ερευνητικές ανάγκες για ανάπτυξη της τεχνολογίας και για αποδοχή της εναπόθεσης του CO<sub>2</sub> στους ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου. Οι ανάγκες διαιρούνται σε βραχυ-, μεσο-, και μακροπρόθεσμες προσπάθειες, οι οποίες μαζί, θα παρέχουν ένα περιεκτικό σύνολο ενεργειών που θα δημιουργήσει ένα σύνολο μεθόδων εναπόθεσης.

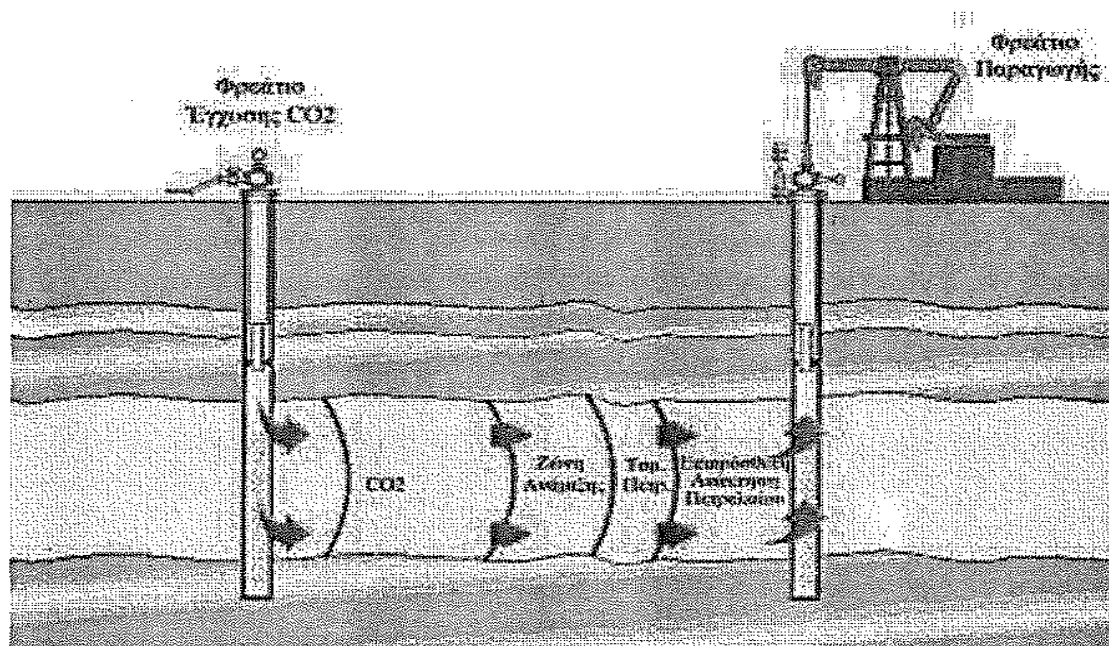
### Χρησιμοποίηση του CO<sub>2</sub> για την Ενισχυμένη Ανάκτηση Πετρελαίου (CO<sub>2</sub> – EOR)

Η CO<sub>2</sub> βελτιωμένη ανάκτηση πετρελαίου, είναι μια εμπορικά αποδεδειγμένη τεχνολογία, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στις ΗΠΑ, όπου τώρα λειτουργούν περίπου 74 προγράμματα. Η CO<sub>2</sub> βελτιωμένη ανάκτηση πετρελαίου μπορεί να είναι αναμίξιμη ή μη αναμίξιμη, ανάλογα με την πίεση του αερίου εγχύσεως στον ταμιευτήρα. Στην αναμίξιμη CO<sub>2</sub> EOR, το CO<sub>2</sub> αναμιγνύεται με το αργό πετρέλαιο, αναγκάζοντάς το να «φουσκώσει» (swell) και να μειώσει το ιξώδες του, ενώ ταυτόχρονα αυξάνει ή διατηρεί την πίεση των ταμιευτήρων (Σχήμα 6.5.). Ο συνδυασμός αυτών

των διαδικασιών επιτρέπει σε περισσότερο αργό πετρέλαιο του ταμιευτήρα να ρεύσει ελεύθερα στα φρεάτια παραγωγής από όπου μπορεί να ανακτηθεί. Η πρόσθετη ανάκτηση πετρελαίου 10 ως 15% ή περισσότερο του αρχικού πετρελαίου συχνά αναφέρεται ως χαρακτηριστική, αλλά τα πραγματικά αποτελέσματα ποικίλλουν αρκετά. Στη μη αναμίξιμη CO<sub>2</sub> EOR, το CO<sub>2</sub> χρησιμοποιείται για να επανασυμπιεστεί ο ταμιευτήρας και σαν αέριο για τη ροή (sweep gas), για να κινηθεί το πετρέλαιο προς το φρεάτιο παραγωγής. Ένα δευτερεύον όφελος της έγχυσης του CO<sub>2</sub> είναι ότι το CO<sub>2</sub> επιλεκτικά κινητοποιεί τα ελαφρύτερα «μέρη» του πετρελαίου, γεγονός το οποίο ελαφρώς βελτιώνει την ποιότητα του παραχθέντος πετρελαίου.

Τα περισσότερα CO<sub>2</sub> EOR προγράμματα που αναλαμβάνονται μέχρι σήμερα, έχουν σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών του CO<sub>2</sub> στον ταμιευτήρα, εφόσον τέτοιες απώλειες αντιπροσωπεύουν ένα συμπληρωματικό κόστος παραγωγής. Συνεπώς, οι περισσότερες επιχειρήσεις δεν έχουν σκεφτεί την περίπτωση αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> ή δεν έχουν προσπαθήσει να καθορίσουν την ποσότητα του CO<sub>2</sub> που μπορεί να αποθηκευτεί και τη σχέση που υπάρχει μεταξύ της αποθήκευσης και της EOR. Το Weyburn CO<sub>2</sub> πρόγραμμα ελέγχου θα στοχεύσει να κλείσει αυτό το χάσμα στη γνώση.

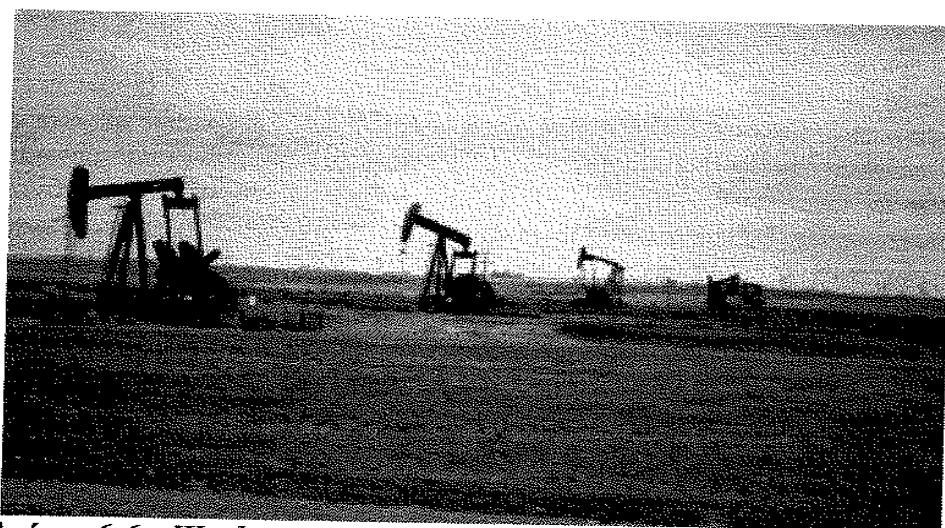
Λίγα από τα υπάρχοντα CO<sub>2</sub> EOR προγράμματα χρησιμοποιούν το CO<sub>2</sub> από ανθρωπογενείς πηγές. Το CO<sub>2</sub> που εγχέεται στο πεδίο Weyburn έρχεται από το «Great Plains Synfuels» εργοστάσιο, που ανήκει και εκμεταλλεύεται από την επιχείρηση αεριοποίησης της Ντακότα. Η εναπόθεση του CO<sub>2</sub> σε αυτόν τον τομέα, έχει άμεση συμβολή στη μείωση των ανθρωπογενών εκπομπών του CO<sub>2</sub> και θα δώσει ένα παράδειγμα για τα μελλοντικά προγράμματα, των διαθέσιμων δυνατοτήτων από τη χρήση αυτής της τεχνικής.



**Σχήμα 6.5.** Σχηματικό Διάγραμμα της ροής κατά την CO<sub>2</sub>-EOR  
 Πηγή: [www.spe.Org](http://www.spe.Org)

**Ιστορικό.** Για να αναγνωριστεί η γεωλογική αποθήκευση του CO<sub>2</sub> ως ασφαλής και περιβαλλοντικά αποδεκτή επιλογή, θα είναι απαραίτητο να παρασχεθούν επιστημονικές πληροφορίες αποθηκεύοντας το CO<sub>2</sub> που εγχέεται στους ταμιευτήρες, για γεωλογικά χρονοδιαγράμματα. Αυτές οι πληροφορίες θα προέλθουν από τον έλεγχο των πρακτικών προγραμμάτων αποθήκευσης. Ένα τέτοιο πρόγραμμα, η αλατούχος

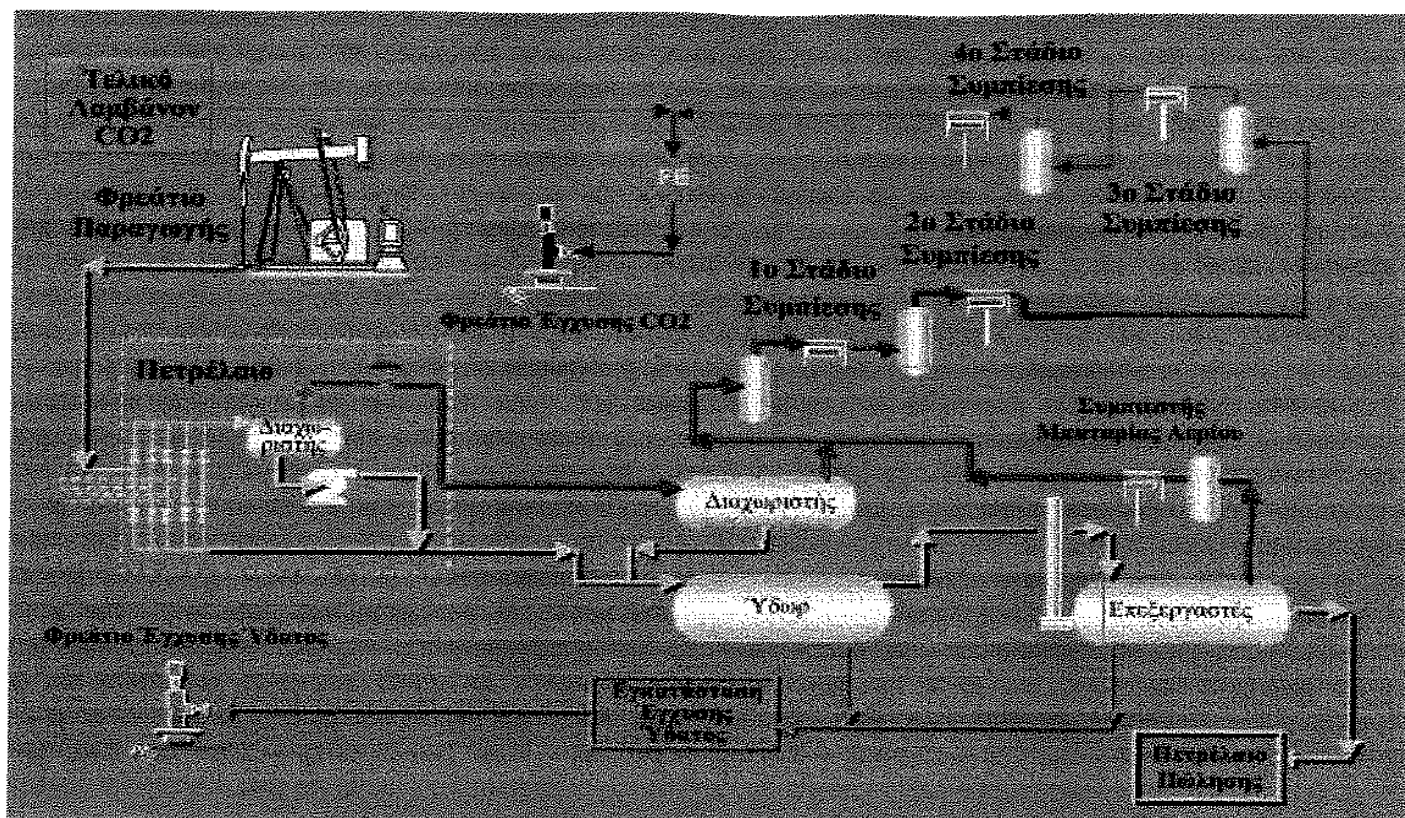
αποθήκευση CO<sub>2</sub> υδροφόρων στρωμάτων (Saline Aquifer Carbon Dioxide Storage, SACS) είναι τώρα εν εξελίξει. Το SACS ελέγχει το CO<sub>2</sub> που έχει εγχυθεί στο πρώτο παγκόσμιο εμπορικού επιπέδου γεωλογικής αποθήκευσης πρόγραμμα, στην Βόρεια Θάλασσα. Σε αυτό το πρόγραμμα, το CO<sub>2</sub> που κατακρατείται από το φυσικό αέριο εγχέεται σε έναν βαθύ αλατούχο ταμιευτήρα, περίπου 800 μέτρα κάτω από τον βυθό. Αυτό βρίσκεται σε λειτουργία 3 έτη. Μέχρι σήμερα, πάνω από 2.000.000 τόνοι CO<sub>2</sub> έχουν εγχυθεί. Άλλες πιθανές γεωλογικές επιλογές αποθήκευσης, συνδυάζουν την αποθήκευση με την ενισχυμένη ανάκτηση των «απολιθωμένων» καυσίμων (fossil fuel), όπως η CO<sub>2</sub> EOR και CO<sub>2</sub> ενισχυμένη παραγωγή «coal – bed» μεθανίου. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι δαπάνες αποθήκευσης αντισταθμίζονται, εν μέρει τουλάχιστον, από την αυξημένη παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου. Επομένως, υπάρχει δυνατότητα να αποθηκευτεί CO<sub>2</sub>, ταυτόχρονα παράγοντας ένα καθαρό εισόδημα. Η δυνατότητα για CO<sub>2</sub> EOR έχει αναγνωριστεί από την Pan Canadian Resources, η οποία έχει αναπτύξει ένα πρόγραμμα CO<sub>2</sub> EOR για την πετρελαιοφόρα περιοχή Weyburn στο νότιο Saskatchewan, στον Καναδά (Σχήμα 6.6.).



**Σχήμα 6.6.** Weyburn Oil Field, Southern Saskatchewan, Canada

Πηγή: [www.spe.org](http://www.spe.org)

Αυτό το πρόγραμμα αποτελεί μια μοναδική ευκαιρία να ελεγχθεί η αποθήκευση του CO<sub>2</sub> που έχει εγχυθεί σε έναν ταμιευτήρα πετρελαίου. Ένα από τα σημαντικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα της πετρελαιοφόρου περιοχής του Weyburn είναι το μεγάλο ποσό διαθέσιμων βασικών πληροφοριών για τις ίδιες τις πετρελαιοπηγές, γεγονός το οποίο είναι αποτέλεσμα της πολιτικής της επαρχίας του Saskatchewan ότι όλες οι πληροφορίες πετρελαιοφόρων περιοχών υποβάλλονται για το δημόσιο αρχείο. Ως εκ τούτου, υπάρχουν σχεδόν πλήρη πρακτικά στο δημόσιο τομέα, των γεωφυσικών πληροφοριών, καθώς επίσης και της παραγωγής και έγχυσης από το πετρελαϊκό πεδίο του Weyburn. Κατά συνέπεια, το πεδίο Weyburn μπορεί ήδη να είναι η καλύτερα τεκμηριωμένη περιοχή παγκοσμίως που αποτελεί στόχο για την CO<sub>2</sub> EOR. Επιπλέον, το πεδίο είναι σε μια ευπρόσιτη θέση. Για αυτόν τον λόγο, οποιεσδήποτε μελέτες ελέγχου για αυτόν τον τομέα, μπορούν να πραγματοποιηθούν με χαμηλότερο κόστος και με μεγαλύτερη επιστημονική βεβαιότητα, από ότι στις περισσότερες άλλες πετρελαιοφόρες περιοχές.



Σχήμα 6.7. Εγκαταστάσεις Επιφάνειας του CO<sub>2</sub>

Πηγή: [www.spe.org](http://www.spe.org)

**Εναπόθεση του CO<sub>2</sub> στα εξαντλημένα κοιτάσματα.** Έχει υπολογιστεί ότι περίπου το μισό από το CO<sub>2</sub> που έχει εγχυθεί αποθηκεύεται στο «ακίνητο» πετρέλαιο, το οποίο παραμένει στη θέση του στην πετρελαιοφόρο περιοχή στο τέλος της παραγωγής. Μέρος του προγράμματος της CO<sub>2</sub> EOR της Pan Canadian είναι η έγχυση 5000 τόνων την μέρα στην πετρελαιοφόρο περιοχή του Weyburn. Στην 20ετή διάρκεια ζωής του προγράμματος αναμένεται ότι περίπου 20.000.000 τόνοι CO<sub>2</sub> θα αποθηκευτούν στις πετρελαιοπηγές Weyburn. Με όρους παραγωγής, το πρόγραμμα θα αποθηκεύσει 85 κυβικά μέτρα CO<sub>2</sub> ανά βαρέλι του παραχθέντος πετρελαίου. Συνολικά έχει υπολογιστεί ότι 130 GT CO<sub>2</sub> θα μπορούσαν να αποθηκευτούν σαν αποτέλεσμα των εργασιών της CO<sub>2</sub> EOR.

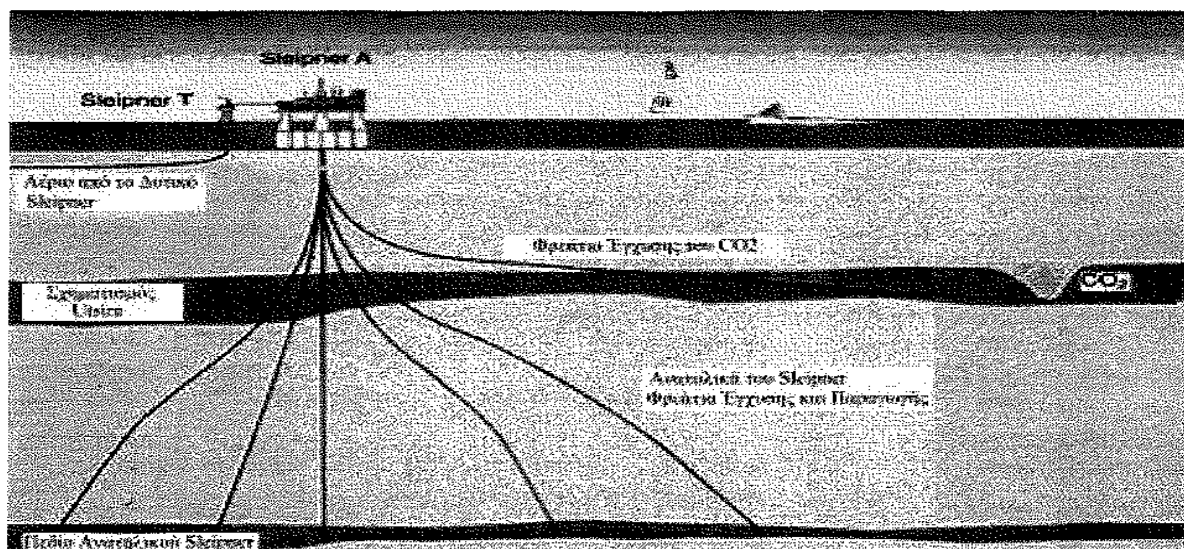
**Παρούσα κατάσταση.** Μια συνέντευξη τύπου έγινε στη Regina στις 13 Ιουλίου του 2000 για να αναγγελθεί τυπικά η έναρξη του ερευνητικού προγράμματος. Ικανοποιητικά κονδύλια έχουν παραληφθεί από την «Natural Resources Canada» και την επαρχιακή κυβέρνηση του Saskatchewan, ώστε να αρχίσει το βασικό πρόγραμμα ελέγχου, πριν από την έγχυση του CO<sub>2</sub>. Ένα λεπτομερές πρόγραμμα για το βασικό πρόγραμμα ελέγχου έχει αναπτυχθεί και περιλαμβάνει τη δειγματοληψία, καθώς επίσης και τις βασικές γεωφυσικές έρευνες. Η προσπάθεια για την εύρεση περισσότερων κονδυλίων για το πρόγραμμα συνεχίζεται και έχουν σταλεί αιτήματα σε διάφορους πιθανούς εταιρικούς χορηγούς, αρχικά στον Καναδά και αργότερα στις ΗΠΑ. Η κατασκευή της σωλήνωσης από τη Βόρεια Ντακότα στο Weyburn έχει ολοκληρωθεί, όπως επίσης και η εγκατάσταση πρόσθετου βοηθητικού εξοπλισμού, συμπεριλαμβανομένων των εγχυτήρων και των συμπιεστών ανακύκλωσης του CO<sub>2</sub>.

**Αλατούχος αποθήκευση του CO<sub>2</sub> υδροφόρων στρωμάτων (SACS).** Τα προγράμματα «Sleipner» είναι η πρώτη παγκόσμια, εμπορικού επιπέδου, αποθήκευση του CO<sub>2</sub> για τον μετριασμό της αλλαγής κλίματος από τις εκπομπές του. Το CO<sub>2</sub> είναι ένα ανεπιθύμητο υποπροϊόν της παραγωγής φυσικού αερίου, δυτικά του Sleipner. Το



CO<sub>2</sub> εγχέεται σε μια μεγάλη, βαθιά, αλατούχο δεξαμενή, τον σχηματισμό «Utsira», 800 μέτρα κάτω από τη Βόρεια Θάλασσα. Ένα ειδικό πρόγραμμα, το πρόγραμμα SACS, έχει καθιερωθεί για να ελέγξει και να ερευνήσει την αποθήκευση του CO<sub>2</sub> σε αυτή την μοναδική επιχείρηση.

Το πεδίο Sleipner. Ένα ειδικό χαρακτηριστικό γνώρισμα του φυσικού αερίου από τη δυτική πετρελαιοφόρο περιοχή του Sleipner, είναι το υψηλό περιεχόμενό του σε CO<sub>2</sub> (περίπου 9%). Αυτό πρέπει να μειωθεί σε 2,5% προτού να μπορέσει το αέριο να πωληθεί στους πελάτες. Το CO<sub>2</sub> εναποτίθεται από το παραχθέν ρεύμα αερίου, από δύο υψηλές στήλες απορρόφησης (20 m). Στη συνέχεια εγχέεται σε μια αλατούχο «water – bearing» δομή, τον σχηματισμό Utsira, ο οποίος αποτελείται από άμμο περίπου 800 m κάτω από το βυθό.



Σχήμα 6.8. Έγχυση του CO<sub>2</sub>

Πηγή: [www.spe.org](http://www.spe.org)

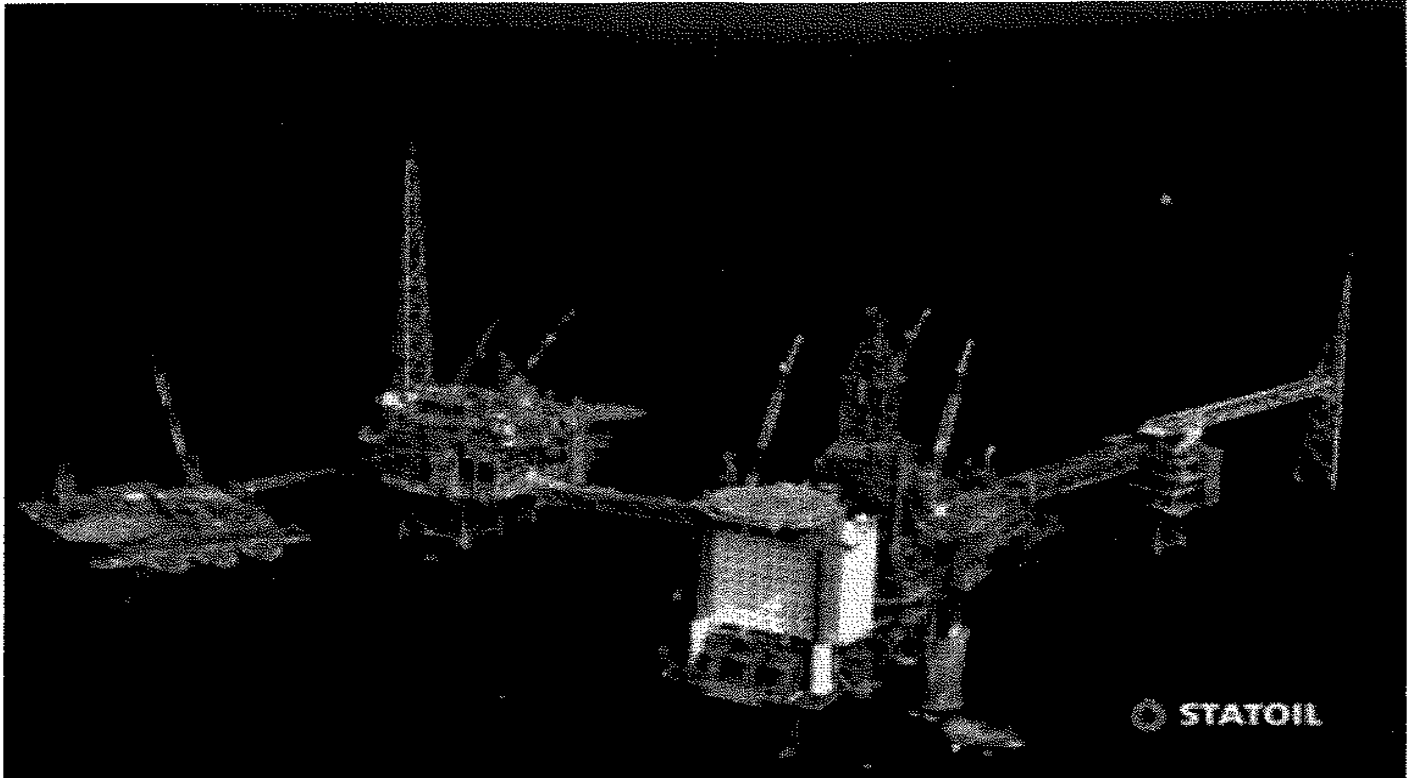
Η παραγωγή του αερίου από τα δυτικά του Sleipner άρχισε τον Αύγουστο του 1996. Η «μεταχείριση» του CO<sub>2</sub> κατ' αυτόν τον τρόπο, σχεδόν εξολοκλήρου αποβάλλει τις εκπομπές στην ατμόσφαιρα. Αυτό το πρόγραμμα είναι πολύ σημαντικό σημείο στη βιομηχανική ιστορία, δεδομένου ότι δεν έχει ξαναγίνει κάτι τέτοιο σε τόσο μεγάλη κλίμακα (1.000.000 τόνοι CO<sub>2</sub> ετησίως). Ούτε το CO<sub>2</sub> ως τώρα έχει συμπεσθεί και εγχυθεί υπόγεια, σε μια παράκτια πλατφόρμα.

Η «IEA Greenhouse Gas R&D Programme» έχει ενώσει τις δυνάμεις της με την «Statoil», για να συντονίσουν ένα πρόγραμμα που συνδέεται με το πρόγραμμα Sleipner, γνωστό ως SACS. Αυτό το πρόγραμμα ελέγχου θα επιβεβαιώσει ότι η αποθήκευση του CO<sub>2</sub> στις βαθιές αλατούχες δεξαμενές είναι μια ασφαλής και αξιόπιστη επιλογή, που θα παράσχει τα στοιχεία για να επικυρώσει τα πρότυπα προσομοίωσης των ταμιευτήρων, τα οποία θα είναι ουσιαστικά στον σχεδιασμό των μελλοντικών προγραμμάτων αποθήκευσης του CO<sub>2</sub>, σε άλλα μέρη του κόσμου.

Το πρόγραμμα SACS είναι μια άριστη ευκαιρία να επικυρωθεί η θεωρία με την πρακτική και είναι μεγάλου ενδιαφέροντος σε πολλές οργανώσεις σε όλο τον κόσμο. Μόνο μια κοινή προσπάθεια, που περιλαμβάνει μια μεγάλη διεθνή επιλογή των ειδικών και των επιχειρήσεων θα μπορούσε να διεκπεραιώσει με επιτυχία ένα τέτοιο πρόγραμμα.

Αυτή τη στιγμή, το πρόγραμμα SACS κινείται σε μια πολύ συναρπαστική φάση. Από το 1996 σχεδόν 1.000.000 τόνοι ετησίως έχουν εγχυθεί στην δεξαμενή. Το

καλοκαίρι του 1999 μια νέα σεισμική έρευνα για την δεξαμενή (ταμειυτήρα) ολοκληρώθηκε. Τα αρχικά αποτελέσματα από αυτήν τη σεισμική έρευνα παρουσιάζουν την ακριβή θέση του CO<sub>2</sub> που έχει εγχυθεί μέσα στη δεξαμενή «Utsira». Αυτό είναι πολύ σημαντικό αποτέλεσμα για τη διεθνή κοινότητα. Θα βοηθήσει ώστε να αρχίζει να χτίζεται εμπιστοσύνη ότι η αποθήκευση του CO<sub>2</sub> είναι μια τεχνικά βιώσιμη και περιβαλλοντικά υγιής επιλογή, για να μπορέσει να μειωθεί ο αντίκτυπος της αλλαγής κλίματος.



Σχήμα 6.9. Οι πλατφόρμες του Sleipner

Πηγή: [www.spe.org](http://www.spe.org)

### 6.2.2. Η Εναπόθεση του CO<sub>2</sub> σε Υδάτινους Σχηματισμούς

Οι υδάτινοι σχηματισμοί είναι οι πιο κοινές δεξαμενές ρευστών στο υπέδαφος και τέτοιοι σχηματισμοί μεγάλου όγκου είναι διαθέσιμοι σχεδόν οπουδήποτε. Για την εναπόθεση, σχηματισμοί μεγάλου βάθους (>200 ft) που δε βρίσκονται υπό χρήση είναι οι λογικότεροι στόχοι. Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.2., κατάλληλοι σχηματισμοί μεγάλου βάθους, οι οποίοι συνήθως γεμίζουν με αλμυρό νερό, βρίσκονται σχεδόν παντού στις ΗΠΑ.

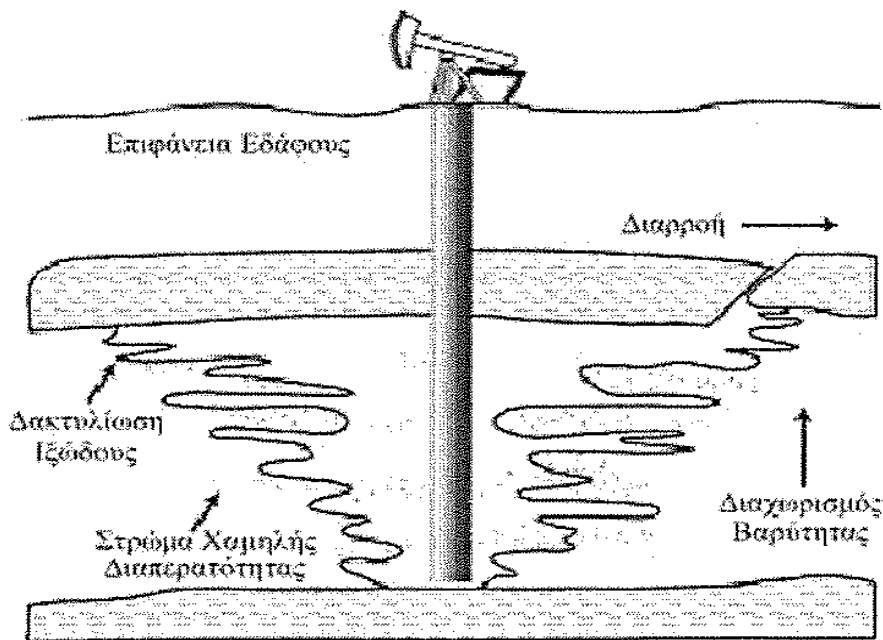
Αν και υπάρχει λίγη πρακτική εμπειρία σχετικά με την εναπόθεση άνθρακα στους υδάτινους σχηματισμούς, η αποθήκευση σε υδροφόρα στρώματα φυσικού αερίου αποτελεί τη βάση της εμπειρίας για τα σημαντικά τεχνικά ζητήματα. Επιπλέον, η εναπόθεση του CO<sub>2</sub> στα υδροφόρα στρώματα έχει συζητηθεί στην τεχνική βιβλιογραφία, από τις αρχές της δεκαετίας του '90. Η λειτουργική εμπειρία από την αποθήκευση αερίου σε υδροφόρα στρώματα και αυτές οι μελέτες, δείχνουν ότι από την άποψη της εφαρμοσμένης μηχανικής, τα κύρια ζητήματα για τη διάθεση του CO<sub>2</sub> στα υδροφόρα στρώματα, αφορούν: α) το ποσοστό διάθεσης του CO<sub>2</sub>, β) τη διαθέσιμη ικανότητα αποθήκευσης, γ) την παρουσία ενός πετρώματος χαμηλής διαπερατότητας και πιθανή διαρροή του CO<sub>2</sub>, δ) τον προσδιορισμό και χαρακτηρισμό των κατάλλη-



λων δομών υδροφόρων σχηματισμών και πετρωμάτων, ε) την αβεβαιότητα, λόγω της ελλιπούς γνώσης των συνθηκών και διαδικασιών στο υπέδαφος και στ) την αντίσταση στη διάβρωση των υλικών που χρησιμοποιούνται στα φρεάτια διάχυσης και τις σχετικές εγκαταστάσεις.

Η κύρια διαδικασία παγίδευσης που επηρεάζει την εναπόθεση του CO<sub>2</sub> στα υδροφόρα στρώματα είναι κατανοητή, τουλάχιστον υπό μια γενική έννοια. Η έγχυση του CO<sub>2</sub> σε έναν γεμάτο με ύδωρ σχηματισμό, οδηγεί στην αντικατάσταση μιας υδάτινης φάσης από μια λιγότερο πυκνή και λιγότερο ιξώδη φάση αερίου. Επειδή το CO<sub>2</sub> είναι διαλυτό στο ύδωρ, μερική ποσότητα του CO<sub>2</sub> θα διαλυθεί. Οι θερμοφυσικές ιδιότητες του ύδατος και του CO<sub>2</sub> που καθορίζουν τη συμπεριφορά ροής – όπως η πυκνότητα, το ιξώδες και η διαλυτότητα – είναι γνωστές, όπως είναι και η εξάρτησή τους από την πίεση, τη θερμοκρασία και την αλμυρότητα. Η ισορροπία διαλυτότητας του CO<sub>2</sub> στο ύδωρ μειώνεται από έναν παράγοντα 6, μεταξύ 10 και 150 °C και μειώνεται με την αλμυρότητα των υδροφόρων στρωμάτων («salting out»). Το ποσοστό στο οποίο το αερώδες CO<sub>2</sub> θα διαλυθεί στο ύδωρ εξαρτάται από το μέγεθος και τη μορφή των φάσεων και μπορεί να είναι αβέβαιο.

Η λήψη του CO<sub>2</sub> από το ύδωρ μπορεί να αυξηθεί πέρα από το ποσό που αποδίδεται στην φυσική διαλυτότητα, μέσω αλληλεπιδράσεων με τα μεταλλεύματα ανθρακικού άλατος. Μεταλλεύματα όπως ο «calcite» θα διαλύονταν, ως αποτέλεσμα της έγχυσης CO<sub>2</sub>. Μια αρκετά μεγαλύτερη αύξηση στην ικανότητα αποθήκευσης είναι δυνατή μέσω των ετερογενών αντιδράσεων με τα «aluminosilicates» (ορυκτή παγίδευση). Υπάρχουν ενδείξεις ότι η κινητική των αντιδράσεων με τα ανθρακικά άλατα μπορεί να είναι γρήγορη, ενώ η κινητική των αλληλεπιδράσεων πυριτικών αλάτων εμφανίζεται να είναι πολύ αργή, απαιτώντας δεκάδες ή εκατοντάδες έτη για ουσιαστική πρόοδο της αντίδρασης.



**Σχήμα 6.10.** Ο διαχωρισμός βαρύτητας, το ιξώδες «fingering», η ετερογένεια και η προνομιακή ροή μέσω των πετρωμάτων θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη μετανάστευση του CO<sub>2</sub> στο υπέδαφος.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
«Carbon Sequestration, State of the Science»

A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

**Πίνακας 6.3. Προτεραιότητες της έρευνας για την εναπόθεση του CO<sub>2</sub> σε υδάτινους σχηματισμούς.**

Βραχυπρόθεσμη Έρευνα & Ανάπτυξη (<2005)	Μεσοπρόθεσμη Έρευνα & Ανάπτυξη (2005-2010)	Μακροπρόθεσμη Έρευνα & Ανάπτυξη (>2010)
Διεξαγωγή ενός μικρής κλίμακας πιλοτικού προγράμματος έγχυσης CO <sub>2</sub> μέσα σε ένα ρηχό (<3000ft βάθους) υδροφόρο στρώμα ή αλατούχο σχηματισμό, για να οδηγηθούν οι προτεραιότητες της έρευνας	Κατανόηση της κινητικής της διάλυσης του CO <sub>2</sub> και της ορυκτής παγίδευσης	Συγκέντρωση δεδομένων κόστους και απόδοσης από ένα ολοκληρωμένο μεγάλης κλίμακας πρόγραμμα εναπόθεσης του CO <sub>2</sub> , από μια εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας σε έναν μεσαίου βάθους (2000- 5000 ft) αλατούχο σχηματισμό
Κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η αλληλεπίδραση της αστάθειας βαρύτητας, των δακτύλων ιξώδους και της ετερογένειας του σχηματισμού επηρεάζουν τη μετανάστευση του CO <sub>2</sub> στους υδάτινους σχηματισμούς	Κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η αύξηση της πίεσης λόγω της έγχυσης του CO <sub>2</sub> , επηρεάζει την ακεραιότητα του πετρώματος	Ανάπτυξη τεχνολογιών για μετρίασμό ή έλεγχο των διαρροών του CO <sub>2</sub>
Συνέχιση της εργασίας για την ολοκλήρωση των δεδομένων, ώστε να χαρακτηριστούν οι ποικίλες ιδιότητες των υδάτινων σχηματισμών	Ανάπτυξη συνδεδεμένων H-M-C-T (Hydrologic, Mechanical, Chemical, Thermal) προσομοιωτών για αξιολόγηση της βραχυ- και μακροπρόθεσμης αποτελεσματικότητας και ασφάλειας της εναπόθεσης	Διεξαγωγή αναπτυγμένων προγραμμάτων και τεχνολογιών για βελτίωση της αποτελεσματικότητας της εναπόθεσης
Καθιέρωση κριτηρίων διαλογής για επιλογή τοποθεσίας εναπόθεσης σε υδάτινους σχηματισμούς. Ένωση των πηγών CO <sub>2</sub> με τις πιθανές τοποθεσίες εναπόθεσης, χρησιμοποιώντας κριτήρια διαλογής	Κατανόηση της επιρροής των μικροβιακών αλληλεπιδράσεων στην αποτελεσματικότητα της παγίδευσης και στην μετατροπή του CO <sub>2</sub> σε άλλες μορφές άνθρακα	Ανάπτυξη απομακρυσμένων ή άλλων αποδοτικών μεθόδων για έλεγχο των διαρροών του CO <sub>2</sub>
Αξιολόγηση και ανάπτυξη, αν χρειάζεται, μεθόδων για αξιολόγηση της ακεραιότητας των πετρωμάτων	Αξιολόγηση της δυνατότητας για προκαλούμενη σεισμικότητα, η οποία συνδέεται με την έγχυση του CO <sub>2</sub>	
Ανάπτυξη μιας ανάλυσης ασφάλειας και τεχνικής στρατηγικής για το πρόγραμμα ενός «αποδεκτού» ποσοστού διαρροής	Κατανόηση των χαρακτηριστικών του ταμιευτήρα για την ελαχιστοποίηση των δυσμενών επιπτώσεων στην ακεραιότητα του πετρώματος, κατά τη διάρκεια της έγχυσης CO <sub>2</sub>	
Χρήση φυσικών ταμιευτήρων CO <sub>2</sub> για κατανόηση του τρόπου με τον οποίο μπορεί η μακροπρόθεσμη ορυκτή παγίδευση να συνεισφέρει στην μόνιμη εναπόθεση	Ανάπτυξη κατάλληλης τεχνικής βάσης για ρυθμιστικές οδηγίες	
	Ανάπτυξη μεθόδων για έλεγχο της μετανάστευσης του CO <sub>2</sub> και των υποπροϊόντων του στο υπέδαφος, χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό υδρολογικών, σεισμικών, ανιχνευτικών και μηχανικών μεθόδων (π.χ., μετρήσεις κλίσης)	Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science» A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

Επειδή το CO<sub>2</sub> είναι αρκετά αραιότερο και μικρότερου ιξώδους από το ύδωρ, η έγχυση CO<sub>2</sub> στα υδροφόρα στρώματα, πιθανών θα παρουσιάσει υδροδυναμικές αστάθειες. Η διαφορά ιξώδους θα οδηγήσει σε δακτύλους ιξώδους (viscous fingering) και η διαφορά πυκνότητας θα οδηγήσει σε διαχωρισμό βαρύτητας. Οι λεπτομέρειες της κάθε διαδικασίας θα εξαρτηθούν από τη χωρική διανομή της διαπερατότητας του σχηματισμού και από τα ποσοστά έγχυσης (σχήμα 6.10.). Η επίδραση αυτών των περιπλοκών μπορεί να είναι σημαντική για τον έλεγχο της σημασίας των τριών κύριων μηχανισμών παγίδευσης. Ο λεπτομερής χαρακτηρισμός αυτών των περιπλοκών θα είναι δύσκολος, αλλά μπορεί να μην είναι απαραίτητος για την επίτευξη των στόχων της εφαρμοσμένης μηχανικής.

Δύο βασικά ζητήματα διακρίνουν την εναπόθεση του CO<sub>2</sub> στα υδροφόρα στρώματα, από την εναπόθεση στους ταμειυτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου. Πρώτον, οι ταμειυτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου εμφανίζονται επειδή υπάρχει μια δομική ή στρατογραφική παγίδα. Αυτή η ίδια παγίδα είναι πιθανό να διατηρήσει το CO<sub>2</sub>. Η αναγνώριση τέτοιων αποτελεσματικών παγίδων μπορεί να είναι δυσκολότερη στους υδάτινους σχηματισμούς και μπορεί να απαιτεί νέες προσεγγίσεις για την καθιέρωση της ακεραιότητας και της έκτασης ενός πετρώματος. Δεύτερον, η έγχυση του CO<sub>2</sub> σε έναν υδάτινο σχηματισμό είναι απίθανο να συνοδευτεί από την αφαίρεση ύδατος από τον σχηματισμό. (Στην περίπτωση EOR, το πετρέλαιο αποσύρεται ταυτόχρονα, ενώ το CO<sub>2</sub> εγχέεται). Επομένως, η έγχυση θα οδηγήσει σε αύξηση της πίεσης του σχηματισμού, σε μια μεγάλη περιοχή. Το εάν ή μέχρι ποιο σημείο η πίεση μεγάλης κλίμακας θα έχει επιπτώσεις στην ακεραιότητα του πετρώματος, ή θα προκαλέσει παραμόρφωση της επιφάνειας του εδάφους και σεισμογένεση, πρέπει να κατανοηθεί καλύτερα, ώστε να σχεδιαστεί μια ασφαλής και αποτελεσματική εναπόθεση.

Ένα τελικό ζήτημα σχετικά με την εναπόθεση στους υδάτινους σχηματισμούς είναι το αποδεκτό ποσοστό διαρροής από τον σχηματισμό στα υπερκείμενα στρώματα. Η διαρροή του CO<sub>2</sub> μπορεί να μην είναι επικίνδυνη για την ασφάλεια και μπορεί, σε μερικές περιπτώσεις, να είναι επιθυμητή, εάν αυξάνει τη δυνατότητα για ενισχυμένη διαλυτότητα ή ορυκτή παγίδευση. Η αξιολόγηση των ποσοστών αποδεκτής διαρροής πρέπει να είναι μέρος μιας μακροπρόθεσμης στρατηγικής για την εναπόθεση του CO<sub>2</sub> σε υδάτινους σχηματισμούς.

Ο πίνακας 6.3. απαριθμεί τις συγκεκριμένες ερευνητικές ανάγκες, για την ανάπτυξη της τεχνολογίας και την αποδοχή της εναπόθεσης του CO<sub>2</sub> στους υδάτινους σχηματισμούς. Οι ανάγκες διαιρούνται σε βραχυ-, μεσό- και μακροπρόθεσμες προσπάθειες, οι οποίες μαζί, θα παρέχουν ένα περιεκτικό σύνολο ενεργειών που θα δημιουργήσει ένα σύνολο μεθόδων εναπόθεσης.

### 6.2.3. Ευκαιρίες για Εναπόθεση CO<sub>2</sub> σε Σχηματισμούς Άνθρακα

Οι σχηματισμοί άνθρακα παρέχουν μια ευκαιρία να διαχωριστεί το CO<sub>2</sub> και ταυτόχρονα να αυξηθεί η παραγωγή του φυσικού αερίου. Η παραγωγή μεθανίου από τα κοιτάσματα άνθρακα μεγάλου βάθους, μπορεί να ενισχυθεί με την έγχυση CO<sub>2</sub> στους σχηματισμούς άνθρακα, όπου η προσρόφηση του CO<sub>2</sub> προκαλεί την εκρόφηση του μεθανίου. Αυτή η διαδικασία έχει τη δυνατότητα να εναποθέσει μεγάλους όγκους του CO<sub>2</sub>, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνει την αποδοτικότητα και το κέρδος των εμπορικών διαδικασιών του φυσικού αερίου.

Αυτή η μέθοδος για ενισχυμένη «coal – bed» παραγωγή μεθανίου εξετάζεται αυτήν την περίοδο σε δύο περιοχές της Βορείου Αμερικής. Σε ένα πειραματικό πεδίο παραγωγής στο San Juan Basin (New Mexico και Colorado), έχουν εγχυθεί τρία εκα-

τομύρια  $\text{ft}^3 \text{CO}_2$  ημερησίως, μέσω τεσσάρων φρεατίων έγχυσης, κατά τη διάρκεια μιας τριετούς περιόδου. Τα αρχικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η πλήρης ανάπτυξη αυτής της διαδικασίας στο πεδίο, θα μπορούσε να οδηγήσει σε ανάκτηση μεθανίου περίπου 75%. Τα βασικά τεχνικά και εμπορικά κριτήρια για την επιτυχή εφαρμογή αυτού του προγράμματος, περιλαμβάνουν: α) ευνοϊκή γεωλογία, όπως πυκνός, διαποτισμένος με αέριο άνθρακας που θάβεται στα κατάλληλα βάθη και τοποθετείται σε απλές δομικές θέσεις, οι οποίες έχουν ικανοποιητική διαπερατότητα, β) διαθεσιμότητα του  $\text{CO}_2$ , όπως οι χαμηλού κόστους πιθανές «προμήθειες»  $\text{CO}_2$ , είτε από φυσικούς ταμιευτήρες, είτε από ανθρωπογενείς πηγές και γ) ζήτηση φυσικού αερίου, η οποία περιλαμβάνει μια αποδοτική αγορά για χρήση του μεθανίου, συμπεριλαμβανομένης της επαρκούς υποδομής σωληνώσεων και ευνοϊκές τιμές αερίου.

Μια δεύτερη πειραματική επίδειξη αυτού του προγράμματος βρίσκεται στην Alberta στον Καναδά. Το πρόγραμμα Alberta εξετάζει μια διαδικασία έγχυσης του  $\text{CO}_2$  μέσα σε ένα μεγάλο βάθος «coal – bed» της Alberta. Πολλά από τα αποθέματα άνθρακα της Alberta είναι πλούσια σε μεθάνιο. Η προκαταρκτική διαμόρφωση υπολογιστικών μοντέλων, δείχνει ότι οι επιλεγμένες τεχνικές γύρω από τα φρεάτια θα μπορούσαν να βελτιωθούν με μια ουσιαστική αύξηση του αρχικού μεθανίου. Οι αρχικές δραστηριότητες στο πεδίο αποτελούνται από έναν απλό έλεγχο του φρεατίου και είναι σχεδιασμένες για να μετρήσουν τις ιδιότητες των ταμιευτήρων, να αυξήσουν την αρχική παραγωγή και να αξιολογήσουν την ενισχυμένη ανάκτηση μεθανίου με  $\text{CO}_2$ .

Τα «ανθρακοφόρα» στρώματα περιλαμβάνουν και λεπτά και παχιά «coal seams» και ενδιάμεσα στρώματα ψαμμίτη και σχιστόλιθου και είναι συνήθως διαποτισμένα με ύδωρ. Αυτός ο περίπλοκος σχηματισμός καθορίζει τη δεξαμενή «coal – bed». Η στρωματογραφία κοιτασμάτων γαιάνθρακα (coal – bed) και η δομή / διαπερατότητα / πορώδες των ενδιάμεσων και υπερκείμενων στρωμάτων είναι συγκεκριμένων θέσεων και θα πρέπει να χαρακτηριστούν χωριστά. Αντίθετα από τους ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου, το μεθάνιο στα κοιτάσματα γαιάνθρακα διατηρείται μέσω προσρόφησης, παρά μέσω παγίδευσης κάτω από μια στεγανή υπερκείμενη παγίδα. Επομένως, η φύση των υπερκείμενων και παρακείμενων στρωμάτων γίνεται ένα σημαντικό ζήτημα για τη διατήρηση του  $\text{CO}_2$  μέσα στους ταμιευτήρες «coal – bed» έως ότου προσροφηθεί και τη διατήρηση του μετατοπισμένου μεθανίου μέχρι να μπορεί να αποσυρθεί. Τεχνικές για να ελεγχθεί η ικανότητα, η σταθερότητα και η μονιμότητα της αποθήκευσης του  $\text{CO}_2$  στους ταμιευτήρες «coal – bed», είναι αναγκαίες.

Ο πίνακας 6.4. απαριθμεί τις συγκεκριμένες ερευνητικές ανάγκες, για την ανάπτυξη της τεχνολογίας και την αποδοχή της εναπόθεσης του  $\text{CO}_2$  στους σχηματισμούς άνθρακα. Οι ανάγκες διαιρούνται σε βραχυ-, μεσό- και μακροπρόθεσμες προσπάθειες, οι οποίες μαζί, θα παρέχουν ένα περιεκτικό σύνολο ενεργειών που θα δημιουργήσει ένα σύνολο μεθόδων εναπόθεσης.

**Πίνακας 6.4. Προτεραιότητες της έρευνας για την εναπόθεση του CO<sub>2</sub> σε σχηματισμούς άνθρακα.**

Βραχυπρόθεσμη Έρευνα & Ανάπτυξη (<2005)	Μεσοπρόθεσμη Έρευνα & Ανάπτυξη (2005-2010)	Μακροπρόθεσμη Έρευνα & Ανάπτυξη (>2010)
Κατανόηση των διαδικασιών προσρόφησης-εκρόφησης, με τις οποίες το CO <sub>2</sub> αντικαθιστά το μεθάνιο στους σχηματισμούς άνθρακα	Ανάπτυξη εργαλείων μοντελοποίησης για ταυτόχρονη ροή υγρού, προσρόφηση-εκρόφηση αερίου, παραμόρφωση και δυναμική ροής αερίου στους ταμιευτήρες «coal-bed»	Συγκέντρωση δεδομένων κόστους και απόδοσης από ένα ολοκληρωμένο μεγάλης κλίμακας πρόγραμμα παραγωγής μεθανίου, παραγωγής ενέργειας και εναπόθεσης του CO <sub>2</sub>
Αξιολόγηση του απόλυτου και σχετικού πορώδους και διαπερατότητας της δομής των διάφορων ανθράκων και ταμιευτήρων «coal-bed», συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων διαστολής/ συστολής της ανταλλαγής του CO <sub>2</sub> – μεθανίου στην πίεση	Αξιολόγηση της αλληλεπίδρασης του άνθρακα με στοιχεία τα οποία βρίσκονται τυπικά στα αέρια σωλήνα, όπως θείο ή άζωτο	Ανάπτυξη τεχνολογιών και μεθόδων για έγχυση και παραγωγή σε χαμηλής διαπερατότητας και μεγάλου βάθους σχηματισμούς
Διεξαγωγή πιλοτικών προγραμμάτων με επαρκή έλεγχο, για να κατανοηθεί πώς η έγχυση CO <sub>2</sub> αυξάνει την παραγωγή μεθανίου από τα «coal-beds» και πώς το CO <sub>2</sub> προσροφάται από τον άνθρακα	Διεξαγωγή ενός πιλοτικού προγράμματος έγχυσης αερίων σωλήνα για να αξιολογηθεί η ικανότητα της προσρόφησης CO <sub>2</sub> στην επιφάνεια του άνθρακα, αντικαθιστώντας το μεθάνιο, καθώς το άζωτο απομακρύνει το μεθάνιο	Έλεγχος των αλληλεπιδράσεων του CO <sub>2</sub> , του μεθανίου και του άνθρακα στους κορεσμένους με νερό σχηματισμούς, για να αξιολογηθεί εάν είναι αναγκαία η απομάκρυνση του νερού πριν την έγχυση του CO <sub>2</sub>
Ανάπτυξη κριτηρίων ελέγχου του ταμιευτήρα για σκοπούς αξιολόγησης. Ένωση των πηγών CO <sub>2</sub> με τις πιθανές τοποθεσίες εναπόθεσης, χρησιμοποιώντας κριτήρια διαλογής	Δοκιμή του αντίκτυπου των διάφορων μεθόδων γεώτρησης (οριζόντια / κάθετη) στην έγχυση και την ικανότητα παραγωγής όλων των αερίων και υγρών φάσεων.	Έλεγχος της ικανότητας για εναπόθεση των διάφορων σχηματισμών άνθρακα για μεγάλο χρονικό διάστημα
Ανάπτυξη μηχανικής της έγχυσης και σχεδιαστικών τεχνικών για βελτιστοποίηση της εναπόθεσης του CO <sub>2</sub> και της παραγωγής μεθανίου στα «coal-beds»	Ανάπτυξη μεθόδων για έλεγχο της μετανάστευσης του CO <sub>2</sub> και των υποπροϊόντων του στο υπέδαφος, χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό υδρολογικών, σεισμικών, ανιχνευτικών και μηχανικών μεθόδων	
Κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η εξάπλωση των σεισμικών κυμάτων ανταποκρίνεται στην έγχυση του CO <sub>2</sub> , την προσρόφηση και την παραμόρφωση του άνθρακα.	Κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η αλληλεπίδρασεις μεταξύ των μικροοργανισμών, του CO <sub>2</sub> και της στερεάς μήτρας, επηρεάζει την μακροπρόθεσμη εναπόθεση	

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,

«Carbon Sequestration, State of the Science»

A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

### 6.3. Θεμελιώδεις Ερευνητικές Ανάγκες για τους Γεωλογικούς Σχηματισμούς

Οι λειτουργικές απαιτήσεις για την εναπόθεση σε κάθε έναν από τους τρεις τύπους γεωλογικών σχηματισμών, αξιολογήθηκαν ανεξάρτητα. Κοινές ανάγκες προέκυψαν για όλους τους σχηματισμούς, οι οποίες συνοψίζονται σε αυτό το τμήμα. Ε-

ντούτοις, υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην ωριμότητα της τεχνολογίας και στην επιστημονική κατανόηση των διαδικασιών οι οποίες υποστηρίζουν την εναπόθεση του CO<sub>2</sub> στους διαφορετικούς τύπους γεωλογικών σχηματισμών. Το σχήμα 6.11. εμφανίζει αυτές τις ομοιότητες και διαφορές.

### A) Μηχανισμοί Παγίδευσης του CO<sub>2</sub>

Οι υδροδυναμικές διαδικασίες και οι διαδικασίες διαλυτότητας που είναι υπεύθυνες για την παγίδευση του CO<sub>2</sub> στους γεωλογικούς σχηματισμούς είναι καλά κατανοητές, ειδικά πέρα από το διάστημα που συνδέεται με την EOR (<20 έτη). Η ορυκτή παγίδευση (δηλ., διαδικασίες που στηρίζονται στις χημικές αντιδράσεις μεταξύ του αερίου / υγρού και των στερεών φάσεων) είναι λιγότερο κατανοητή, ιδιαίτερα όσον αφορά το πόσο γρήγορα εμφανίζονται αυτές οι αντιδράσεις. Οι αντιδράσεις μεταξύ του CO<sub>2</sub> και των μικροβιακών κοινοτήτων που υπάρχουν σε γεωλογικούς σχηματισμούς μεγάλου βάθους, είναι επίσης ανεπαρκώς κατανοητές. Οι τομείς που απαιτούν περαιτέρω έρευνα, περιλαμβάνουν:

- Υδροδυναμική της μετανάστευσης του CO<sub>2</sub> στους ετερογενείς σχηματισμούς (π.χ., αποδοτικότητα της αντικατάστασης, ροή και ποσοστά διαρροής).
- Κινητική διάλυσης του CO<sub>2</sub>
- Κινητική ορυκτής παγίδευσης
- Μικροβιακές αλληλεπιδράσεις με το CO<sub>2</sub>
- Επιρροή των αλλαγών πίεσης στην ακεραιότητα του πετρώματος και του σχηματισμού
- Οι μη γραμμικές επεξεργασίες ανατροφοδότησης (π.χ., διάλυση του ορυκτού και καθίζηση, η οποία αλλάζει τη διαπερατότητα του πετρώματος)
- Η προσρόφηση / εναλλαγή συμπεριφοράς του μεθανίου από το CO<sub>2</sub> στα οργανικά υποστρώματα.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»  
A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

### B) Χαρακτηριστικά του Ρεύματος Αποβλήτων του CO<sub>2</sub>

Υψηλής καθαρότητας (>90% CO<sub>2</sub>), ξηρό ρεύμα αποβλήτων είναι το πιο επιθυμητό για εναπόθεση στους γεωλογικούς σχηματισμούς, βάσει κυρίως των εκτιμήσεων για τη μείωση όγκου, τις δαπάνες για τη συμπίεση του αερίου και τα ζητήματα διαχείρισης του CO<sub>2</sub> (π.χ., διάβρωση). Μελέτες του πεδίου χρειάζονται, για να αξιολογηθούν τα ευεργετικά ή καταστρεπτικά αποτελέσματα των χαρακτηριστικών του ρεύματος αποβλήτων στην αποδοτικότητα παγίδευσης, τα οικονομικά και την ασφάλεια της εναπόθεσης του CO<sub>2</sub>. Οι τομείς που πρέπει να ερευνηθούν περισσότερο, περιλαμβάνουν:

- Ανάλυση της επίδρασης των χαρακτηριστικών του ρεύματος αποβλήτων στην υδροδυναμική, τη διαλυτότητα και την αποτελεσματικότητα της ορυκτής παγίδευσης – προσρόφησης.
- Ανάλυση κόστους – κέρδους, για τον καθορισμό της βέλτιστης καθαρότητας του CO<sub>2</sub>



- Αξιολόγηση της επιρροής άλλων «μολυσματικών παραγόντων» (π.χ., υδράργυρος) στην ασφάλεια και τους ρυθμιστικούς περιορισμούς στην εναπόθεση του CO<sub>2</sub>

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»  
A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

Ταμειυτήρες Πετρελαίου και Αερίου					
Συνδυασμένη Χωρητικότητα	Σχετική Βιομηχανική Εμπειρία	Ενεργειακή Χρήση του CO <sub>2</sub>	Φυσικά Ανάλογα για Εναπόθεση	Ανάλυση Ασφάλειας & Κόστους	
Λειτουργικοί Οδηγοί					
Έλεγχος	Αξιολόγηση Απόδοσης και Πρόβλεψη	Τεχνολογία Έγξυσης, Εξόρυξης & Ολοκλήρωσης	Χαρακτηρισμός Σχηματισμού	Χαρακτηρ. Ρεύματος Αποβλήτων του CO <sub>2</sub>	Μηχανισμοί Παγίδευσης
Υδάτινοι Σχηματισμοί					
Συνδυασμένη Χωρητικότητα	Σχετική Βιομηχανική Εμπειρία	Ενεργειακή Χρήση του CO <sub>2</sub>	Φυσικά Ανάλογα για Εναπόθεση	Ανάλυση Ασφάλειας & Κόστους	
Λειτουργικοί Οδηγοί					
Έλεγχος	Αξιολόγηση Απόδοσης και Πρόβλεψη	Τεχνολογία Έγξυσης, Εξόρυξης & Ολοκλήρωσης	Χαρακτηρισμός Σχηματισμού	Χαρακτηρ. Ρεύματος Αποβλήτων του CO <sub>2</sub>	Μηχανισμοί Παγίδευσης
Σχηματισμοί Άνθρακα					
Συνδυασμένη Χωρητικότητα	Σχετική Βιομηχανική Εμπειρία	Ενεργειακή Χρήση του CO <sub>2</sub>	Φυσικά Ανάλογα για Εναπόθεση	Ανάλυση Ασφάλειας & Κόστους	
Λειτουργικοί Οδηγοί					
Έλεγχος	Αξιολόγηση Απόδοσης και Πρόβλεψη	Τεχνολογία Έγξυσης, Εξόρυξης & Ολοκλήρωσης	Χαρακτηρισμός Σχηματισμού	Χαρακτηρ. Ρεύματος Αποβλήτων του CO <sub>2</sub>	Μηχανισμοί Παγίδευσης

**Σχήμα 6.11.** Συγκριτική αξιολόγηση της τεχνολογικής και επιστημονικής ωριμότητας των λειτουργικών απαιτήσεων, για την εναπόθεση CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς. Το γκρι δείχνει ότι η τεχνολογική και επιστημονική κατανόηση είναι ώριμες. Το άσπρο δείχνει ότι κάποια εμπειρία είναι διαθέσιμη, αλλά περισσότερη απαιτείται για να αξιολογήσει και να βελτιώσει τις μεθόδους εναπόθεσης. Το μαύρο δείχνει ότι οι βασικές διαδικασίες, οι παράμετροι, οι τεχνολογίες και η κατανόηση των θεμελιωδών διαδικασιών πρέπει να βελτιωθούν σημαντικά, για να επιτευχθεί ικανοποιητικής κλίμακας γεωλογική εναπόθεση.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»  
A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

### Γ) Χαρακτηρισμός Σχηματισμού

Οι τρέχουσες προσπάθειες, σχετικές με την παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου και την αναβάθμιση υπόγειων υδάτων, έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη της

υδραυλικής και γεωφυσικής απεικόνισης και των γεωστατιστικών τεχνικών για τον χαρακτηρισμό της ετερογένειας των ιζηματοδών γεωλογικών σχηματισμών. Αυτά θα χρειαστούν για να προβλεφθεί η αποδοτικότητα της αντικατάστασης (sweep) στους υδάτινους σχηματισμούς. Οι πρόσθετες ανάγκες, ειδικά για την εναπόθεση περιλαμβάνουν:

- Χαρακτηρισμός του πετρώματος
- Προσδιορισμός της πορείας και των ποσοστών διαρροής
- Αξιολόγηση της υδρολογικής απομόνωσης, μέσω της χρήσης ισοτόπων και άλλων χημικών αναλύσεων
- Προσδιορισμός των ορυκτών «συναθροίσεων» που επηρεάζουν την ορυκτή παγίδευση και την ακεραιότητα του πετρώματος
- Καταπάτηση ύδατος (encroachment) στους σχηματισμούς από τους οποίους έχει εναποτεθεί το ύδωρ
- Διαχωρισμός ταμιευτήρων
- Αρχικές συνθήκες και εξέλιξη των ενώσεων και των δικτύων σπασίματος (fracture) από την πίεση και χημικά προκληθείσα παραμόρφωση.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
«Carbon Sequestration, State of the Science»

*A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)*

#### Δ) Έγχυση, Διάχυση και Τεχνολογία Ολοκλήρωσης Φρεατίων

Η έγχυση, η διάτρηση και η τεχνολογία ολοκλήρωσης για τη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, έχουν εξελιχθεί σε ένα ιδιαίτερα περίπλοκο στάδιο, έτσι ώστε σήμερα είναι δυνατό να διατρηθούν και να ολοκληρωθούν τα κάθετα, κεκλιμένα και οριζόντια φρεάτια στους σχηματισμούς μεγάλου βάθους και τα φρεάτια με πολλαπλές δυσκολίες κατασκευής, καθώς επίσης και να αντιμετωπιστούν τα διαβρωτικά ρευστά. Η βελτιστοποίηση αυτών, για την εναπόθεση του CO<sub>2</sub>, μπορεί να απαιτήσει μεθόδους βελτιστοποίησης της αποδοτικότητας της εναπόθεσης. Οι τομείς που πρέπει να ερευνηθούν εκτενέστερα, περιλαμβάνουν:

- Μεθόδους έγχυσης πρόσθετων ουσιών, για τον έλεγχο της κινητικότητας του CO<sub>2</sub>
- Προηγμένη τεχνολογία ολοκλήρωσης των φρεατίων για ενίσχυση της αποδοτικότητας της αντικατάστασης (sweep)
- Προσθήκη χημικών ή βιολογικών ουσιών για την ενίσχυση της ορυκτής παγίδευσης
- Ανάπτυξη και τοποθέτηση αισθητήρων, για τον έλεγχο της μετανάστευσης του CO<sub>2</sub>
- Τεχνολογίες έγχυσης για να περιοριστεί η μετανάστευση του CO<sub>2</sub> πέρα από τα σημεία έγχυσης και μέσω των διαρροών στο πέτρωμα

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
«Carbon Sequestration, State of the Science»

*A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)*

#### Ε) Αξιολόγηση της Απόδοσης

Οι πολυφασικοί, πολλών στοιχείων προσομοιωτές υπολογιστών της υπόγειας ροής ρευστού, έχουν αναπτυχθεί για τους ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερί-

ου, την αποθήκευση φυσικού αερίου, τη διαχείριση πηγών υπόγειου ύδατος και την επανάκτηση υπόγειων υδάτων. Η ακρίβεια αυτών των προσομοιωτών εξαρτάται, κυρίως, από την περιοχή και βελτιώνεται από τη συνεχή ρύθμιση παραμέτρων, πέρα από τη διάρκεια ζωής του προγράμματος. Η ανάπτυξη αξιόπιστων εργαλείων για την πρόβλεψη, αξιολόγηση και βελτιστοποίηση της εναπόθεσης του CO<sub>2</sub> θα απαιτήσει ένα παρόμοιο επίπεδο εμπειρίας, κάτω από πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Οι συγκεκριμένες πρόσθετες ανάγκες για την εναπόθεση του CO<sub>2</sub>, περιλαμβάνουν:

- Αντιδραστικούς κώδικες χημικής μεταφοράς με τις κινητικές πτώση – διάλυση και προσρόφηση – εκρόφηση
- Συνδεδεμένα Η – C – M (Υδρολογικά – Χημικά – Μηχανικά) πρότυπα για μακροχρόνιες συμπεριφορές και αξιολόγηση της προκληθείσας μικροσεισμικότητας

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»  
A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

## ΣΤ) Έλεγχος

Ο έλεγχος της μετανάστευσης του CO<sub>2</sub> στο υπέδαφος, απαιτείται για την μεγάλης κλίμακας εναπόθεση του CO<sub>2</sub>. Ο εντοπισμός της διανομής του παγιδευμένου CO<sub>2</sub> στις αεριώδεις, διαλυμένες και στερεές φάσεις, απαιτείται για την επιβεβαίωση απόδοσης και την ανίχνευση διαρροών. Οι υπάρχουσες μέθοδοι ελέγχου περιλαμβάνουν έλεγχο φρεατίων και έλεγχο πίεσης, ανιχνευτές, χημική δειγματοληψία και σεισμικές, ηλεκτρομαγνητικές και γεωχημικές μεθόδους της επιφάνειας και των γεωτρήσεων, όπως «tilt meters». Η χωρική και χρονική ανάλυση αυτών των μεθόδων, είναι δύσκολο να είναι ικανοποιητική για την επιβεβαίωση της απόδοσης και την ανίχνευση διαρροών. Οι ανάγκες περιλαμβάνουν:

- Υψηλής ευκρίνειας τεχνικές χαρτογράφησης, για την ανίχνευση της μετανάστευσης του CO<sub>2</sub> που έχει εναποτεθεί και των υποπροϊόντων του
- Έλεγχος παραμόρφωσης και μικροσεισμικότητας
- Τηλεπισκόπηση για τις διαρροές του CO<sub>2</sub> και την παραμόρφωση της επιφάνειας του εδάφους

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»  
A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

## Z) Θεμελιώδεις Ανάγκες Έρευνας

Διάφορα ζητήματα που πρέπει να εξεταστούν προκύπτουν για κάθε τύπο γεωλογικού σχηματισμού. Η νέα και βελτιωμένη κατανόηση αυτών των ζητημάτων, θα οδηγήσει σε ασφαλέστερη και οικονομικά αποδοτικότερη εναπόθεση του CO<sub>2</sub>. Μια εκτεταμένη συζήτηση των βασικών ερευνητικών αναγκών, μπορεί να βρεθεί στους Dove et al.

Πολυφασική μεταφορά στα ετερογενή και παραμορφώσιμα μέσα: ο διαχωρισμός βαρύτητας, οι δάκτυλοι ιξώδους (viscous fingering) και η ροή κατά μήκος των διαδρόμων υψηλής διαπερατότητας, θα διαδραματίσουν ένα κύριο ρόλο στη μετανάστευση του CO<sub>2</sub> στο υπέδαφος. Αυτές οι δυσκολίες θα συντεθούν με τις συνοδευτικές διαδικασίες προσρόφησης – εκρόφησης και τις διαδικασίες πτώσης – διάλυσης. Μια

καλύτερη θεμελιώδης κατανόηση απαιτείται για να προβλεφθεί η μετανάστευση του CO<sub>2</sub> και για να βελτιστοποιηθεί η αποδοτικότητα της αντικατάστασης (sweep) στους γεωλογικούς σχηματισμούς.

*Συμπεριφορά φάσης του CO<sub>2</sub> / του πετρελαίου / του ύδατος / των στερεών συστημάτων:* ο χωρισμός του CO<sub>2</sub> μεταξύ του ύδατος, του πετρελαίου, του αερίου και των στερεών φάσεων είναι σημαντικός για την κατανόηση των μηχανισμών παγίδευσης, καθώς επίσης και για την πρόβλεψη της CO<sub>2</sub> – EOR από τους σχηματισμούς πετρελαίου και της ενισχυμένης ανάκτησης αερίου από τους σχηματισμούς άνθρακα. Καλύτερη κατανόηση του διαχωρισμού του στερεού / ρευστού απαιτείται, ιδιαίτερα, για τη βελτιστοποίηση της ενισχυμένης ανάκτησης αερίου από τα προγράμματα «coal – bed» μεθανίου.

*Κινητική διάλυσης και αντίδρασης του CO<sub>2</sub>:* αν και οι κύριες διαβάσεις αντίδρασης μεταξύ του CO<sub>2</sub> και των ιζηματοδών σχηματισμών είναι σχετικά καλά κατανοητές, η κινητική της διάλυσης του CO<sub>2</sub> στην υγρή φάση και οι επόμενες αντιδράσεις πετρώματος – ύδατος, είναι αργές και ανεπαρκώς κατανοητές. Εάν η μετατροπή του CO<sub>2</sub> σε αυτές τις σταθερές ορυκτές φάσεις, πρόκειται να είναι ένα σημαντικό στοιχείο της εναπόθεσης στους υδάτινους σχηματισμούς, η κατανόηση της κινητικής αυτών των αντιδράσεων και των διαδικασιών που τις ελέγχουν είναι ουσιαστική.

*Μικρομηχανική και μοντελοποίηση παραμόρφωσης:* η παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου από τους γεωλογικούς σχηματισμούς και στη συνέχεια η εναπόθεση του CO<sub>2</sub>, θα συνοδεύονται από την παραμόρφωση του σχηματισμού του ταμιευτήρα. Η επιρροή της παραμόρφωσης στις υδραυλικές ιδιότητες του σχηματισμού και στην ακεραιότητα του πετρώματος, πρέπει να κατανοηθούν καλύτερα. Στους υδάτινους σχηματισμούς, αντίθετα από τους ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου, όπου η έγχυση του CO<sub>2</sub> συνοδεύεται από την απόσυρση των ρευστών, η παραμόρφωση είναι πιθανό να διαδοθεί καθώς η πίεση αυξάνεται στον σχηματισμό. Τα αποτελέσματα της παραμόρφωσης στην ακεραιότητα του πετρώματος και στην ικανότητά του να προκαλέσει σεισμικά γεγονότα, πρέπει να κατανοηθούν καλύτερα για να εξασφαλιστεί η μακροπρόθεσμη σταθερότητα και ασφάλεια της εναπόθεσης του CO<sub>2</sub>.

*Συνδεδεμένες H – M – C – T (Υδρολογικές – Μηχανικές – Χημικές – Θερμικές) διαδικασίες και μοντελοποίηση:* η ακριβής πρόβλεψη, αξιολόγηση, βελτιστοποίηση και επιβεβαίωση της εκτέλεσης ενός προγράμματος εναπόθεσης, απαιτεί ένα ακριβές συνδεδεμένο πρότυπο όλων των διαδικασιών που επηρεάζουν την απόδοση και την ασφάλεια. Ενώ μεγάλη εμπειρία έχει αποκτηθεί στην υπεδάφια προσομοίωση, από τη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου και από τις βιομηχανίες διαχείρισης και ανάκτησης υπόγειων υδάτων, έχει φανεί ότι η ποιότητα των προβλέψεων εξαρτάται έντονα από τη σύνδεση ενός προσομοιωτή για κάθε εφαρμογή. Οι προσομοιωτές που προσαρμόζονται στις συγκεκριμένες φυσικές και χημικές διαδικασίες, οι οποίες είναι σημαντικές για την εναπόθεση του CO<sub>2</sub>, πρέπει να αναπτυχθούν, να εξεταστούν, να βαθμολογηθούν και να αναβαθμιστούν μέσω της λειτουργικής εμπειρίας.

*Υψηλής ευκρίνειας γεωφυσική απεικόνιση:* η υψηλής ευκρίνειας γεωφυσική απεικόνιση προσφέρει την καλύτερη δυνατότητα για τον οικονομικώς αποδοτικό έλεγχο της μετανάστευσης και του σχηματισμού υποπροϊόντων του CO<sub>2</sub> στα υπεδάφια περιβάλλοντα. Οι τριών και τεσσάρων διαστάσεων εικόνες των γεωλογικών δομών και των ρευστών των πόρων, μπορούν να δημιουργηθούν με επιφανειακές και γεωτρητικές τεχνικές. Η ανάλυση πρέπει να βελτιωθεί, εάν πρόκειται να βασιστεί σε αυτές τις μεθόδους για την ανίχνευση της διαρροής του πετρώματος, τον σχηματισμό των ιξωδών δακτύλων και των προνομιακών διαβάσεων (προτιμώμενη πορεία ροής).

## 6.4. Προηγμένες Έννοιες για Εναπόθεση στους Γεωλογικούς Σχηματισμούς

Οι τεχνικές εναπόθεσης που περιγράφηκαν, απέχουν από τις τρέχουσες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται από τη βιομηχανία για την παραγωγή πετρελαίου, φυσικού αερίου και «coal – bed» μεθανίου και για την αποθήκευση του φυσικού αερίου. Αν και αυτές οι τεχνικές παρέχουν λογικές βραχυπρόθεσμες επιλογές για την εναπόθεση του CO<sub>2</sub>, η ενισχυμένη τεχνολογία για την εναπόθεση του CO<sub>2</sub> στους γεωλογικούς σχηματισμούς μπορεί να μειώσει σημαντικά τις δαπάνες, να αυξήσει την ικανότητα, να ενισχύσει την ασφάλεια ή να αυξήσει τις ευεργετικές χρήσεις της έγχυσης του CO<sub>2</sub>. Τέτοιες ενισχυμένες τεχνολογίες περιλαμβάνουν:

- *Ενισχυμένη ορυκτή παγίδευση με καταλύτες ή άλλες χημικές πρόσθετες ουσίες.* Η μετατροπή του CO<sub>2</sub> σε σταθερά μεταλλεύματα ανθρακικού άλατος αναμένεται να είναι πολύ αργή, κάτω από τα τρέχοντα σενάρια που υπάρχουν για την εναπόθεση στους γεωλογικούς σχηματισμούς. Ο προσδιορισμός των χημικών ή βιολογικών πρόσθετων ουσιών που αυξάνουν τα ποσοστά αντίδρασης, θα μπορούσε να ενισχύσει την αποτελεσματικότητα της ορυκτής παγίδευσης.
- *Εναπόθεση σε σύνθετους σχηματισμούς.* Οι πολυστρωματικοί σχηματισμοί μπορούν να οδηγήσουν σε ιδιαίτερα διασκορπισμένους όγκους του CO<sub>2</sub>. Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός διασποράς, τόσο μεγαλύτερη είναι η ευκαιρία για αποδοτική διαλυτότητα και ορυκτή παγίδευση. Η ανάπτυξη των κριτηρίων, τα οποία παίζουν ρόλο για την αποδεκτή διαρροή στους πολυστρωματικούς σχηματισμούς, θα μπορούσε να αυξήσει τη γεωγραφική διανομή και ικανότητα των γεωλογικών σχηματισμών για εναπόθεση του CO<sub>2</sub>.
- *Μικροβιακή μετατροπή του CO<sub>2</sub> σε μεθάνιο.* Μικροοργανισμοί που παράγουν μεθάνιο από το CO<sub>2</sub> (methanogens) είναι γνωστό ότι υπάρχουν σε μια ευρεία ποικιλία σχηματισμών μειωμένου οξυγόνου. Εάν οι περιοχές εναπόθεσης μπορούσαν να επιλεγθούν για να εκμεταλλευτούν αυτήν τη φυσικά εμφανιζόμενη διαδικασία, θα μπορούσε να δημιουργηθεί ένα υπόγειο «εργοστάσιο μεθανίου». Εναλλακτικά, οι πρόσθετες ουσίες που υποκινούν τη μεθανογένεση, θα μπορούσαν να εγχυθούν μαζί με το CO<sub>2</sub> για να προωθήσουν τον σχηματισμό μεθανίου.
- *Επαναχρησιμοποίηση των εξαντλημένων ταμιευτήρων πετρελαίου.* Η έγχυση του CO<sub>2</sub> στους ενεργούς ταμιευτήρες πετρελαίου είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική EOR. Εντούτοις, ακόμα και μετά τη διαδικασία EOR δεν είναι πλέον οικονομικά εφικτό τουλάχιστον το 50% του αρχικού πετρελαίου, το οποίο και μπορεί να αφηθεί στο υπέδαφος. Η έγχυση του CO<sub>2</sub>, η οποία ακολουθείται από μια ήρεμη περίοδο κατά τη διάρκεια της οποίας ο σχηματισμός ανακατανέμει το αέριο και τις υγρές φάσεις, μπορεί να επαναχρησιμοποιήσει τον σχηματισμό πετρελαίου ο οποίος δε μπορεί πλέον να παράγει οικονομικά.
- *Ενισχυμένη παραγωγή ένυδρων ουσιών μεθανίου από CO<sub>2</sub>.* Οι ένυδρες ουσίες μεθανίου στα ωκεάνια ιζήματα κρατούν τεράστια αποθέματα φυσικού αερίου. Η παραγωγή αερίου από αυτούς τους σχηματισμούς παραμένει μια πρόκληση, λόγω της σύνθετης δομής, των μηχανικών ιδιοτήτων και της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς των ένυδρων ουσιών. Η έγχυση του CO<sub>2</sub> στους σχηματισμούς ένυδρων ουσιών μεθανίου, μπορεί να ενισχύσει την παραγωγή, εναποθέτοντας ταυτόχρονα το CO<sub>2</sub>.

## 6.5. Γενικές Προτεραιότητες της Έρευνας

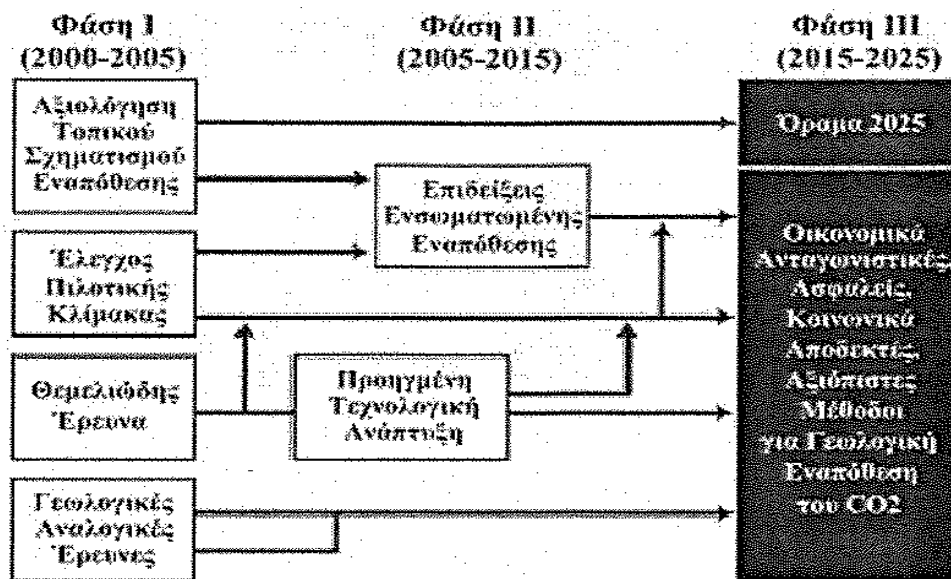
Η γεωλογική εναπόθεση είναι μοναδική, μεταξύ των μεθόδων για εναπόθεση του CO<sub>2</sub>, λόγω της εκτενούς εμπειρίας από τις σχετικές βιομηχανίες: παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου, διαχείριση των πηγών υπόγειων υδάτων και επανάκτηση υπόγειων υδάτων. Εντούτοις, ένας αριθμός από σημαντικές ανάγκες πρέπει να καλυφθεί, ώστε να γίνει ο γεωλογικός σχηματισμός μια οικονομική και ασφαλής μέθοδος για εναπόθεση του CO<sub>2</sub>. Το σχήμα 6.12. παρέχει τη σύνθεση και τη χρονική σειρά, ενός βασικού συνόλου ενεργειών που απαιτούνται για να επιταχυνθεί η ανάπτυξη ενός συνόλου μεθόδων, για την εναπόθεση του CO<sub>2</sub> στους γεωλογικούς σχηματισμούς. Οι βραχυπρόθεσμες ανάγκες τροφοδοτούν τα πιο μακροπρόθεσμα προγράμματα. Μαζί αυτά θα παράσχουν μια ρεαλιστική αξιολόγηση και στοιχεία δαπανών και απόδοσης για την μεγάλης κλίμακας εναπόθεση του CO<sub>2</sub> στους γεωλογικούς σχηματισμούς. Αυτές οι ενέργειες περιλαμβάνουν τα ακόλουθα ζητήματα:

1. Πρέπει να υπάρξει μια αξιόπιστη αξιολόγηση των διαθέσιμων γεωλογικών σχηματισμών για εναπόθεση του CO<sub>2</sub>, για κάθε μια από τις σημαντικότερες, από άποψη παραγωγής ενέργειας, περιοχές των ΗΠΑ. Τα κριτήρια διαλογής για την επιλογή των κατάλληλων μεθόδων πρέπει να αναπτυχθούν σε συνεργασία με τη βιομηχανία, την επιστημονική κοινότητα, το κοινό και τις ρυθμιστικές αντιπροσωπείες.
2. Πρώτοι πειραματικοί έλεγχοι της γεωλογικής εναπόθεσης, θα βοηθούσαν στην ανάπτυξη στοιχείων κόστους και απόδοσης και στην απόδοση προτεραιότητας στις μελλοντικές ερευνητικές ανάγκες. Αυτές οι πειραματικές δοκιμές πρέπει να σχεδιαστούν και να διευθυνθούν με ικανοποιητική παρακολούθηση, διαμόρφωση και αξιολόγηση της απόδοσης, ώστε να επιτραπεί η ποσοτική αξιολόγηση των υπεύθυνων για τη γεωλογική εναπόθεση διαδικασιών.
3. Γεωλογικά ανάλογα, όπως οι ταμειυτήρες του CO<sub>2</sub> και τα υδροφόρα στρώματα πλούσια σε CO<sub>2</sub>, πρέπει να μελετηθούν για να καθοριστούν οι παράγοντες που οδηγούν στην ακεραιότητα του πετρώματος και στους μηχανισμούς ορυκτής παγίδευσης.
4. Βασική έρευνα απαιτείται, για να βοηθήσει την κατανόηση των σημαντικών διαδικασιών και των παραμέτρων που θα συμβάλουν στην ασφαλή και αποτελεσματική εναπόθεση του CO<sub>2</sub>.
5. Προηγμένες τεχνολογίες απαιτούνται για: α) την αύξηση του όγκου του γεωλογικού σχηματισμού που γεμίζει από το CO<sub>2</sub>, β) τη δημιουργία σταθερών μακροπρόθεσμων δεξαμενών (σταθερές ορυκτές συναθροίσεις), γ) την αύξηση της διαλυτότητας και ίσως της αραιώσης του CO<sub>2</sub> στα αποδεκτά επίπεδα και δ) την ανίχνευση της μετανάστευσης του CO<sub>2</sub> στο υπέδαφος.
6. Τα πλήρης κλίμακας προγράμματα επίδειξης που εκτελούνται σε συνεργασία με τη βιομηχανία, τα οποία ενσωματώνουν τον διαχωρισμό και τη μεταφορά του CO<sub>2</sub> με τη γεωλογική εναπόθεση, χρειάζονται για να παράσχουν τα στοιχεία κόστους, ασφάλειας και απόδοσης της γεωλογικής εναπόθεσης του CO<sub>2</sub>.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
«Carbon Sequestration, State of the Science»

*A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)*





**Σχήμα 6.12.** Η σύνθεση και η χρονική σειρά, ενός βασικού συνόλου ενεργειών που απαιτούνται για την εναπόθεση του CO<sub>2</sub> στους γεωλογικούς σχηματισμούς.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»

A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

## 7. ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ

Οι προηγμένες βιολογικές τεχνολογίες θα αυξήσουν ή θα βελτιώσουν τις φυσικές βιολογικές διαδικασίες για την εναπόθεση άνθρακα από την ατμόσφαιρα στα χερσαία φυτά, τα υδρόβια φωτοσυνθετικά είδη, το έδαφος και άλλες μικροβιακές κοινότητες. Αυτές οι τεχνολογίες καλύπτουν τη χρήση νέων οργανισμών και σχεδιάζουν βιολογικά συστήματα και γενετικές βελτιώσεις στον μεταβολισμό των χερσαίων και υδάτινων μικροβίων, φυτών και ζωικών ειδών. Αυτή η στρατηγική μπορεί να ολοκληρωθεί με ανάπτυξη:

- Ταχύτερα αναπτυσσόμενων, υγιέστερων και περισσότερο ανθεκτικών στην πίεση καλλιεργειών και φυτών
- Καλύτερης κατανόησης της βιολογικής ποικιλομορφίας, της γενετικής και των διαδικασιών
- Τρόπων ενίσχυσης ή μεγιστοποίησης της γεωλογικής εναπόθεσης του άνθρακα, μέσω χρήσης μικροοργανισμών
- Τρόπων ενίσχυσης της εναπόθεσης του άνθρακα στα ωκεάνια συστήματα, μέσω του γενετικού χειρισμού των μελών της τροφικής αλυσίδας
- Εναλλακτικών μικροβιακών πολυμερών ή γενετικά βελτιωμένων φυτών, ως ανθεκτικά υλικά

Πηγή: *U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»*

*A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)*

Η ενισχυμένη βιολογική σταθεροποίηση του άνθρακα αυξάνει σημαντικά την εναπόθεσή του, χωρίς ανάληψη δαπανών για τον διαχωρισμό, την κατακράτηση και τη συμπίεση. Οι υψηλότερες περιβαλλοντικές συγκεντρώσεις του CO<sub>2</sub> αυξάνουν τη βιολογική σταθερότητα του άνθρακα. Αλλά η προκύπτουσα βιομάζα έχει γενικά υψηλότερη περιεκτικότητα σε υδατάνθρακα και χαμηλότερη σε «lignin». Κατά συνέπεια, αυξανόμενο φωτοσυνθετικό είναι παγιδευμένο στο υποβιβασμένο υλικό.

Η φωτοσύνθεση είναι μια καλά κατανοητή διαδικασία. Είναι αρμόδια, ουσιαστικά, για όλη τη σταθεροποίηση του CO<sub>2</sub> στη φύση. Η φυσικά εμφανιζόμενες μη – φωτοσυνθετικές μικροβιακές διαδικασίες είναι, επίσης, σε θέση να μετατρέψουν το CO<sub>2</sub> σε χρήσιμες μορφές, όπως το μεθάνιο και το οξικό άλας.

Η γενετική μηχανική μπορεί να αυξήσει την εναπόθεση άνθρακα, με την ανάπτυξη νέων ανθεκτικών προϊόντων, τα οποία δεν θα καταναλώνονται με απελευθέρωση του CO<sub>2</sub>. Επιπλέον, η εδαφολογική εναπόθεση μπορεί να αυξηθεί με αλλαγή της δομής των φυτών, για να ενισχυθεί η εναπόθεση του άνθρακα στο έδαφος. Τα νέα είδη φυτών θα είχαν ένα υψηλότερο ποσοστό βιομάζας στη ρίζα τους, θα ήταν ανθεκτικά στην αποσύνθεση, θα προωθούσαν τον σχηματισμό μεταλλευμάτων ανθρακικού άλατος και θα αλληλεπιδρούσαν με τα εδαφολογικά μικρόβια για να βελτιστοποιήσουν την ανακύκλωση των θρεπτικών ουσιών των φυτών. Διαδοχικά, η δομή και / ή σύνθεση της υπέργεια βιομάζας των φυτών, συμπεριλαμβανομένων των κυτταρικών τοιχωμάτων, θα μπορούσε να αλλάξει για να διευκολύνει τις διαδικασίες βιομετατροπής των φυτών και για να καταστήσει τη μη – συγκομισμένη βιομάζα λιγότερο διασπασίμη στο περιβάλλον. Τα μεταβολικά δίκτυα των φυτών και των φυκιών θα μπορούσαν, επίσης, να αλλάξουν ώστε να προσθέσουν ένα αυξανόμενο ποσοστό φωτοσυνθετικού στα επιθυμητά προϊόντα.

Οι τέσσερις θεματικές περιοχές που περιλαμβάνουν τις προηγμένες βιολογικές τεχνολογίες για την εναπόθεση του άνθρακα είναι: η τεχνολογία κατακράτησης του

άνθρακα, η εναπόθεση σε ενώσεις μειωμένου άνθρακα, η αύξηση της παραγωγικότητας των φυτών και τα εναλλακτικά ανθεκτικά υλικά. Αυτά εφαρμόζονται αντίστοιχα στα χερσαία, γεωλογικά, υπεδάφια και ωκεάνια περιβάλλοντα.

## 7.1. Τεχνολογική Υποστήριξη για την Κατακράτηση του Άνθρακα

Η δυνατότητα χρησιμοποίησης των προηγμένων βιολογικών διαδικασιών για την κατακράτηση και τη μείωση ή εναπόθεση του άνθρακα από βιομηχανικές διεργασίες είναι κατά ένα μεγάλο μέρος θεωρητικές. Ωστόσο, τα κίνητρα για την ανάπτυξη αυτών των διαδικασιών είναι σημαντικά, επειδή βασίζονται σε φυσικά εμφανιζόμενες βιολογικές διαδικασίες, οι οποίες δεν απαιτούν καθαρά (ή συγκεντρωμένα) ρεύματα CO<sub>2</sub>, για να εφαρμοστούν αποτελεσματικά. Πρόσθετη έρευνα θα απαιτηθεί για να καθοριστεί η τεχνική και οικονομική δυνατότητα πραγματοποίησης αυτών των προσεγγίσεων, για τα επίγεια, γεωλογικά και ωκεάνια συστήματα. Οι προηγμένες βιολογικές διαδικασίες έχουν τη δυνατότητα, να μειώσουν τις ενεργειακές δαπάνες, να μειώσουν την ανάγκη για χημική επεξεργασία, να αυξήσουν την ανακύκλωση του άνθρακα και να μειώσουν τη χρήση των απολιθωμένων καυσίμων.

Σήμερα, οι εγκαταστάσεις λυμάτων επηρεάζονται από τις αλλαγές της δυναμικής της κοινότητας, λόγω της παραγωγής νέων τύπων αποβλήτων από τις εγκαταστάσεις βιοτεχνολογίας και την τεχνολογία των τσιπ. Οι μηχανικοί, μόλις τώρα αρχίζουν να συνεργάζονται πιο στενά με τους μικροβιολόγους, τους φυσιολόγους και τους μοριακούς βιολόγους για καλύτερο έλεγχο των αλλαγών στη μικροβιακή ποικιλομορφία και τον μικροβιακό μεταβολισμό, τα οποία απαιτούν νέα παραδείγματα για αποτελεσματικότερη διαχείριση των υγρών αποβλήτων.

Οι μικροβιολόγοι και γεωμικροβιολόγοι ερευνητές του υπεδάφους είχαν αύξηση της χρηματοδότησης για τον χαρακτηρισμό και τον έλεγχο των μικροοργανισμών που κατοικούν στα πετρώματα. Μέσω της χρήσης μοριακών ελέγχων, οι επιστήμονες έχουν αρχίσει να κατανοούν πώς λειτουργούν αυτοί οι πληθυσμοί σε έναν κόσμο όπου μπορεί να υπάρχουν περιορισμένες πηγές άνθρακα για ενέργεια. Μέσω αυτών των μελετών, οι ερευνητές έχουν γενετικά προσδιορίσει και σε μερικές περιπτώσεις, έχουν απομονώσει νέους μικροοργανισμούς που εξαρτώνται από μη ανθρακικές πηγές ενέργειας. Αυτές οι μελέτες θέτουν τα θεμέλια για τις μελέτες της μικροβιακής εναπόθεσης άνθρακα και των εναλλακτικών πηγών ενέργειας.

### A) Ενεργειακά Πλέγματα (*energyplexes*)

Λόγω των υψηλών ενεργειακών απαιτήσεων που συνδέονται με τις τρέχουσες τεχνολογίες για την κατακράτηση και τον διαχωρισμό στις πηγές καύσης με ρεύματα χαμηλής συγκέντρωσης σε CO<sub>2</sub>, ο συνδυασμός της ενεργειακής παραγωγής και της κατακράτησης του άνθρακα θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά το κόστος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί καλύτερα με την ανάπτυξη της μεθόδου των ενεργειακών πλεγμάτων σε συνδυασμό με τις βιολογικές διαδικασίες (National Laboratory Directors 1997). Οι βιολογικές διαδικασίες συνδυασμένες με τα ενεργειακά πλέγματα θα μπορούν να παράγουν ενέργεια, να επεξεργάζονται απόβλητα, να εναποθέσουν τον άνθρακα και να παράγουν χρήσιμα τελικά προϊόντα. Ο συνδυασμός τους σε μια περιοχή, θα ελαχιστοποιούσε τις δαπάνες μεταφοράς, την πιθανότητα περιβαλλοντικής καταστροφής και θα μεγιστοποιούσε την παραγωγή.

Η επεξεργασία αποβλήτων που συνδέεται με τα υλικά οδόστρωσης, τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, ή ακόμα και την απελευθέρωση αποβλήτων σε ύδατα παράγει σημαντικές ποσότητες CO<sub>2</sub> και άλλων αερίων θερμοκηπίου (ειδικά μεθάνιο) από σταθερό άνθρακα. Αυτός ο άνθρακας αντιπροσωπεύει μια πιθανή πηγή ανανεώσιμης ενέργειας. Μέθοδοι μοριακής βιολογίας θα μπορούσαν να υιοθετηθούν για να επιβραδύνουν τα ποσοστά αποσύνθεσης των στερεών αποβλήτων στα υλικά οδόστρωσης. Επιπλέον, οι μέθοδοι της βιομηχανικής τεχνολογίας για παγίδευση, διαχωρισμό και ανακύκλωση του CO<sub>2</sub> και του μεθανίου που αποτελούν προϊόντα αποσύνθεσης των υλικών οδόστρωσης και των εγκαταστάσεων επεξεργασίας των λυμάτων πρέπει να βελτιωθεί.

Η επεξεργασία των λυμάτων έχει ως σκοπό να αποστειρώσει τα απόβλητα και να μειώσει την ποσότητα του άνθρακα που περιέχουν, πριν την τελική τους απόθεση. Κατά συνέπεια, ένας λογικός στόχος της επεξεργασίας των λυμάτων είναι η παραγωγή του CO<sub>2</sub>. Το περισσότερο CO<sub>2</sub> παράγεται κατά το αερόβιο στάδιο της επεξεργασίας. Μια μετατόπιση της αναερόβιας ζύμωσης θα μπορούσε να μειώσει τις εκπομπές. Τροποποίηση της επεξεργασίας των λυμάτων κατά αυτόν τον τρόπο, μέσω συνδυασμού των φυσικών και γενετικών παραγόντων, θα μπορούσε να παράγει περισσότερο μεθάνιο για να ικανοποιηθεί η απαίτηση σε καύσιμα της λειτουργίας της εγκατάστασης και θα μπορούσε να παράγει ένα τελικό προϊόν υψηλού άνθρακα, για χρήση στη γεωργία.

Μειώσεις των εκπομπών του CO<sub>2</sub> θα μπορούσαν να προέλθουν από την αποδοτικότερη λειτουργία των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων και των υλικών οδόστρωσης και την ενσωμάτωση των υγρότοπων στις διαδικασίες επεξεργασίας αποβλήτων. Προσοχή πρέπει να δοθεί στην ενσωμάτωση αυτών των εγκαταστάσεων με τα ενεργειακά πλέγματα, ώστε να παρέχουν τον άνθρακα και τις θρεπτικές ουσίες για άλλες βιολογικές διαδικασίες (π.χ. παραγωγή πετρωμάτων ανθρακικού άλατος με οργανισμούς που μειώνουν τις μεταλλικές ουσίες, παραγωγή βιομάζας από τα άλγη).

Τα προγράμματα ενεργειακών πλεγμάτων περιλαμβάνουν την ανακύκλωση του CO<sub>2</sub> σε απόβλητα αερίων σωλήνα από μια εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας μέσω της φωτοσύνθεσης, για να παράγει ένα απόθεμα μειωμένου άνθρακα υπό μορφή φυκώδους βιομάζας. Το απόθεμα μπορεί να πάρει τη μορφή πολυσακχαριτών ή τριγλυκεριδίων, τα οποία είναι εύκολα χρησιμοποιούμενα καύσιμα, ή τη μορφή χημικών αερίων πετροχημικής βιομηχανίας για τις διαδικασίες βιομετατροπής. Αν και πρόσθετα προγράμματα αναμφισβήτητα πρέπει να αναπτυχθούν, οι αρχικές προσπάθειες είναι πιθανό να εστιάσουν σε διάφορους ερευνητικούς τομείς, συμπεριλαμβανομένης της ενσωμάτωσης της αρχικής παραγωγής που χρησιμοποιεί απόβλητα CO<sub>2</sub> και θερμότητα. Αυτά τα ενεργειακά πλέγματα θα μπορούσαν να ωφεληθούν από την ενσωμάτωση της επεξεργασίας των λυμάτων ή άλλων αποβλήτων, επειδή οι θρεπτικές ουσίες και ο άνθρακας θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στις βιολογικές διαδικασίες. Εξαιτίας του εποχιακών, εδαφικών, και υδατολογικών περιορισμών, αυτή η εναλλακτική λύση μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε συγκεκριμένες τοποθεσίες ή εξειδικευμένες καταστάσεις.

Ένας τομέας στον οποίο έχει εστιάσει η έρευνα κατά το παρελθόν είναι η αύξηση των αλγών για παραγωγή καυσίμων. Οι προηγούμενες έρευνες είχαν επικεντρωθεί στην αντικατάσταση του Diesel (biodiesel). Επιπλέον, η παραγωγή του υδρογόνου και άλλων χημικών αερίων πετροχημικής βιομηχανίας που χρησιμοποιεί τα άλγη, αξίζει επιπρόσθετης έρευνας. Μερικά άλγη μπορούν να καλλιεργηθούν σε αλατούχα ή αλκαλικά ύδατα, τα οποία είναι διαθέσιμα στις νοτιοδυτικές έρημους, όπου η έκταση του εδάφους είναι σχετικά άφθονη. Αυτή η εναλλακτική λύση μπορεί να

περιοριστεί από τις δαπάνες της προετοιμασίας των υδάτων, της έγχυσης του CO<sub>2</sub> και της φυκώδους συγκομιδής.

*Ενεργειακά Πλέγματα για Συμβατικές Συγκομιδές.* Μια πρόσθετη πιθανή επιλογή, είναι να χρησιμοποιηθεί το CO<sub>2</sub> και η θερμότητα των αποβλήτων, για να προωθηθεί η αύξηση των συμβατικότερων γεωργικών συγκομιδών. Η χρήση του CO<sub>2</sub> μπορεί να οδηγήσει σε αυξήσεις της παραγωγικότητας των φυτών, σε εφαρμογές που γίνονται σε υγρότοπους. Πιλοτικά προγράμματα βρίσκονται σε εξέλιξη για την υλοποίηση αυτού του σχεδίου.

## *B) Γεωλογικά συστήματα*

Η βιολογική μετατροπή του CO<sub>2</sub> σε αδιάλυτο πέτρωμα ανθρακικού άλατος, όπως το FeCO<sub>3</sub> – χρησιμοποιώντας βακτήρια που μειώνουν τις μεταλλικές ουσίες και τέφρα η οποία περιέχει μεταλλικές ουσίες ή άλλα χαμηλής αξίας προϊόντα – είναι τεχνικά εφικτή. Εάν ο σίδηρος είναι άφθονος και διαθέσιμος, τότε μπορεί να διαμορφωθεί το FeCO<sub>3</sub>. Αυτά τα υλικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε δρόμους, ως σύνθετα υλικά ή ως το κύριο υλικό. Σε κάθε περίπτωση, το στερεό πέτρωμα ανθρακικού άλατος απλοποιεί σημαντικά την αποθήκευση και τη διάθεση του CO<sub>2</sub>, αυξάνοντας σημαντικά την πυκνότητα του υλικού που διαχειρίζεται. Είτε οι οργανισμοί που μειώνουν τις οργανικές ουσίες, είτε τα άλγη θα μπορούσαν να εφαρμοστούν για να κατακρημνίσουν τα πετρώματα ανθρακικού άλατος. Τα μέταλλα θα μπορούσαν να μειωθούν από τα βακτήρια και να κατακρημνιστούν ως ανθρακικά άλατα. Πρόσφατη έρευνα πάνω στα θερμοφιλικά βακτήρια που μειώνουν τις μεταλλικές ουσίες, έδειξε ότι η παραγωγή του FeCO<sub>3</sub> μπορεί να είναι σημαντική.

Οι μικροβιακές διαδικασίες μπορούν πιθανώς να κατασκευαστούν ώστε να επιταχύνουν σημαντικά τον σχηματισμό των ανθρακικών αλάτων από τα φυσικά μεταλλεύματα πυριτικών αλάτων, όπως ο «serpentinite». Είναι γνωστό ότι η απελευθέρωση των ιόντων μαγνησίου από τη θραύση «serpentinite» ενισχύεται σημαντικά από την παρουσία βακτηρίων νιτροποίησης (Lebedeva, Lyalikova, and Bugel'skii 1978), επομένως μπορούν να αναμένονται γενετικοί χειρισμοί, χρήση άλλων χημιοτροφικών οργανισμών και εκμετάλλευση του μικροβιακού όξινου σχηματισμού, για περαιτέρω επιτάχυνση της αποσύνθεσης των μεταλλευμάτων πυριτικών αλάτων.

Η γνώση για τους παράγοντες που εμποδίζουν την ανάπτυξη των φυτών στα «serpentine» εδάφη (όπου βρίσκεται λίγη βλάστηση) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να σχεδιαστούν μικροοργανισμοί που αντέχουν στις υψηλές συγκεντρώσεις μαγνησίου και τις χαμηλές αναλογίες ασβεστίου / μαγνησίου και αντιστέκονται στη μεγάλη τοξικότητα. Η γενετικά εφαρμοσμένη μηχανική έχει τη δυνατότητα να ενισχύσει αυτούς τους οργανισμούς με την ικανότητα να χρησιμοποιούν τα σουλφίδια μετάλλου ως πηγή ενέργειας και το CO<sub>2</sub> ως πηγή άνθρακα για αύξηση. Το διοξείδιο του άνθρακα θα εναποθετόταν ως ανθρακικό άλας μαγνησίου και ως μικροβιακή βιομάζα.

Επιπρόσθετα προηγμένα προγράμματα, περιλαμβάνουν τη χρησιμοποίηση ενζυμικών συστημάτων και καταλυτών, για την κατακράτηση του CO<sub>2</sub>. Οι στόχοι της έρευνας είναι να επιτευχθούν συντομότεροι χρόνοι παραμονής και υψηλότεροι ρυθμοί απόδοσης. Μια πιο νέα προσέγγιση μπορεί να είναι να αναπτυχθούν βιολογικοί καταλύτες για την αφαίρεση του CO<sub>2</sub>. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει εφαρμογές «τεχνητής φωτοσύνθεσης» με μοριακές συσκευές, οι οποίες μιμούνται τη φωτοσύνθεση. Δεδομένου ότι μερικά από τα απορροφητικά του CO<sub>2</sub> που έχουν ως βάση διαλύτες και που βρίσκονται αυτήν την περίοδο σε χρήση είναι οργανικές ενώσεις, γίνεται κατανοητό ότι η βιολογική παραγωγή των διαλυτών είναι εφικτή.

## 7.2. Εναπόθεση στις Μειωμένες Ενώσεις Άνθρακα

Η πραγματοποίηση ενός σημαντικού βήματος για την αντιμετώπιση της παγκόσμιας αλλαγής κλίματος, αυξάνοντας το μέγεθος των δασών, σιγά σιγά καθιερώνεται. Σχέδια για παγίδευση του CO<sub>2</sub> στη φυκώδη βιομάζα έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια και πρέπει να ερευνηθούν ως ένα πιθανό συμπλήρωμα της διαχείρισης των δασών και των προηγμένων γεωργικών βιοτεχνολογιών.

Η επιφάνεια του πλανήτη αποτελείται κατά ένα μεγάλο μέρος από ωκεανούς (75%), όπου η βιοπαραγωγικότητα συχνά περιορίζεται από τη θρεπτική διαθεσιμότητα. Ο θρεπτικός εμπλουτισμός θα μπορούσε να ενισχύσει την ωκεάνια ανάπτυξη των φυκιών και τη θαλάσσια παραγωγικότητα και να αυξήσει την καθαρή ωκεάνια σταθεροποίηση του CO<sub>2</sub>. Οι προηγμένες βιολογικές τεχνικές θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να αυξήσουν την παραγωγικότητα του φυτοπλαγκτού ή για να αλλάξουν τις ανταγωνιστικές ικανότητες των οργανισμών που θρέφονται με φύκια. Η θαλάσσια φυκώδης παραγωγή δεν περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα ύδατος και παρέχει τις μεγαλύτερες ευκαιρίες για έλεγχο της θρεπτικής μεταφοράς.

Τα φύκια υπόκεινται σχετικά απλούς γενετικούς χειρισμούς, οι οποίοι στοχεύουν στην αύξηση της φωτοσυνθετικής αποδοτικότητας, τη μεγιστοποίηση της παραγωγής των επιθυμητών προϊόντων απολιθωμένης ενέργειας και τη βελτιστοποίηση της μετατροπής των φωτοσυνθετικών προϊόντων σε καύσιμα ή χημικά αέρια πετροχημικής βιομηχανίας. Τέτοιες στρατηγικές θα μπορούσαν επίσης να εφαρμοστούν στα χερσαία είδη φυτών.

Ο στόχος είναι να υπάρξει ένα μίγμα βιολογικών συστημάτων, το οποίο θα παρέχει συμπληρωματικές, αλλά σημαντικές συνεισφορές στη γενική διαχείριση του άνθρακα. Η έρευνα για τη χρησιμοποίηση των φυκιών στα συστήματα λιμνών, ως ανανεώσιμη ενέργεια είναι πιθανό να έχει υποπροϊόντα κατάλληλα για ωκεάνια διαχείριση άνθρακα και θα μπορούσε τελικά να οδηγήσει στην ωκεάνια συγκομιδή – βασισμένη στις τεχνολογίες ανανεώσιμης ενέργειας. Η αποκατάσταση άλλων προϊόντων από φυκώδη βιομάζα – για παράδειγμα, λιπάσματα για τις χερσαίες καλλιέργειες ή για ωκεάνια λίπανση, ή μονοκύτταρη πρωτεΐνη για τη διατροφή των ζώων – θα βελτίωνε τα οικονομικά.

Τα φυτικά και μικροβιακά προγράμματα «genomics» που βρίσκονται αυτήν την περίοδο σε εξέλιξη, θα παράσχουν τελικά λεπτομερή γνώση για τον μεταβολισμό των οργανισμών και τις αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των διαφορετικών κυττάρων σε ένα φυτό και των διαφορετικών οργανισμών σε ένα οικοσύστημα. Απαιτούνται περισσότερες πληροφορίες για:

- Τη λειτουργία της αλληλουχίας των γονιδίων και τις αυτοματοποιημένες μεθόδους για τον χειρισμό και την αποθήκευση των τεράστιων ποσοτήτων των στοιχείων που έχουν αποκτηθεί από τις προσπάθειες «genomics»
- Το πώς να εισαχθούν τα μεμονωμένα γονίδια και οι διαβάσεις σε μια ευρεία ποικιλία φυτών και μικροβίων
- Τις στρατηγικές αντικατάστασης γονιδίων για διάφορα είδη φυτών
- Τα τεχνητά χρωμοσώματα για την εισαγωγή μεγάλων τμημάτων γενετικού υλικού στα φυτά.
- Γρηγορότερες και αξιόπιστες μέθοδοι για την κάλυψη των γενετικά κατασκευασμένων φυτών και για την κλωνοποίηση των κατασκευασμένων φυτών.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
«Carbon Sequestration, State of the Science»

*A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)*



Τα περισσότερα σχέδια ανανεώσιμης ενέργειας έχουν μεγάλη αξία για τη μείωση της απαίτησης για απολιθωμένη ενέργεια και παράγουν σχετικά «απειθή» βιομάζα, η οποία προσφέρει τη δυνατότητα για σημαντική καθαρή σταθεροποίηση του άνθρακα. Συγκρινόμενη με τις δυσκολίες της εναπόθεσης του CO<sub>2</sub> με διαχωρισμό, συμπίεση και μεταφορά, ο χειρισμός και η αποθήκευση της «απειθούς» βιομάζας είναι απλοί.

### *A) Εναπόθεση του Βιολογικού Άνθρακα σε Ωκεάνια Ιζήματα*

Τα θέματα της προηγμένης βιολογίας σχετικά με τη μέθοδο μείωσης του άνθρακα, περιλαμβάνουν τα εξής:

- Μέχρι ποιο σημείο μπορεί η συγκέντρωση και η διάθεση βιομάζας να χειριστεί γενετικά;
- Υπάρχουν εφικτοί γενετικοί χειρισμοί της βιομάζας που θα άλλαζαν το μειωμένο ποσοστό της παραγωγής βιομάζας του ωκεανού;
- Μπορεί να αναπτυχθεί ένας οργανισμός, ο οποίος γρήγορα και επικερδώς θα αξιολογήσει τις οικολογικές επιπτώσεις των διάφορων θρεπτικών σεναρίων;
- Μπορούν οι οργανισμοί να κατασκευαστούν έτσι ώστε η απόθεση του βιολογικού άνθρακα να ξεπερνά τις δυσμενείς επιπτώσεις στο pH, που προκαλούνται από την αποθήκευση ανθρακικού άλατος;
- Υπάρχουν προηγμένες βιολογικές προσεγγίσεις για την αύξηση της συσσώρευσης φυτοπλαγκτού, συγκεκριμένα στην άντληση μέσω φρεατίων πλούσιων σε θρεπτικά συστατικά ύδατος;
- Μπορούν να αναπτυχθούν γενετικοί δείκτες για να ελέγχουν και να αξιολογούν την τελική κατάληξη της βιομάζας στα βαθιά ωκεάνια ιζήματα; (ειδικότερα, χρειάζεται μια καλύτερη κατανόηση της μετατροπής της βιομάζας σε μεθάνιο)

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
«Carbon Sequestration, State of the Science»

*A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)*

Μια προοπτική της συσσώρευσης της βιομάζας στα ωκεάνια ιζήματα είναι η δυνατότητα αυτή η διαδικασία να γίνει, μακροπρόθεσμα, μια ενεργειακή πηγή. Είναι λογικό ότι τα μελλοντικά ενεργειακά σενάρια θα περιλαμβάνουν την αποκατάσταση μεθανίου από «clathrates», τα οποία θα βρίσκονται σε καλά καθορισμένες θέσεις.

### *B) Εναπόθεση του Άνθρακα σε Αλκαλικές Λίμνες*

Η ικανότητα μερικών γαλαζοπράσινων φυκιών να αναπτύσσονται ουσιαστικά ως μονοκαλλιέργειες στα ύδατα υψηλής αλκαλικότητας, δημιουργεί τη δυνατότητα αποτελεσματικότερης εναπόθεσης του CO<sub>2</sub>, από αυτήν που θα ήταν δυνατή με άλλα φωτοσυνθετικά συστήματα. Το ποσοστό χημικής υδάτωσης του CO<sub>2</sub> αυξάνεται με το pH, όπως κάνει και το ποσό του ανόργανου άνθρακα που μπορεί να διαλυθεί στο υδάτινο διάλυμα. Οι αλκαλικές λίμνες έχουν τη δυνατότητα να παγιδεύουν ουσιαστικά, όλες τις εκπομπές του CO<sub>2</sub> καυσαερίων, καθώς επίσης και τα σημαντικότερα μολυσματικά αέρια SO<sub>2</sub> και NO<sub>x</sub>. Η συσσώρευση της βιομάζας μπορεί να βελτιστοποιηθεί μέσω χειρισμών του pH που καταστέλλουν τις δραστηριότητες κατανάλωσης της

βιομάζας των οργανισμών που αναπνέουν. Με την κατάλληλη μαζική καλλιέργεια των γαλαζοπράσινων φυκιών, η φωτοσυνθετική δραστηριότητα μπορεί να διατηρήσει το αλκαλικό pH, παρέχοντας έναν ανανεώσιμο ενεργειακό πόρο. Η μαζική καλλιέργεια μικροφυκιών στο αλκαλικό νερό της θάλασσας έχει καθιερωθεί, δίνοντας τη δυνατότητα για ανάπτυξη πολύ μεγαλύτερων μαζικών συστημάτων από αυτά που θα μπορούσαν να αναπτυχθούν στις λίμνες γλυκού νερού.

### *Γ) Σχέδια για Παραγωγή Ανθεκτικής Βιομάζας από Χερσαία Φυτά*

Δύο δυνατότητες για τον καθορισμό του CO<sub>2</sub> στα υλικά, με χρόνους ανακύκλωσης πολύ πιο μεγάλους από του ξύλου, μπορούν να εξεταστούν: πολυμερή υλικά που είναι σχετικά ανθεκτικά στη βιολογική υποβάθμιση και ανόργανα (ανθρακικά άλατα).

Ένας μεγάλος αριθμός φυτικών ειδών συνθέτει τις ρητίνες ή το φυσικό λάστιχο, δυο υλικά που είναι σχετικά σταθερά στο περιβάλλον. Αν και λίγα από αυτά τα είδη έχουν οικονομική σημασία, είναι διαδεδομένα και προσαρμόσιμα σε μια σειρά κλιμάτων και θα μπορούσαν να αναπτυχθούν σε μεγάλη κλίμακα και να κατασκευαστούν για βελτιωμένη αποδοτικότητα μετατροπής του CO<sub>2</sub> σε προϊόντα. Αυτά τα τελικά προϊόντα του μεταβολισμού των φυτών, θα μπορούσαν να κατατεθούν υπό αυτήν τη μορφή, ή να διασυνδεθούν για να ελαχιστοποιήσουν την πιθανότητα βιολογικής υποβάθμισης.

Η ανάπτυξη νέων υλικών (π.χ., νέα πλαστικά παραγόμενα από βιομάζα), η οποία θα αυξήσει τη χρήση των ενώσεων μειωμένου άνθρακα στην οικονομία, μπορεί να είναι ένα σημαντικό στοιχείο για τη διαχείριση του άνθρακα. Μια άλλη προσέγγιση θα μπορούσε να κατευθυνθεί προς την εξάλειψη της μη αντιστρέψιμης μετατροπής του πετρελαίου σε CO<sub>2</sub>, μέσω αντικατάστασης των ανακυκλώσιμων φυτικών προϊόντων με ενδιάμεσης – κλίμακας χημικά και ακόμη και με καύσιμα μεταφοράς. Αυτά θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν τις ρητίνες, τα πετρέλαια και ακόμη και το επτάνιο, το οποίο είναι ένα σημαντικό συστατικό της τερεβινθίνης και ένα άριστο καύσιμο μεταφοράς. Η γενετική μηχανική των φυτών για βελτίωση της διαθεσιμότητας αυτών των προϊόντων, είναι απόλυτα εφικτή.

Το «lignin» είναι σχετικά ανθεκτικό στη βιοδιάσπαση και η αύξηση της περιεκτικότητάς του στα φυτά, θα επιβράδυνε την αποσύνθεση της βιομάζας στο έδαφος. Οι γενετισιολόγοι φυτών έχουν ανακαλύψει μεταλλάξεις που μειώνουν την περιεκτικότητα των φυτών σε «lignin», ώστε να αυξηθεί η θρεπτική αξία για τα μηρυκαστικά. Επιπλέον, διευκρινίστηκαν οι βιοχημικές επιλογές για τη βιοσύνθεση του «lignin» στα φυτά και κλωνοποιήθηκαν τα γονίδια που κωδικοποιούν τα ένζυμα του «lignin» και πρόσφατα χρησιμοποιούνται για να αλλάξουν την ποσότητα και την ποιότητα του «lignin» σε διάφορα είδη δέντρων. Η τεχνολογία χειρισμού του «lignin» θα μπορούσε να εφαρμοστεί στα φυτά που αυτήν την περίοδο εξετάζονται για την αναδάσωση, με στόχο την αύξηση της καθαρής μεταφοράς άνθρακα.

Έχει υπολογιστεί ότι μόνο το 3% του άνθρακα του στερεού ξύλου στα υλικά οδόστρωσης μετατρέπεται σε CO<sub>2</sub> ή μεθάνιο (Skog & Nicholson 1998). Αυτή η περιορισμένη αποσύνθεση του ξύλου αποδίδεται στο «recalcitrance» του «lignin» στα αναιρόβια περιβάλλοντα. Αν και τα αναιρόβια βακτήρια μπορούν να υποβιβάσουν την κυτταρίνη, ένα μεγάλο μέρος της στο στερεό ξύλο διαχωρίζεται από τη βακτηριακή δράση, μέσω ενός εμποδίου «lignin» και επομένως δε μπορεί να βιοδιασπαστεί. Ακόμη και τα χάρτινα προϊόντα στα υλικά οδόστρωσης υποβάλλονται σε μερική μόνο αποσύνθεση. Σήμερα, το περισσότερο από το ξύλο και τα ξύλινα προϊόντα στα

υλικά οδόστρωσης είναι άνθρακας που έχει εναποτεθεί. Εντούτοις, οι αλλαγές στη δομή του ξύλου, μέσω μείωσης της περιεκτικότητας σε «lignin», θα μπορούσαν να αυξήσουν τη βιοδιασπασιμότητά της. Είναι πιθανό ότι σημαντική ποσότητα «lignin» θα παρέμενε ακόμα και στα γενετικά τροποποιημένα ξυλώδη φυτά και ότι τα υλικά οδόστρωσης που περιέχουν τέτοια φυτά, θα συνέχιζαν να διαχωρίζουν τον άνθρακα. Ωστόσο, η αυξανόμενη βιοδιασπασιμότητα θα μπορούσε να αυξήσει την παραγωγή μεθανίου από τα υλικά οδόστρωσης και η ενεργειακή αξία του θαμμένου ξύλου και των ξύλινων προϊόντων θα μπορούσε να παρέχει ένα οικονομικό κίνητρο για τη χρησιμοποίηση ξύλινων υλικών στην εναπόθεση του άνθρακα. Σε αντίθεση με την αναδάσωση ή τα γεωργικά σχέδια υψηλής παραγωγικότητας, υπάρχει ένα απεριόριστο ποσό άνθρακα, το οποίο θα μπορούσε να εναποτεθεί στα υλικά οδόστρωσης.

### 7.3. Αυξανόμενη Φυτική Παραγωγικότητα

Ο γενετικός χειρισμός των φυτών θα μπορούσε να αυξήσει τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα και να εναποθέσει το  $\text{CO}_2$  και το άζωτο αποτελεσματικότερα. Ο χειρισμός των γονιδιωμάτων των φυτών για να ληφθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα, είναι ακόμα ένας φτωχά ανεπτυγμένος τομέας. Πολύ περισσότερη προσοχή πρέπει να δοθεί στους θεμελιώδεις μηχανισμούς κυτταρικής ανάπτυξης, στη βιοχημεία των κυτταρικών τοιχωμάτων, στις φωτοσυνθετικές διαδικασίες των φυτών και στις πρωτοβάθμιες και δευτεροβάθμιες μεταβολικές διαδικασίες.

Τα γρηγορότερο αυξανόμενα ποώδη γεωργικά είδη φυτών, θα ενισχύσουν την αφαίρεση του  $\text{CO}_2$  από την ατμόσφαιρα και θα το παγιδεύσουν φωτοσυνθετικά, ώστε να μπορεί να μετατραπεί εύκολα σε ανανεώσιμα καύσιμα, χημικά, πολυμερή και τρόφιμα. Τα γρήγορα αυξανόμενα ξυλώδη είδη θα παγιδεύσουν το  $\text{CO}_2$  στην ανθεκτική ξυλεία, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια ευρεία ποικιλία κατασκευών. Άλλα ταχέως αναπτυσσόμενα ποώδη και ξυλώδη είδη θα παράσχουν εύκολη πρώτη ύλη για χαρτί, συνθετικά και μπλοκ πολυμερών.

Η εμφάνιση της σύγχρονης μοριακής βιολογίας έχει επιτρέψει την εμφάνιση στρατηγικών για τη βελτίωση πολλών διαφορετικών οργανισμών, μέσω της γενετικής μηχανικής, συμπεριλαμβανομένων πολλών γεωργικών ειδών και ειδών ξυλείας. Η κατανόηση των διαδικασιών της φωτοσύνθεσης, της αναπνοής, της παθολογίας των φυτών και της δομής και λειτουργίας του ξύλου, μεταξύ των άλλων, επιτρέπει την ανάπτυξη πολλών στρατηγικών για την αύξηση του ποσοστού βιολογικής εναπόθεσης άνθρακα.

Τα φυτά παίρνουν τον άνθρακά τους από το  $\text{CO}_2$ , το οποίο αποτελεί μόνο το 0,03% της ατμόσφαιρας. Τα μικροσκοπικά φυτά που επιπλέουν, το φυτοπλαγκτόν και άλλα φύκια, λαμβάνουν το  $\text{CO}_2$  που διαλύεται στο ύδωρ. Και τα χερσαία και τα θαλάσσια φυτά απαιτούν ηλιακή ενέργεια, για να μειώσουν το  $\text{CO}_2$  στη βιομάζα. Η φωτοσύνθεση είναι αρμόδια για τη μετατροπή του ηλιακού φωτός σε χημική ενέργεια, σε ουσιαστικά όλους τους αρχικούς παραγωγούς, σχεδόν σε όλα τα οικοσυστήματα. Αποτελεί τη βάση της τροφικής αλυσίδας για τη ζωή στη γη και είναι επίσης η πηγή του οξυγόνου στην ατμόσφαιρα.

Το ηλιακό φως παρέχει την ενέργεια για τον αρχικό μηχανισμό της σταθεροποίησης του άνθρακα από την ατμόσφαιρα. Η θεωρητική μέγιστη αποδοτικότητα της ελαφριάς ενέργειας κατακράτησης και μετατροπής σε χρήσιμη χημική ενέργεια, είναι περίπου 5% (εκφρασμένη ως μέρος της διαθέσιμης ορατής ελαφριάς ενέργειας στη γήινη επιφάνεια). Τα φωτοσυστήματα των φυτών σπάνια λειτουργούν κοντά σε αυτήν την απόδοση, ένα γεγονός που δίνει μια σημαντική ευκαιρία για εναπόθεση άν-

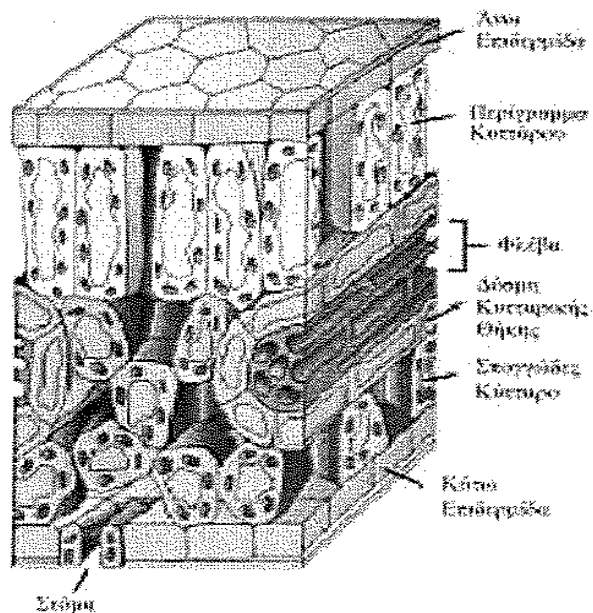
θρακα. Η φωτοσυνθετική απόδοση αλλάζει σημαντικά, ανάλογα με το οικοσύστημα και τη χρονική περίοδο. Η αποδοτικότητα μερικών δασών μπορεί να είναι τόσο χαμηλή όσο 0,1-0,05%, αυτή των φυτών των ελών μπορεί να είναι τόσο υψηλή όσο 2-4%, κατά την αρχή της άνοιξης. Η φωτοσυνθετική απόδοση του καλάμου του καλαμποκιού και της ζάχαρης μπορεί να είναι τόσο υψηλή όσο 3,5-4%. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζουν σημαντικά τη φωτοσυνθετική απόδοση, αλλά η βιοχημεία του συστήματος κατακράτησης και ενεργειακής μετατροπής του φωτονίου μπορεί να βελτιωθεί επίσης.

Η φωτοσυνθετική σταθεροποίηση του άνθρακα περιορίζεται από την αποδοτικότητα δύο πολύ σημαντικών διαδικασιών – τη μετατροπή της ελαφριάς ενέργειας σε χημική και την αρχική αντίδραση σταθεροποίησης του άνθρακα που καταλύεται από το ένζυμο «Rubisco», την αφθονότερη πρωτεΐνη στη γη. Κάθε μία ή και οι δύο διαδικασίες μπορούν, από την άποψη των ποσοστών εναπόθεσης άνθρακα και θεωρείται ότι θα μπορούσαν να ενισχυθούν σημαντικά, μέσω των προηγμένων βιολογικών προσεγγίσεων.

Το «Rubisco» είναι όχι μόνο ένα πολύ αργό ένζυμο, αλλά είναι επίσης αναποτελεσματικό επειδή μπορεί να αντιδράσει με το μοριακό οξυγόνο, σε μια διαδικασία γνωστή ως φωτοαναπνοή. Αυτό οδηγεί σε έναν μη παραγωγικό μεταβολικό κύκλο. Καθώς η αναλογία του CO<sub>2</sub> και του O<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα αυξάνεται, η παραγωγική καρβοξυλική αποδοτικότητα θα αυξηθεί φυσικά. Εντούτοις, μπορεί επίσης να είναι δυνατό να ανακαλυφθούν αποδοτικότερες και φυσικά εμφανιζόμενες μορφές «Rubisco», στους μέχρι τώρα χαρακτηρισμένους φτωχούς ή άγνωστους οργανισμούς.

Μερικά είδη φυτών έχουν ήδη αναπτύξει μια λύση για το πρόβλημα που παρουσιάζεται εξαιτίας του «Rubisco». Μια ομάδα ειδών χλόης θερμού κλίματος, γνωστή ως χλόες C4 (συμπεριλαμβανομένου του καλαμποκιού, του σόργου και του ζαχαρότευτλου), δημιούργησε μία εξειδικευμένη ανατομία φύλλων (ανατομία Kranz, βλέπε σχήμα 7.1. και 7.2. για την C3 και C4 ανατομία αντίστοιχα). Αυτά τα φυτά παρουσιάζουν ελάχιστη ή καθόλου φωτοαναπνοή και είναι αρκετά αποδοτικότερα, επειδή το CO<sub>2</sub> μεταφέρεται στις περιοχές της φωτοσύνθεσης. Αυτή η παγίδευση του CO<sub>2</sub> πραγματοποιείται μέσω της διάβασης «Hatch – Slack» (σχήμα 7.3.), η οποία δεν επηρεάζεται από το οξυγόνο. Ο γενετικός χειρισμός μπορεί να βελτιστοποιήσει τις διαβάσεις παγίδευσης του CO<sub>2</sub>.

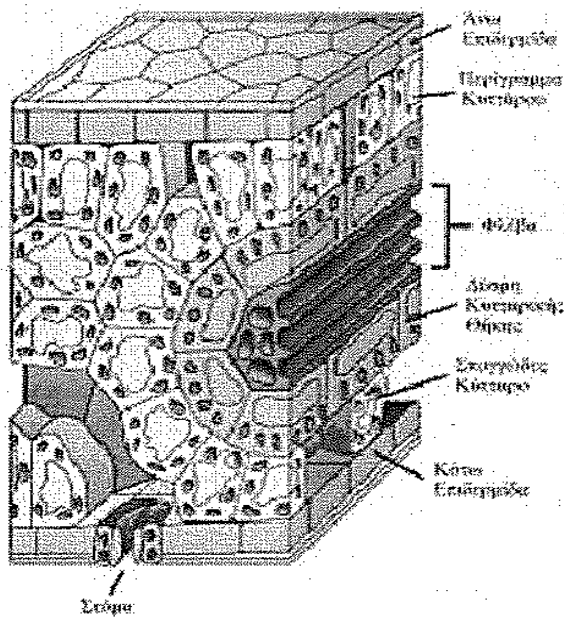
Διάταξη των Κυττάρων σε ένα Φύλλο C3



Σχήμα 7.1. Χαρακτηριστική ανατομία φύλλων σε ένα C3 φυτό.

Πηγή: [www.biology.arizona.edu/181/rick/photosynthesis/C4.html](http://www.biology.arizona.edu/181/rick/photosynthesis/C4.html)

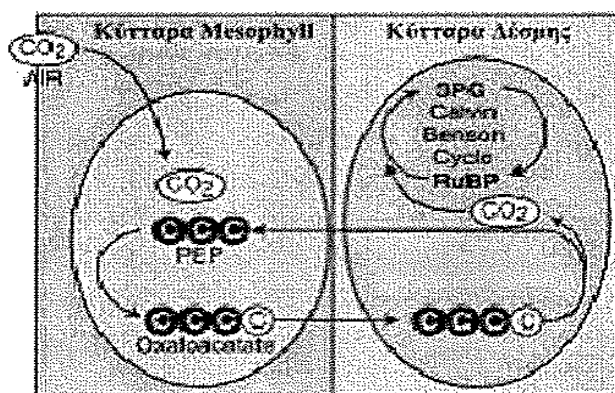
Διάταξη Κυττάρων ενός Φύλλου C4



Σχήμα 7.2. Χαρακτηριστική ανατομία φύλλων σε ένα C4φυτό.

Πηγή: [www.cme.msu.edu/WIT/Doc/mj\\_recon.html](http://www.cme.msu.edu/WIT/Doc/mj_recon.html)

Αν και 78% της ατμόσφαιρας αποτελείται από άζωτο, τα φυτά δεν είναι ικανά να το μετατρέψουν σε μορφές που μπορούν να χρησιμοποιήσουν. Εντούτοις, ορισμένα βακτήρια παράγουν ένζυμα που διευκολύνουν τον μετασχηματισμό του αερίου αζώτου σε αμμωνία και άλλες ενώσεις που περιέχουν άζωτο, οι οποίες μπορούν εύκολα να απορροφηθούν από τις ρίζες των φυτών και να χρησιμοποιηθούν από τα φυτά. Στη φύση, η φυσική αποσύνθεση της νεκρής βιομάζας απελευθερώνει το άζωτο σε μορφές, που συχνά μπορούν να απορροφηθούν από τα φυτά. Αυτό εμφανίζεται και στα χερσαία συστήματα και στους ωκεανούς. Η διαθεσιμότητα αζώτου συχνά μειώνεται και συνήθως συμπληρώνεται από λιπάσματα στη γεωργική πρακτική. Μερικά είδη φυτών, ειδικότερα τα όσπρια, δεν απαιτούν λίπανση αζώτου, επειδή οι ρίζες τους αποικίζονται από μικροοργανισμούς, οι οποίοι παράγουν άζωτο. Η αμμωνία μπορεί να αφομοιωθεί εύκολα από τα φυτά και να ενσωματωθεί σε άλλες ενώσεις που περιέχουν άζωτο, όπως τα αμινοξέα, τα οποία είναι σημαντικά για την πρωτεϊνική σύνθεση. Το κύριο ένζυμο για τη σταθεροποίηση του αζώτου ονομάζεται «nitrogenase» και σπάει τον πολύ ισχυρό τριπλό δεσμό του αζώτου. Αυτά τα σύνθετα και ανεπαρκώς κατανοητά ένζυμα, απαιτούν μεγάλα ποσά ενέργειας για να ολοκληρώσουν αυτήν την αντίδραση. Επιπλέον, τα «nitrogenases» περιέχουν μια κατάταξη σύνθετης και περιέχουσας σιδήρου ένωσης, η οποία είναι ουσιαστική για τη δράση. Κατά συνέπεια, συχνά μειώνεται το ποσοστό σιδήρου, για τη σταθεροποίηση του αζώτου στον ωκεανό.



Σχήμα 7.3. Σταθεροποίηση άνθρακα, όπως εμφανίζεται μέσω της διάβασης Hatch-Slack στα C4 φυτά

Πηγή: [www.biology.arizona.edu/181/rick/photosynthesis/C4.html](http://www.biology.arizona.edu/181/rick/photosynthesis/C4.html)

Όταν το φωτοσυνθετικό φως συλλαμβάνεται, η σταθεροποίηση του CO<sub>2</sub> και η διαθεσιμότητα του αζώτου δεν περιορίζουν πλέον τον μεταβολισμό του φυτού και ως αποτέλεσμα μπορεί να βελτιωθεί η ρύθμιση ή / και να ξανασχεδιαστούν οι δευτεροβάθμιες μεταβολικές διαβάσεις, για τη μετατροπή και εναπόθεση των αρχικών προϊόντων. Έτσι, είναι πολύ σημαντικό να κατανοηθούν και οι χωρικοί και οι χρονικοί σύνδεσμοι μεταξύ των μεταβολικών διαβάσεων σε έναν οργανισμό, καθώς επίσης και οι τρόποι μακροπρόθεσμης αποθήκευσης των προϊόντων που έχουν εναποτεθεί. Η διευκρίνιση αυτών των συνδέσμων και ικανοτήτων αποθήκευσης άνθρακα θα εξεταστεί καλύτερα από τη δομική βιολογία, τη μικροβιακή και φυτική μοριακή γενετική και την υπολογιστική προσομοίωση και θεωρία.

Άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την εναπόθεση άνθρακα είναι τα έντομα και τα μικροβιακά παθογόνα, τα οποία μπαίνουν στις καλλιέργειες και τις δασικές παραγωγές. Επιπλέον, άλλες πιέσεις όπως η ξηρασία, τα αλατούχα εδάφη, η θερμότητα και το κρύο, το pH και η παρουσία βαρέων μετάλλων και άλλων ρύπων, περιορίζει τα ποσοστά ανάπτυξης των φυτών και τη συσσώρευση βιομάζας. Ο περιορισμός τέτοιων πιέσεων, έχει αποτελέσει έναν στόχο για βελτίωση μέσω της γεωργίας και της δασοκομίας, κατά τη διάρκεια των αιώνων. Η σύγχρονη επιστήμη των φυτών έχει μετριάσει τις απώλειες καλλιέργειας, αλλά υπάρχει ακόμα άφθονο περιθώριο για βελτίωση, όπως αποδεικνύεται από την παραγωγική δραστηριότητα και την επένδυση στη βιοτεχνολογία των φυτών.

Είναι συμφέρον να αυξηθεί η απόθεση του άνθρακα στα εδάφη. Αυτό μπορεί να ολοκληρωθεί αποτελεσματικότερα με την αύξηση της μεταφοράς φωτοσυνθετικού στα συστήματα ρίζας και με την αύξηση της συσσώρευσης των βιοπροϊόντων (όπως «lignin») στα δασικά απορρίμματα. Η απόθεση του άνθρακα στο έδαφος, από τα γεωργικά και δασοκομικά συστήματα, μπορεί να αυξηθεί με τη μετατόπιση του φωτοσυνθετικού που συμμετέχει από τα υπέργεια στα υπόγεια όργανα, μέσω γενετικών μεθόδων. Η αύξηση του «recalcitrance» των ιστών της ρίζας, πρέπει επίσης να εξερευνηθεί ως δυνατότητα. Η απόθεση στη ρίζα μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντική στην αποκατάσταση των υποβιβασμένων εδαφών ή την καλλιέργεια φυτών σε οριακά οικοσυστήματα.

Η σταθεροποίηση αζώτου θα μπορούσε επίσης, να αυξήσει την απόθεση στη ρίζα και να υποκινήσει τα εκκρίματα ρίζας. Τα εδαφολογικά μικρόβια διαδραματίζουν έναν σημαντικό αλλά ημιτελώς κατανοητό ρόλο στη διευκόλυνση της θρεπτικής λήψης από τα φυτά. Τα μικρόβια που συνδέονται με τις ρίζες των φυτών είναι ένα ουσιαστικό συστατικό της βιολογικής σταθεροποίησης του αζώτου. Οι υδατάνθρακες και άλλες θρεπτικές ουσίες που εκκρίνονται από τις ρίζες των φυτών, ενθαρρύνουν τη μικροβιακή ανάπτυξη και τα σχετικά βακτήρια και οι μύκητες κινητοποιούν τα μεταλλεύματα (όπως το φωσφορικό άλας) και το άζωτο για χρήση από τα φυτά. Με την αύξηση της έκκρισης φωτοσυνθετικού από τις ρίζες, μπορεί να είναι δυνατό να αυξηθεί η βιολογική σταθεροποίηση του αζώτου και η καλλιέργεια των οριακών εδαφών. Για παράδειγμα, συγκεκριμένα φυτά συνδεδεμένα με μύκητες είναι σημαντικά για την καλλιέργεια ειδών μαλακού ξύλου στα στερεά – ανεπαρκή εδάφη που βρίσκονται κοντά σε ορυχεία.

Διάφορες σημαντικές μη – φωτοσυνθετικές αντιδράσεις σταθεροποίησης του CO<sub>2</sub> εμφανίζονται στη φύση (University of Chicago 1998). Τουλάχιστον το 10% της κυτταρίνης και της ημικυτταρίνης στη βιομάζα των φυτών μπορεί να μετατραπεί, μέσα σε αναερόβιο περιβάλλον, σε μεθάνιο και CO<sub>2</sub>, από τις ενέργειες των αναερόβιων βακτηριδίων. Τα βακτηρίδια «Acetogenic» φαίνεται να διαδραματίζουν έναν σημαντικό ρόλο σε αυτήν τη διαδικασία. Σε διεθνές επίπεδο, περίπου 10GT οξικού άλατος μεταβολίζονται ετησίως στο αναερόβιο περιβάλλον και περίπου 10% αυτού, μπορεί



να προέλθει από τη σταθεροποίηση του CO<sub>2</sub> μέσω της διάβασης «acetyl – CoA». Οι ενδεχομένως σημαντικές θέσεις για τα «acetogens» περιλαμβάνουν τους τερμίτες, τα χωνευτικά συστήματα των μηρυκαστικών και μονογαστρικών ζώων και τα δασικά εδάφη.

Εάν μια πηγή υδρογόνου μπορεί να παρασχεθεί σε ένα πλούσιο σε CO<sub>2</sub> και χωρίς οξυγόνο περιβάλλον, το CO<sub>2</sub> μπορεί να εισαχθεί αποτελεσματικά στις αμετάβλητες ενώσεις άνθρακα. Κατά ενδιαφέροντα τρόπο, πρόσφατα έχει ανακαλυφθεί ότι η αυστηρά χημική δράση του ύδατος στα βασάλτικα πετρώματα σχηματισμών μεγάλου βάθους, χρησιμεύει ως μια πηγή υδρογόνου για τα μικροβιακά οικοσυστήματα (Gollin et al. 1998). Αυτές οι αντιδράσεις μπορεί να είναι σημαντικές για τη βιοεναπόθεση στους γεωλογικούς σχηματισμούς, όπως τα εξαντλημένα φρεάτια πετρελαίου και φυσικού αερίου.

Η εμφάνιση της γενετικής μηχανικής έχει βελτιώσει την παραγωγικότητα των καλλιεργειών, με την αύξηση της ανθεκτικότητας στις ασθένειες και με τη βελτίωση της δυνατότητας των κατασκευασμένων καλλιεργειών να ανταγωνιστούν τα ανεπιθύμητα είδη φυτών. Τα φυτικά προϊόντα, ειδικά οι καλλιέργειες ελαιόσπορου, έχουν αλλάξει για να αυξήσουν την παραγωγή του εμπορεύσιμου λαδιού και αυτές οι κατασκευασμένες ποικιλίες αυξάνονται εμπορικά. Πρόσθετη γενετική μηχανική θα μπορούσε να αυξήσει την παραγωγή λαδιού ή άλλων επιθυμητών προϊόντων. Διάφορα γενετικά κατασκευασμένα είδη καλλιέργειας αναπτύσσονται αυτήν την περίοδο στις ΗΠΑ και σε άλλες χώρες και παίρνουν γρήγορα μερίδιο στην αγορά. Για παράδειγμα, 40% των συγκομιδών «Canola» στον Καναδά και 33% της συγκομιδής σόγιας στις ΗΠΑ κατασκευάζονται γενετικά.

Η έρευνα βρίσκεται σε εξέλιξη για να εξετάσει τις αλληλεπιδράσεις φυτών – εντόμων. Η έρευνα εστιάζει συνήθως στην καταπολέμηση ενός συγκεκριμένου παρασίτου εντόμων, μέσω παραγωγής διαγενετικών φυτών (φυτά με γονίδια από άλλα είδη) που συνθέτουν ενώσεις που εμποδίζουν τον μεταβολισμό των εντόμων. Η παραγωγή ανθεκτικών στις ασθένειες διαγενετικών φυτών, απαιτεί οι μοριακοί μηχανισμοί που περιλαμβάνονται στην αντίσταση των φυτών ξενιστών να διευκρινίζονται. Δυστυχώς, αυτοί οι μηχανισμοί ποικίλουν αρκετά μεταξύ των παθογόνων φυτών. Οι πρόοδοι στην τεχνολογία γονιδίων έχουν προσφέρει διάφορες νέες μεθόδους για τη βελτίωση της ανθεκτικότητας των καλλιεργειών στις ασθένειες.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί το μέγιστο όφελος από τη βιολογική σταθεροποίηση, χρειάζεται περισσότερη γνώση για το ποιες διαδικασίες περιορίζουν την ανάπτυξη των φυτών πολλών εξειδικευμένων καλλιεργειών για τα τρόφιμα, τα καύσιμα και τις δομικές χρήσεις. Χρειάζονται επίσης περισσότερες πληροφορίες για τις βέλτιστες μεθόδους καλλιέργειας και συγκομιδής, ιδιαίτερα στα οριακά περιβάλλοντα όπου η ποιότητα ύδατος ή εδάφους περιορίζεται. Άλλοι παράγοντες που περιορίζουν την ανάπτυξη, όπως οι ασθένειες και τα έντομα, απαιτούν επίσης καλύτερη κατανόηση. Η βιοτεχνολογία και η «genomic» των φυτών θα διαδραματίσουν μεγάλο ρόλο στην επίτευξη αυτών των στόχων.

Η παραγωγικότητα των φυτών μπορεί να αυξηθεί από:

- Βελτίωση της φωτοσυνθετικής αποδοτικότητας με αύξηση της αποτελεσματικότητας της αντίδρασης παγίδευσης και τη μείωση της φωτοαναπνοής. (διάβαση C<sub>4</sub>, αποδοτικότητα Rubisco και ποσοστό αντίδρασης)
- Ανάπτυξη γρήγορων μεθόδων για τον γενετικό χειρισμό των γεωργικών, δασικών και των μη παραδοσιακών ειδών, με δυνατότητα εναπόθεσης του CO<sub>2</sub> (συστήματα μετασχηματισμού και αναγέννησης)

- Ανάπτυξη νέων εργαλείων για τον χειρισμό των ταχέα αναπτυσσόμενων ποωδών και ξυλωδών ειδών (τεχνητά χρωμοσώματα, τεχνικές αντικατάστασης γονιδίων)
- Μείωση του χρόνου που απαιτείται για τη δημιουργία διαγενετικών φυτών στο εργαστήριο
- Ενίσχυση των μη φωτοσυνθετικών μηχανισμών για τη σταθεροποίηση του CO<sub>2</sub> (βακτηριακή μεθανογένεση και ακετογένεση)
- Γενετική μηχανική για κατασκευή κυτταρικών τοιχωμάτων των γεωργικών ειδών, έτσι ώστε να μπορούν εύκολα και οικονομικά να μετατραπούν σε καύσιμα και χημικές ουσίες
- Ανάπτυξη συγκομιδών ή διαδικασιών, οι οποίες θα βιοσυνθέσουν λειτουργικές χημικές ουσίες αερίου πετροχημικής βιομηχανίας, για την παραγωγή «απειθών» προϊόντων (π.χ., μη βιοδιασπάσιμα πλαστικά)
- Βελτίωση της σταθεροποίησης του αζώτου στις μικροβιακές αποικίες των φυτών και / ή κλωνοποίηση γονιδίων στα φυτά.
- Ανάπτυξη απλοποιημένων «nitrogenases» που παρακάμπτουν τα τρέχοντα μηχανικά ζητήματα, τα οποία είναι πολύπλοκα, εξαρτώμενα από τον σίδηρο και έχουν μεγάλη ενεργειακή ένταση
- Βελτίωση της ανθεκτικότητας στα έντομα και τις ασθένειες, μέσω της «transgenic» και της πρωτεϊνικής μηχανικής.

## 7.4. Εναλλακτικά Ανθεκτικά Υλικά

### A) Βιοπολυμερή

Τις προηγούμενες δεκαετίες έχει πραγματοποιηθεί δραματική αύξηση της χρήσης των ενζύμων για συνθετικές εφαρμογές. Αυτό είναι ιδιαίτερα προφανές, από την αυξανόμενη χρήση των ενζύμων, για τον σχεδιασμό και την τροποποίηση των πολυμερών. Τα ένζυμα προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα, πέρα από τους χημικούς καταλύτες, στη σύνθεση των υλικών με ιδιαίτερα εξειδικευμένες δυνατότητες – συμπεριλαμβανομένης της βιοδιασπασιμότητας, της βιοσυμβατότητας, της έμφυτης επιλεκτικότητας και της εύκολα προσαρμοσμένης λειτουργίας – , τα οποία παράγονται κάτω από συνθήκες που ελαχιστοποιούν τον σχηματισμό υποπροϊόντων και τους ανεπιθύμητους ρύπους (Dorkick 1998).

Η ανάπτυξη αποθεμάτων άνθρακα για χημικές εφαρμογές θα μειώσει τις εκπομπές CO<sub>2</sub>, διότι θα αντικαταστήσει τους απολιθωμένους υδρογονάνθρακες. Αρχικά παραδείγματα είναι η χρήση πολυμερών, τα οποία προέρχονται από ανανεώσιμους αγροτικούς πόρους, όπως το καλαμπόκι ή τα ζαχαρότευτλα. Αυτές οι ενώσεις είναι επίσης συνήθως γνωστές ως «βιοπλαστικά». Για πολλές εφαρμογές, τα πλαστικά «φιστίκια» που χρησιμοποιούνται ως υλικό συσκευασίας, έχουν αντικατασταθεί από τα βιοπλαστικά. Αυτά τα βιοπλαστικά αντικαθιστούν τα κατά βάση πετροχημικά πολυμερή, όπως το πολυαιθυλένιο, το πολυστυρόλιο και το πολυπροπυλένιο. Μια κατηγορία πλαστικών, οι ρητίνες PLA, αποτελείται από αλυσίδες γαλακτικού οξέος, που προέρχονται από τη μετατροπή του αμύλου σε ζάχαρη, ακολουθούμενη από ζύμωση στο γαλακτικό οξύ. Οι Dow Chemical και Cargill, έχουν διαμορφώσει πρόσφατα μια κοινοπραξία, για να εμπορευματοποιήσουν σε μεγάλη κλίμακα την PLA. Το «polyhydroxylalkanoates» (PHAs) μια ευδιάκριτη χημική οικογένεια των βιοδιασπασίμων βιοπλαστικών, ερευνάται από τις Monsanto και Proctor & Gamble για χρήση ως πε-

τρο – πλαστικά υποκατάστατα. Η Monsanto εξετάζει την παραγωγή PHAs στις φυτικές συγκομιδές, αντί στις δεξαμενές ζύμωσης.

Τα βιοπλαστικά και τα βιοκαύσιμα είναι πολλά υποσχόμενες νέες τεχνολογίες, αλλά άλλες τεχνολογίες μπορεί να ασκήσουν μεγαλύτερη μακροχρόνια επίδραση στην εναπόθεση του άνθρακα. Τα βιοπλαστικά αναμένεται να ανταγωνιστούν με τα πετροπλαστικά, βάση των στοιχείων δαπανών / απόδοσης. Εάν ο άνθρακας που χρησιμοποιείται στη διαδικασία είναι από ατμοσφαιρικές πηγές (π.χ., από βιομάζα), το καθαρό αποτέλεσμα είναι εναπόθεση του άνθρακα. Η αγορά, γι' αυτά τα υλικά, μπορεί να περιορίσει τη δυνατότητα εναπόθεσης άνθρακα· εντούτοις, άλλες βιολογικές διαδικασίες, ειδικά όταν είναι μέρος μιας στρατηγικής εναπόθεσης, μπορεί να έχουν μεγαλύτερες δυνατότητες εναπόθεσης.

Για να βελτιωθούν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά των βιοπλαστικών, θα πρέπει να γίνουν:

- Πρόοδοι στην κατανόηση της δομικής βιολογίας
- Γενετική αλλαγή των ενζυματικών «αλυσίδων»
- Βελτιωμένη πρωτεϊνική κρυσταλλογραφία
- Υπολογιστική βιολογία για να προσομοιωθούν η δομή και οι ιδιότητες σε ακραίες θερμοκρασίες
- Γενετική μηχανική για να βελτιωθεί η διάρκεια και η ελαστικότητα

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
«Carbon Sequestration, State of the Science»

*A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)*

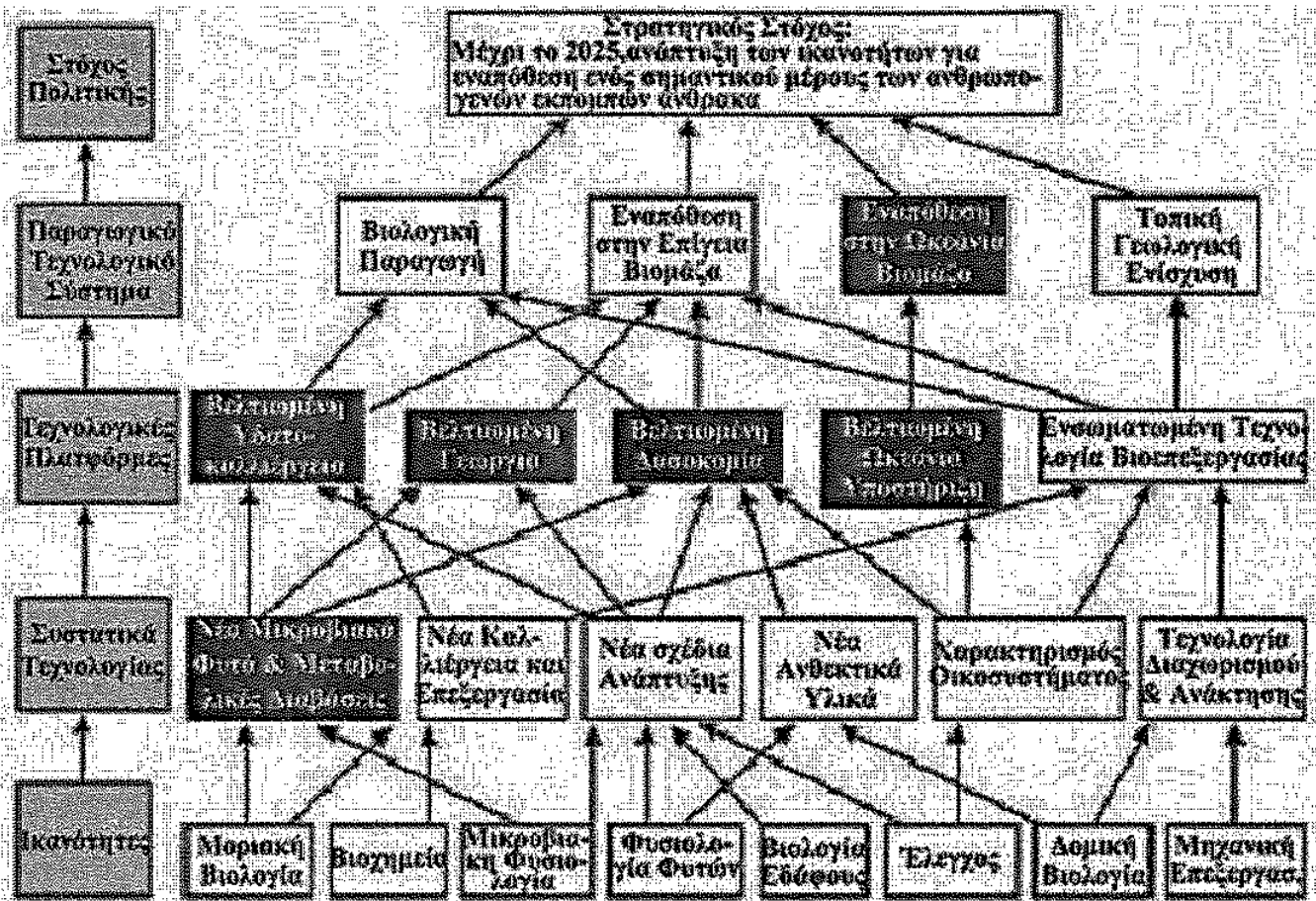
## B) Μικροβιακή Παραγωγή Κυτταρίνης

Το «*acetobacter xylinium*», ένα μη φωτοσυνθετικό βακτήριο που συνήθως χρησιμοποιείται στην παραγωγή ξιδιού, μπορεί να χρησιμοποιήσει γλυκόζη, σάκχα-ρα, γλυκερίνη ή άλλα οργανικά υλικά και να τα μετατρέψει σε καθαρή κυτταρίνη (Brown 1979). Ο Weyerhaeuser, μαζί με την Cetus Corporation, ξόδεψε επτά έτη για να βελτιστοποιήσει την παραγωγή της βακτηριακής κυτταρίνης, η οποία έχει μοναδικές δομικές και απορροφητικές ιδιότητες. Διάφορα διπλώματα ευρεσιτεχνίας έχουν αρχειοθετηθεί για εφαρμογές της βακτηριακής κυτταρίνης.

Η μικροβιακή κυτταρίνη έχει ερευνηθεί ως συνδετικό υλικό στο χαρτί. Επειδή αποτελείται από εξαιρετικά μικρές συστάδες κυτταρικών ινών, προσθέτει πολύ στη δύναμη και διάρκεια του πολτού, όταν ενσωματώνεται στο χαρτί. Οι Ajinomoto Company και Mitsubishi Paper Mills στην Ιαπωνία, αυτήν την περίοδο αναπτύσσουν μικροβιακή κυτταρίνη για χάρτινα προϊόντα. Αυτό το πολυμερές είναι απλά ένα παράδειγμα, των πολλών πολυμερών που έχουν τη δυνατότητα για χρήση ως εναλλακτικά ανθεκτικά υλικά.

Η πρόσφατη επιτυχία με την κλωνοποίηση και την αλληλουχία των γονιδίων για βακτηριακή σύνθεση κυτταρίνης (Saxena, Lin και Brown 1990, 1991) και οι πληροφορίες της λειτουργικής «genomic» (Saxena et al. 1994), θα οδηγήσουν σε νέους τρόπους περαιτέρω βελτίωσης της παραγωγής βακτηριακής κυτταρίνης από «*acetobacter xylinium*», καθώς επίσης και από άλλα βακτήρια και φύκια.

Οι συνεχείς προσπάθειες για ενσωμάτωση της φυσιολογίας και μοριακής βιολογίας των βακτηριακών πολυμερών, συνδυασμένες με τη δομική και λειτουργική ανάλυση, μέσω της κρυσταλλογραφίας, θα καταστήσουν αυτά τα βακτηριακά πολυμερή ακόμη πιο ελκυστικά και προσιτά.



**Σχήμα 7.4.** Βασικά στοιχεία ενός προγράμματος για εναπόθεση μέσω προηγμένων βιολογικών διαδικασιών.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»

A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

**Πίνακας 7.1. Προτεραιότητες των προηγμένων βιολογικών επιλογών**

Περιοχή Εστίασης	Περιγραφή Τεχνολογίας	Τεχνική Εφικτικότητα	Χρόνος	Πιθανό Αποτέλεσμα	Σύνολο (υψηλότερο σκορ = υψηλή προτεραιότητα)
		4= χαμηλό ρίσκο 3= κάποιο ρίσκο 2= μεσαίο ρίσκο 1= υψηλό ρίσκο	3= <2005 2=2005-2025 1= >2025	4= πολύ υψηλό (>1 Gt/έτος) 3= υψηλό (>0,25 Gt/έτος) 2= μεσαίο (>0,1 Gt/έτος) 1= χαμηλό (<0,1 Gt/έτος)	
Αύξηση Παραγωγικότητας των Δασών	Διαχείριση	4	1	2	7
	Γενετική	2	2	3	7
	Εναπόθεση στο έδαφος	2	2	4	8
Αύξηση Γεωργικής Παραγωγικότητας	Εναπόθεση στο έδαφος	4	3	2	9
	Διαχείριση	4	3	2	9
	Καύσιμα/ χημικά/ υλικά	3	2	3	8
	Σταθεροποίηση αζώτου	2	1	4	7
Αλλαγή της Λειτουργικής Δομής των Φυτών	Τροποποίηση των κυτταρικών τοιχωμάτων των φυτών	3	2	4	9
Βιόκοσμος του εδάφους/ οικοσυστήματα	Μείωση του ποσοστού αποσύνθεσης της βιομάζας	1	2	3	6
	Μύκητες	2	2	3	7
	Σχηματισμοί άνθρακα	2	2	3	7
Μετατόπιση της Κατανομής της Φυτικής Βιομάζας στα Υπεδάφια Όργανα	Γενετική (περιλαμβάνει την μηχανική γενετική)	3	1	3	7
	Αγρονομικές πρακτικές	4	3	2	9
Αβιοτικές Πιέσεις	Ανοχή σε άλας	3	2	3	8
	Ανοχή σε ξηρασία	3	2	3	8
Επιλογές Υλικών Οδόστρωσης	Εναπόθεση	3	3	2	8
	Μετατροπή	4	3	2	9
Αντικατάσταση Υλικών με Ανανεώσιμα	Χάλυβας και σκυρόδεμα	2	3	2	7
	Πλαστικά	3	2	2	7
	Ανθεκτικά ξύλινα προϊόντα	3	3	2	8
Επίγειες Υδατοκαλλιέργειες	Εναπόθεση στη βιομάζα (ταμιευτήρας για αποθήκευση άνθρακα)	3	2	3	8
Θαλάσσιες Υδατοκαλλιέργειες	Ωκεάνια ιζήματα	2	1	3	6
	Αργή απελευθέρωση βιολίπανσης	3	2	4	9
Ένζυμα και Πρωτεΐνες	Rubisco CO <sub>2</sub> : ποσοστό σταθεροποίησης οξυγόνου	2	1	4	7
	Σταθεροποίηση αζώτου	1	1	3	5
	Μηχανική	3	2	3	8
	Αποτελεσματικότητα φωτοσυστήματος	2	2	4	8
Βιογεωχημικά	Βιογεμίσματα	2	2	3	7
	Ορυκτοποίηση	1	1	3	5
	Ενεργειακά- εξαρτώμενα χημικά	1	1	2	4

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»

A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

## 7.5. Περίληψη και Συμπεράσματα

Οι ερευνητικές προσπάθειες που οδηγούν σε συνεχή εναπόθεση γιγατόνων άνθρακα από την ατμόσφαιρα ετησίως, είναι πρωταρχικές επιλογές εναπόθεσης. Οι μεγάλης κλίμακας ευκαιρίες βιολογικής εναπόθεσης θα απαιτήσουν σημαντικό χρόνο και πόρους, ώστε να επιτευχθεί τεχνολογική εξέλιξη σε περίπου 25 χρόνια (σχήμα 7.4.). Οι βραχυπρόθεσμες μέθοδοι (πριν το 2005) έχουν χαμηλό τεχνικό ρίσκο και αρχικά θα έχουν περιορισμένα αποτελέσματα εναπόθεσης άνθρακα, αλλά με το χρόνο μπορούν να γίνουν όλο και περισσότερο μεγάλες δεξαμενές. Οι μεσοπρόθεσμες μέθοδοι χρησιμοποιούν περισσότερο προηγμένες στρατηγικές που περιλαμβάνουν σημαντικά υψηλότερο τεχνικό κίνδυνο, αλλά μπορούν να επιτρέψουν υψηλότερη ικανότητα εναπόθεσης άνθρακα, με λιγότερους πόρους. Οι μακροπρόθεσμες μέθοδοι χαρακτηρίζονται ως υψηλού κινδύνου, αλλά μπορούν να προσφέρουν αξιοπρόσεκτη δυνατότητα για εναπόθεση άνθρακα.

Ο πίνακας 7.1. ταξινομεί τις στρατηγικές που συζητήθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο, από την άποψη της τεχνικής δυνατότητας πραγματοποίησης, των χρονικών ορίων και των πιθανών αποτελεσμάτων. Η ταξινόμηση πιθανώς θα διέφερε εάν άλλοι σχετικοί παράγοντες, όπως τα οικονομικά, η δημόσια πολιτική και οι κίνδυνοι (υγεία και περιβάλλον), εξετάζονταν επίσης. Μερικές ταξινομήσεις είναι υποκειμενικές, λόγω του λάθος καθορισμένου πεδίου μερικών μεθόδων. Για παράδειγμα, η γενετική μηχανική της συγκομιδής των φυτών για την αντίσταση στην ασθένεια και τα παράσιτα, ασκείται σήμερα εμπορικά και ως εκ τούτου αυτό το επίπεδο εφαρμοσμένης μηχανικής κρίνεται να είναι ιδιαίτερα εφικτό. Από την άλλη μεριά, ο γενετικός χειρισμός των χαρακτηριστικών ανάπτυξης και διάρκειας των κωνοφόρων, ο οποίος στοχεύεται, είναι πιθανό να αποδειχθεί δύσκολος και γι' αυτό κρίνεται λιγότερο εφικτός.



## 8. ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΧΗΜΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ

Οι προηγμένες χημικές διαδικασίες μπορεί να οδηγήσουν σε μοναδικές τεχνολογίες εναπόθεσης ή σε βελτιώσεις στην κατανόηση της χημείας, που θα ενισχύσουν την απόδοση άλλων προσεγγίσεων για εναπόθεση. Η χημεία είναι μια θεμελιώδης επιστήμη που θα αναμιχθεί σε όλες ουσιαστικά τις πτυχές του προβλήματος εναπόθεσης.

Η προηγμένη χημεία μοιράζεται σημαντικό κοινό έδαφος με τον διαχωρισμό και την κατακράτηση. Οι βελτιωμένες μέθοδοι διαχωρισμού, μεταφοράς και αποθήκευσης θα επωφεληθούν από την έρευνα των προηγμένων χημικών τεχνικών, οι οποίες είναι απαραίτητες για την εξέταση της εναπόθεσης μέσω του χημικού μετασχηματισμού. Επειδή οποιαδήποτε τεχνική εναπόθεσης θα περιλαμβάνει την αποθήκευση τεράστιων όγκων υλικών πλούσιων σε άνθρακα, η περιβαλλοντική χημεία είναι μια σημαντική τεχνολογία διασύνδεσης, για τις περισσότερες από τις προσεγγίσεις που αναφέρονται. Το μέλλον του CO<sub>2</sub> στις υπόγειες γεωλογικές περιοχές αποθήκευσης, καθορίζεται εν μέρει από τη χημική αλληλεπίδραση του CO<sub>2</sub> με την περιβάλλουσα μήτρα (matrix), η οποία είτε είναι άνθρακας σε «coal – beds» είτε είναι ορυκτό πέτρωμα το οποίο καλύπτει τα αλατούχα υδροφόρα υπόγεια στρώματα μεγάλου βάθους, όπου οι άλμες του ανθρακικού οξέος μπορούν να αλληλεπιδράσουν. Πολλά ζητήματα σχετικά με την υδάτινη χημεία ανθρακικού άλατος / διανθρακικών αλάτων είναι συνδεδεμένα με την ωκεάνια ή υπόγεια διάθεση. Η χημεία ανθρακικού άλατος σε πολύ βασικές λύσεις, μπορεί να προσφέρει τη δυνατότητα για εξαγωγή του CO<sub>2</sub> από τον αέρα. Επειδή τα «clathrates» μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαχωρίσουν το CO<sub>2</sub> από τα συστήματα υψηλής πίεσης, η γνώση των ιδιοτήτων τους μπορεί να είναι σημαντική για την κατανόηση των προσεγγίσεων για ωκεάνια διάθεση. Οι αρκτικοί ή θαλάσσιοι σχηματισμοί ένυδρων ουσιών που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια, μπορούν επίσης να αξιολογηθούν ως επιλογές γεωλογικής διάθεσης. Η ενίσχυση του εδαφολογικού άνθρακα συνδυάζει τη βιολογική και περιβαλλοντική χημεία. Ομοίως, η ωκεάνια λίπανση παράγει άνθρακα βιομάζας, ο οποίος μπορεί να σχετιστεί με την ωκεάνια χημεία.

Οι περισσότερες ανθρωπογενείς εκπομπές του CO<sub>2</sub> προκύπτουν από την καύση των απολιθωμένων καυσίμων. Προηγμένες τεχνολογίες αναπτύσσονται, για να χρησιμοποιηθούν τα απολιθωμένα καύσιμα για συμπαραγωγή χημικών ουσιών μαζί με ενέργεια, συμπεριλαμβανόμενων προσεγγίσεων για απανθράκωση του μεθανίου ή του γαιάνθρακα για παραγωγή υδρογόνου. Οι υβριδικές προσεγγίσεις, οι οποίες είναι μια εναλλακτική πηγή ενέργειας, μπορούν να αναπτυχθούν για να δημιουργήσουν υδρογόνο, καθιστώντας το λογικό να χρησιμοποιηθεί το υδρογόνο και το CO<sub>2</sub> που έχει κατακρατηθεί για παραγωγή καυσίμων μεταφοράς.

Οι προηγμένες χημικές τεχνολογίες που προβλέπονται για το μέλλον, θα λειτουργούν με τεχνολογίες που αναπτύσσονται σήμερα, για να μετατρέψουν οικονομικά το CO<sub>2</sub> που έχει ανακτηθεί σε αδρανή, μακρόβια υλικά που μπορεί να περιλαμβάνονται στη γη ή στο ύδωρ του πλανήτη ή που έχουν εμπορική αξία. Οι περισσότερες από τις προηγμένες χημικές προσεγγίσεις υποθέτουν ότι οι διαδικασίες διαχωρισμού και κατακράτησης θα θέσουν διαθέσιμο CO<sub>2</sub> υπό πίεση, με ελάχιστα (και καθορισμένα) επίπεδα ακαθαρσιών, στην περιβαλλοντική θερμοκρασία (δηλ., CO<sub>2</sub> σωληνώσεων). Οι τεχνολογίες απανθράκωσης θα παράγουν μοριακό άνθρακα στον τόπο της διαδικασίας, ενώ οι προηγμένες τεχνολογίες ηλεκτρικής παραγωγή μπορεί να παράγουν ένα χωριστό ρεύμα μονοξειδίου του άνθρακα (CO), στον τόπο των εγκαταστά-

σεων, για χρήση ως αέριο πετροχημικής βιομηχανίας. Οι ενισχυμένες χημικές διαδικασίες μπορούν επίσης να διαδραματίσουν έναν ρόλο στην έμμεση κατακράτηση του CO<sub>2</sub>, μέσω των επίγειων δεξαμενών ή μέσω της ωκεάνιας λίπανσης.

Μια πιθανή προσέγγιση για εναπόθεση είναι να μετασχηματιστεί το CO<sub>2</sub> σε μη εμπορεύσιμα υλικά που είναι αδρανή και μακρόβια, όπως το ανθρακικό άλας μαγνησίου (MgCO<sub>3</sub>). Επειδή δεν έχουν καμία εμπορική αξία, τέτοια υλικά θα πρέπει να διαχωριστούν με έναν σχετικά οικονομικό τρόπο, όπως το «ξαναγέμισμα» των ορυχείων που αρχικά παρείχαν το μαγνήσιο και παραπλήσια υλικά. Μετά από μετασχηματισμό σε MgCO<sub>3</sub>, η παγκόσμια παραγωγή άνθρακα του 1990 θα μπορούσε να περιληφθεί σε έναν όγκο 10km x 10km x 150m.

Ο ωκεανός μπορεί επίσης να παρέχει μια οικονομική τοποθεσία για εναπόθεση άνθρακα. Το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα υλικό (με μορφή πάγου), αποκαλούμενο CO<sub>2</sub> «clathrate», το οποίο είναι μακρόβιο όταν βρίσκεται σε ικανοποιητικό βάθος κάτω από την ωκεάνια επιφάνεια. Μετά από μετασχηματισμό σε CO<sub>2</sub> «clathrate», η παγκόσμια παραγωγή άνθρακα του 1990 θα μπορούσε να περιληφθεί σε έναν όγκο 80km<sup>3</sup>.

Το CO<sub>2</sub>, το CO ή ο άνθρακας από την ενεργειακή παραγωγή, θα μπορούσαν επίσης να ανακτηθούν και να μετασχηματιστούν σε εμπορικά προϊόντα (π.χ., πλαστικά και λάστιχο) που είναι αδρανή και μακρόβια. Το 1996, η παγκόσμια συνολική παραγωγή όλων αυτών των προϊόντων απαίτησε περίπου 206 x 10<sup>6</sup> τόνους άνθρακα ή 3,5% του ανθρωπογενούς άνθρακα που εκπέμφθηκε κατά τη διάρκεια εκείνου του έτους (SRI 1997). Διαδοχικά, τα μαζικά προϊόντα για χρήση στις κατασκευές, για παράδειγμα, μπορεί να αντιπροσωπεύουν τους μεγαλύτερους στόχους της αγοράς.

Επιπλέον, καθώς η λεπτομερής γνώση αναπτύσσεται, οι απαιτήσεις των διάφορων μεθόδων εναπόθεσης μπορεί να οδηγήσουν στη δημιουργία τεχνικών για κατακράτηση της ουσίας των φυσικών διαδικασιών. Για παράδειγμα, υπάρχουν προτάσεις οι οποίες θα μπορούσαν να εναποθέσουν το CO<sub>2</sub> σε «seams» άνθρακα. Η έρευνα που χρειάζεται για να ερευνηθεί αυτή τη δυνατότητα, θα στηριχθεί στη δυνατότητα για απορρόφηση του CO<sub>2</sub> σε άλλα υλικά, τα οποία θα μπορούσαν να παρέχουν προσωρινή αποθήκευση. Τέτοια υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάκτηση του CO<sub>2</sub> από την εξάτμιση των αυτοκινήτων ή άμεσα από την ατμόσφαιρα. Ως ένα άλλο παράδειγμα, η γνώση των χημικών τεχνικών «biomimetic» – τα οποία είναι ουσιαστικά πρότυπα βιολογικών διαδικασιών – μπορεί να επιτρέψει την αναπαραγωγή αυτών των διαδικασιών κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες και τη βελτίωση, ώστε να ενισχυθεί το ποσοστό αντίδρασης ή να μειωθεί η δημιουργία ανεπιθύμητων ή επικίνδυνων υποπροϊόντων.

## 8.1. Χημικές Διαδικασίες για την Εναπόθεση

Η οργανική χημεία είναι πολύ εύκαμπτη και έχει βοηθήσει στη δημιουργία μιας εντυπωσιακής σειράς προϊόντων. Πολλές χημικές μέθοδοι υπάρχουν για την κατακράτηση και εναπόθεση ή επαναχρησιμοποίηση του άνθρακα. Εντούτοις, μερικές απαιτούν τόσο πολύ ενέργεια ή καταναλώνουν τόσο πολύ πρώτη ύλη, όσο η αρχική διαδικασία η οποία εξέπεμψε τον άνθρακα. Το εάν μια διαδικασία αντιπροσωπεύει μια επιθυμητή επιλογή, ποικίλει ανάλογα με τις οικονομικές συνθήκες και με τις τοποθετήσεις της κοινωνίας. Κατά συνέπεια, είναι σημαντικό να προσδιοριστεί ένας αριθμός προσεγγίσεων που προσφέρει ένα εύκαμπτο μίγμα επιλογών. Οι μέθοδοι που επιλέγονται πρέπει να ικανοποιούν τα ακόλουθα κριτήρια:

- Μια διαδικασία πρέπει να είναι περιβαλλοντικά ασφαλής

- Πρέπει να είναι σταθερή και βιώσιμη για μακροπρόθεσμη αποθήκευση ή διάθεση
- Πρέπει να είναι ασφαλής
- Πρέπει να είναι οικονομικά ανταγωνιστική, με εναλλακτικές προσεγγίσεις για εναπόθεση ή αποφυγή
- Η ικανοποιητική γνώση της διαδικασίας, όπως η θερμοδυναμική και η κινητική, πρέπει να αναπτυχθεί για να επιτραπεί η περιεκτική ανάλυση
- Πρέπει εκ πρώτης όψεως να φαίνεται λογική, ιδιαίτερα από την άποψη της ενεργειακής ισορροπίας

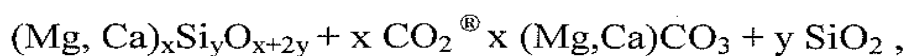
Προσδιορίζονται δύο ομάδες χημικών διαδικασιών : α) αυτές που παράγουν υλικά για εναπόθεση και β) αυτές που παράγουν χρήσιμα προϊόντα πιθανής εμπορικής αξίας. Για κάθε επιλογή, οι σημαντικές ερευνητικές ανάγκες περιλαμβάνουν: α) κατανόηση των βασικών απαιτήσεων χημείας και χημικής μηχανικής, β) ανάπτυξη διαδικασιών, βελτιστοποίηση, κλιμάκωση και περιβαλλοντικός έλεγχος και γ) ζητήματα συστημάτων περιβαλλοντικών και οικολογικών επιπτώσεων και οικονομική αποδοχή.

### A) Αδρανείς και Ασφαλείς Μορφές Μακροπρόθεσμης Αποθήκευσης

Ένας από τους στόχους αυτής της προσπάθειας είναι να σχεδιαστούν διαδικασίες οι οποίες βασίζονται στη χημεία και οι οποίες μπορούν να μετατρέψουν το CO<sub>2</sub> που έχει διαχωριστεί και κατακρατηθεί σε προϊόντα κατάλληλα για μακροπρόθεσμη και περιβαλλοντικά αποδεκτή αποθήκευση. Είναι σημαντικό αυτές οι επιλογές να είναι οικονομικά ανταγωνιστικές με άλλες προσεγγίσεις εναπόθεσης, όταν εκτελούνται στην απαιτούμενη μαζική κλίμακα, για να έχουν σημαντικό ανταγωνιστικό πλεονέκτημα έναντι των ποσοστών παραγωγής CO<sub>2</sub>. Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στην εφαρμογή των φυσικών χημικών μετασχηματισμών του CO<sub>2</sub>, όπως η διάβρωση των πετρωμάτων για να σχηματιστούν ανθρακικά άλατα ασβεστίου ή μαγνησίου και η διάλυση του CO<sub>2</sub> στο νερό της θάλασσας για να παραχθούν ιόντα διανθρακικών αλάτων. Αυτές οι δυο εξώθερμες αντιδράσεις εμφανίζονται «αυθόρμητα» στη φύση. Παραδείγματα τέτοιων προϊόντων αποτελούν τα ανθρακικά άλατα (CaCO<sub>3</sub> / MgCO<sub>3</sub>), το διανθρακικό άλας (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), τα «clathrates» (CO<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O) και τα «oxalate» (CaC<sub>2</sub>O<sub>4</sub> / MgC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>). Ο πίνακας 8.1. παρουσιάζει στοιχεία για τις χημικές αντιδράσεις κλειδιά. Μέθοδοι για να παραχθούν καύσιμα, όπως η μεθανόλη, απαιτούν αέριο υδρογόνου. Ο συνδυασμός της αντίδρασης σύνθεσης μεθανόλης και της αντίδρασης παραγωγής υδρογόνου δείχνει ότι η συνδυασμένη διαδικασία θα απαιτούσε εισαγωγή υψηλών ποσών καθαρής ενέργειας.

Παρουσιάζονται τέσσερις προσεγγίσεις για αυτές τις διαδικασίες:

1. Η μετατροπή των φυσικών μεταλλευμάτων πυριτικού άλατος από το CO<sub>2</sub>, για παραγωγή γεωλογικά σταθερών μεταλλευμάτων ανθρακικού άλατος και πυριτίου,



είναι θερμοδυναμικά ευνοϊκή, όπως φαίνεται και από τη φυσική διάβρωση των πυριτικών αλάτων, αν και σε γεωλογικό ρυθμό. Η τρέχουσα γνώση για αυτήν την αντίδραση δείχνει ότι είναι εξώθερμη, ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί σε διάφορα στάδια και ότι αρκετές πρώτες ύλες είναι διαθέ-

σιμες για την παροχή των πυριτικών αλάτων που απαιτούνται. Η πρόκληση είναι να σχεδιαστούν οι συνθήκες θερμοκρασίας του μέσου αντίδρασης και η διαμόρφωση του αντιδραστήρα, οι οποίες θα επιτρέψουν σε αυτήν την μετατροπή να πραγματοποιηθεί ικανοποιητικά γρήγορα. Ένα παράδειγμα που μελετάται αυτήν την περίοδο είναι η χρήση ενός ένυδρου ρευστού άλατος  $MgCl_2$  με μια ελικοειδή ορυκτή ουσία, στην οποία το  $HCl / Cl^-$  εμφανίζεται να διαδραματίζει καταλυτικό ρόλο. Θα πρέπει να εξεταστούν νέα προγράμματα, τα οποία επιτρέπουν στις βασικές μετατροπές να ολοκληρωθούν σε ένα ενιαίο στάδιο, με μεγαλύτερη ταχύτητα και με προσιτά κόστη. Τα θέματα που απαιτούν μελέτη περιλαμβάνουν α) το μηχανισμό και τις κινητικές για την αντίδραση αερίου – στερεού, καθώς επίσης και τους καταλύτες ή / και τα μέσα αντίδρασης για να την προωθήσουν, β) τη θερμοδυναμική και τις κινητικές για τις αντιδράσεις αερίου – ρευστού άλατος και τη χημεία χλωριδίου, γ) σχέδια για την κατανάλωση στερεών, τους αντιδραστήρες που παράγουν στερεά, τον έλεγχο της φυσικής μορφής των στερεών προϊόντων για βελτιστοποίηση της επεξεργασίας και τον έλεγχο διάβρωσης και δ) οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις της μεταλλείας των πυριτικών αλάτων, της διάθεσης στην επιφάνεια των προϊόντων ανθρακικού άλατος / πυριτίου και των μεταλλικών προϊόντων, τα οποία μπορούν παράλληλα να προσφέρουν οικονομικά οφέλη.

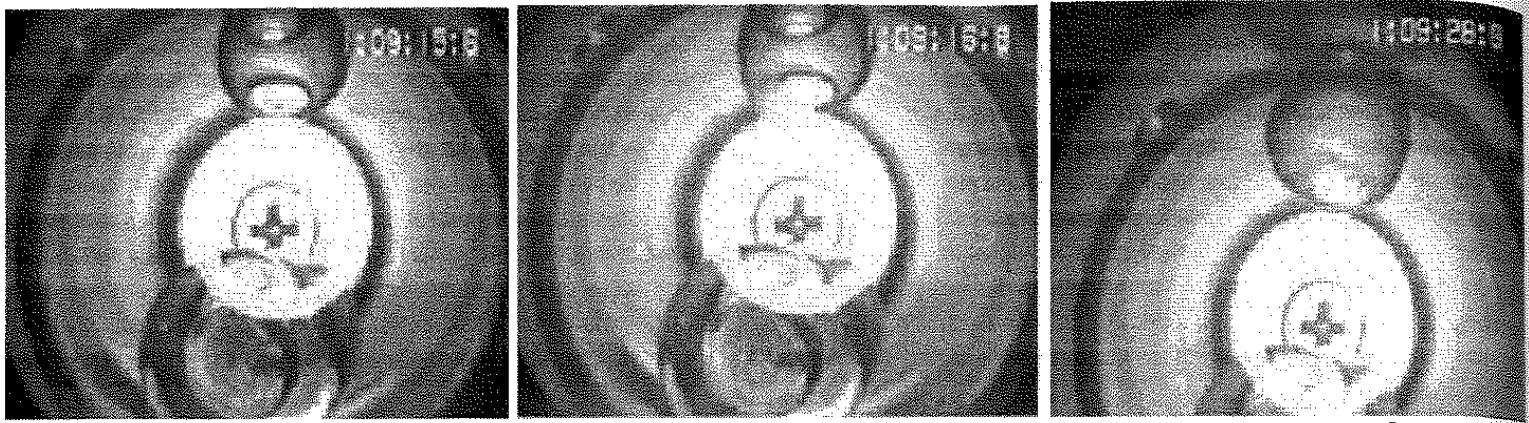
2. Ένα δεύτερο χημικό σύστημα είναι η διάλυση του  $CO_2$  στους ωκεανούς (ή άλλα φυσικά ύδατα) ως διανθρακικό άλας,



συνδυασμένο με την ανάγκη για μια πηγή προστιθέμενου αλκαλίου, ώστε να αποφευχθεί η μείωση του pH των υδάτων. Αυτή η μέθοδος είναι σημαντική και για την εναπόθεση στους γεωλογικούς σχηματισμούς και για την ωκεάνια εναπόθεση. Το  $CO_2$  μπορεί απλά να διατεθεί στον ωκεανό, όπου το μεγαλύτερο μέρος του θα παρέμενε ως διαλυμένο αέριο, ανθρακικό οξύ και ιόν διανθρακικού άλατος, εάν είχε εγχυθεί αρκετά βαθιά κάτω από την επιφάνεια. Το ιόν διανθρακικού άλατος μπορεί να δημιουργηθεί μέσω ανάπτυξης παρόμοιων βιολογικών συνθηκών στα συστήματα που δημιουργεί ο άνθρωπος και να διατεθεί σε κοντινά στην ακτή ρηχά ύδατα, υποθέτοντας ότι θα μπορούσαν να του παρασχεθούν τα αναγκαία κατιόντα. Το τρέχον επίπεδο κατανόησης της διαδικασίας της διάλυσης και της αντίδρασης είναι ανεπαρκές για να επιτρέψει την ανάπτυξη μιας διαδικασίας με τη δυνατότητα να εναποτεθεί το  $CO_2$  σε ποσοστό παρόμοιο με αυτό που παράγεται αυτήν την περίοδο στις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας. Η έρευνα για τη χρήση διανθρακικού άλατος για εναπόθεση του  $CO_2$  πρέπει να εξετάσει: α) την ωκεάνια, γλυκού ύδατος και ηλεκτρολυτών χημεία, την επιρροή των στερεών επιφανειών και την καθίζηση των ανθρακικών αλάτων, β) τον σχεδιασμό αντιδραστήρων και εγχυτήρων για αποδοτικότερη μίξη των αντιδρώντων, γ) τις επιπτώσεις των ενισχυμένων επιπέδων διανθρακικού άλατος στην υδρόβια ζωή και την οικολογία και στον σχηματισμό αποθεμάτων ανθρακικών αλάτων μέσω προηγμένων βιολογικών προσεγγίσεων, δ) τα ποσοστά μεταφοράς από την ατμόσφαιρα στον ωκεανό, ε) τα ποσοστά της αναμενόμενης ανάπτυξης των υποψήφιων οργανισμών για κατακράτηση του  $CO_2$  και στ) τις βιολογικές μεθόδους για να διαμορφωθεί το ανθρακικό άλας ασβεστίου, συμπεριλαμβανομένης της διαδικασίας που θα παρέχει το απαραίτητο ασβέστιο για την αντίδραση.

3. Τα «clathrates» του CO<sub>2</sub> και του H<sub>2</sub>O (σχήμα 8.1.), δομικά ανάλογα με την καλύτερη γνωστή ένυδρη ουσία μεθανίου, μπορεί να προσφέρουν τη δυνατότητα μιας μεγάλης κλίμακας αποθήκευσης στους «κρύους» ωκεανούς ή σε κατασκευασμένα από τον άνθρωπο συστήματα, τα οποία «μιμούνται» τις απαραίτητες συνθήκες. Τα «clathrates» μπορεί να χρησιμοποιηθούν στον διαχωρισμό του CO<sub>2</sub> από συστήματα υψηλής πίεσης και οι ιδιότητές τους μπορεί να είναι σημαντικές για την κατανόηση και της ωκεάνιας και της γεωλογικής διάθεσης. Η διαμόρφωση των «clathrates» ως ένα βήμα διαχωρισμού σε μια εγκατάσταση αεριοποίησης συνδυασμένου κύκλου θα μπορούσε να είναι ελκυστική. Προκαταρκτικές εκτιμήσεις της απαιτούμενης ενέργειας δείχνουν ότι 3 με 4% της ολικής ενέργειας της εγκατάστασης θα απαιτείται. Αυτό αποτελεί βελτίωση, σε σχέση με τις τεχνικές οι οποίες είναι διαθέσιμες σήμερα. Με βάση όσα είναι γνωστών μέχρι σήμερα, επιπρόσθετη έρευνα θα απαιτηθεί για: α) βελτίωση του καθορισμού των διαγραμμάτων φάσης, της θερμοδυναμικής και των φυσικών ιδιοτήτων του συστήματος CO<sub>2</sub> - H<sub>2</sub>O σε υψηλές πιέσεις, με παρουσία ηλεκτρολυτών και ακαθαρσιών που βρίσκονται στον ωκεανό, καθώς επίσης και βελτίωση του καθορισμού της κινητικής του σχηματισμού και της μακροπρόθεσμης σταθερότητας των «clathrates», β) προσδιορισμό πρακτικών μεθόδων για βαθιά ωκεάνια έγχυση και μίξη και γ) αξιολόγηση των τοπικών οικολογικών επιδράσεων που θα έχει ο σχηματισμός ένυδρων ουσιών. Περαιτέρω εξερεύνηση είναι απαραίτητη για να καθορίσει αν, μακροπρόθεσμα, η διάθεση του CO<sub>2</sub> μέσω του σχηματισμού των «clathrates» θα μπορούσε να συνδεθεί με την ανάκτηση καυσίμων μεθανίου από τα αποθέματα ένυδρων ουσιών μεθανίου στους ωκεανούς.
4. Εκτός από αυτά τα προγράμματα, ερευνείται ο καθορισμός πρόσθετων καταστάσεων άνθρακα χαμηλής ενέργειας για διάθεση. Παραδείγματα περιλαμβάνουν τους «formats» και τους «oxalates». Επειδή το CO<sub>2</sub> είναι ένα όξινο αέριο, μπορεί να κατακρατηθεί με τη χρήση μιας αλκαλικής ουσίας, ώστε να σχηματιστεί μια σταθερή ένωση. Μια διαδικασία που χρησιμοποιεί 1 mole αλκαλίου για να μετασχηματίσει 2 moles CO<sub>2</sub> – όπως στον μετασχηματισμό του CO<sub>2</sub> από χαμηλής ενέργειας πολυανθρακικές ενώσεις, όπως «oxalate» ασβεστίου / μαγνησίου (CaC<sub>2</sub>O<sub>4</sub> / MgC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) – είναι επιθυμητή λόγω της μεγαλύτερης αναλογίας CO<sub>2</sub> – αλκαλίου. Οι ερευνητικές ανάγκες περιλαμβάνουν α) ανάπτυξη μεθόδων για σύνθεση αλκαλικών ενώσεων οι οποίες μπορούν να αναπαραχθούν και για αποτελεσματική χρήση αλκαλίου, β) χρήση μοριακής μοντελοποίησης για προσδιορισμό νέων ενώσεων, στις οποίες 1 mole ενός αλκαλικού είδους θα μετασχημάτιζε αρκετά moles του CO<sub>2</sub> (Zeissel 1998), γ) εξερεύνηση των συνολικών ενεργειακών απαιτήσεων-οι οποίες περιλαμβάνουν την ενέργεια για τις χημικές αντιδράσεις, καθώς και για τις χημικές διαδικασίες- και για τις εξώθερμες αντιδράσεις που περιλαμβάνουν CO<sub>2</sub> και για τις ενδόθερμες που απαιτούν εισαγωγή ενός μικρού ποσού ενθαλπίας, δ) έρευνα για τις αντιδράσεις κατάλυσης, τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας, τα ζητήματα διάθεσης στην επιφάνεια και τις περιβαλλοντικές ανησυχίες. Τέλος, θα απαιτούνταν μελέτες μηχανικής και αξιολόγηση των συστημάτων.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
«Carbon Sequestration, State of the Science»  
A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)



**Σχήμα 8.1.** Μίγματα αερίων «clathrates» έχουν βρεθεί κοντά σε ακτές σε όλο τον κόσμο. Αυτές οι ένυδρες ουσίες αερίου μπορεί να είναι μίγματα «clathrates» μεθανίου και «clathrates» του CO<sub>2</sub>. Σε αυτήν την περίπτωση, η παρουσία τους απαιτεί περαιτέρω έρευνα για το εάν θα μπορούσαν οι CO<sub>2</sub> «clathrates» να εναποτεθούν στις ίδιες θέσεις. Οι φωτογραφίες δείχνουν τον σχηματισμό ενός αερίου «clathrate», κατά τη διάρκεια ενός πειράματος.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
«Carbon Sequestration, State of the Science»

*A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)*

## B) Προϊόντα από τη Χρήση Διοξειδίου του Άνθρακα

Ο στόχος της χρήσης του CO<sub>2</sub> είναι να σχεδιαστούν χημικές διαδικασίες, οι οποίες μπορούν να μετατρέψουν το CO<sub>2</sub> που έχει διαχωριστεί και κατακρατηθεί σε χρήσιμα και ανθεκτικά προϊόντα με αποδεκτή διάρκεια ζωής (δεκάδες έως εκατοντάδες χρόνια). Το διοξείδιο του άνθρακα, είτε ολόκληρο είτε ένα μέρος του, μπορεί να συμμετέχει σε πολλές χημικές αντιδράσεις. (Σχήμα 8.2.)

Τέτοιες στρατηγικές χρησιμοποίησης, όταν εξετάζονται από την οπτική της πετροχημικής βιομηχανίας, δε θα έχουν την ικανότητα να χειριστούν τον όγκο του εκπεμπόμενου CO<sub>2</sub>. Ωστόσο, τα προϊόντα και τα ανθεκτικά αγαθά που παράγονται, μπορεί να έχουν μεγαλύτερη αξία και διάρκεια ζωής της αποθήκευσης και μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, από ότι τα υπάρχοντα μέσα για παραγωγή αυτών των ίδιων προϊόντων. Πρόσθετες αγορές θα μπορούσαν να αναπτυχθούν, αν η έρευνα κατευθυνόταν προς τη δημιουργία προϊόντων με μεγάλες ετήσιες χρήσεις, όπως τα δομικά υλικά ή τα ανταλλακτικά αυτοκινήτων (βλ. την μπάρα για τη χρήση του άνθρακα στα υπερβολικά ελαφριά οχήματα). Εντούτοις, διαδεδομένη χρήση των προϊόντων με βάση τον άνθρακα θα απαιτούσε μεγάλη αλλαγή της υποδομής και θα αντιμετώπιζε δύσκολο ανταγωνισμό από τις βιομηχανίες που κατασκευάζουν τα προϊόντα τα οποία θα αντικαθιστούσαν.

Τέσσερις τελικές χρήσεις που θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν ως ενισχυτικές για μια συγκεκριμένη τεχνολογία είναι:

- Άνθρακας, πιθανών από την απανθράκωση του μεθανίου, θα μπορούσε να μετατραπεί σε νέα σύνθετα υλικά και να χρησιμοποιηθεί σε ανθεκτικά δομικά υλικά, όπως το σκυρόδεμα. Η πρόκληση είναι να βρεθούν οικονομικά βιώσιμες μέθοδοι μετατροπής του στερεού άνθρακα σε ανθεκτικά υλικά και νέα συνθετικά. Ένα σχετικό ζήτημα, είναι τα φυσικά χαρακτηριστικά του παρεχόμενου άνθρακα, υποθέτοντας ότι ο άνθρακας προέρχεται από διαδικασίες απανθράκωσης των καυσίμων. Επιστημονικές και τεχνολογικές ικανότητες απαιτούνται για να καθορισθούν οι χημικές διαβάσεις από τους υδρογονάνθρακες σε στερεό άνθρακα, να ανακαλυφθεί νέα χημεία συνθετικών και να κατανοηθεί ο τρόπος ενσωμάτωσης του άνθρακα σε νέα οικοδομικά υλικά. Συγκεκριμένα,



κριμένες ανάγκες περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό α)θερμοχημικών διαδικασιών, β)νέων καταλυτών και αντιδρώντων και γ)εναλλακτικών πηγών καυσίμων. Η διάρκεια ζωής του προϊόντος είναι μια βασική μεταβλητή που εξετάζεται κατά την ανάλυση κύκλου ζωής και την ανάλυση κόστους και απόδοσης του συστήματος.

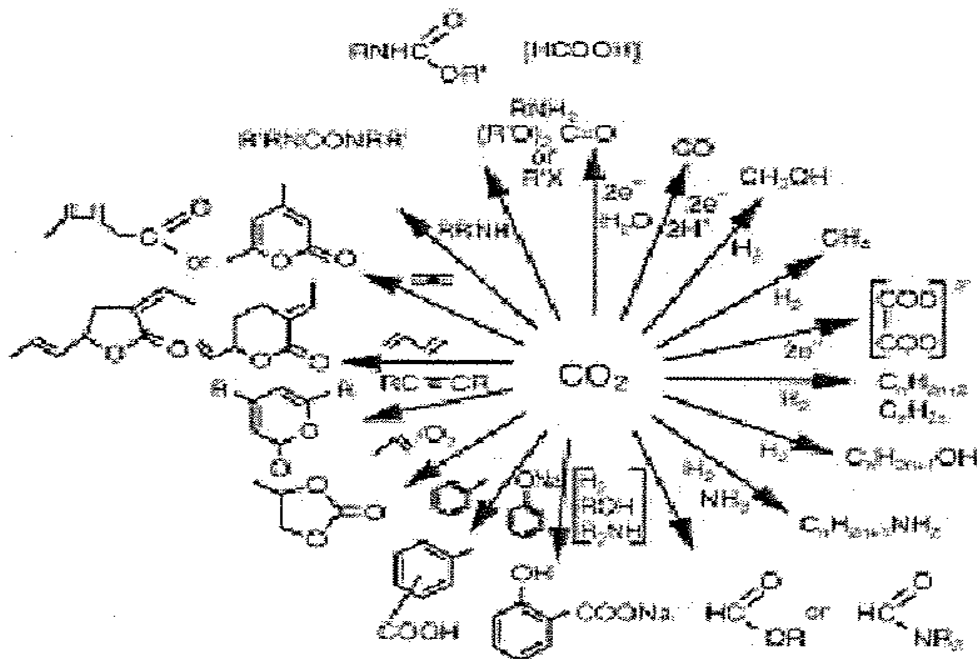
- Πολλές μελέτες έχουν εξετάσει την ανάγκη να προσδιοριστούν τρόποι χρήσης του CO<sub>2</sub> ως αέριο πετροχημικής βιομηχανίας άνθρακα, για την παραγωγή πλαστικών ή άλλων παρόμοιων προϊόντων. Οι αναγκαίες επιστημονικές και τεχνολογικές ικανότητες περιλαμβάνουν α)τον καθορισμό χημικών αντιδράσεων, β)την ανάπτυξη καταλυτών και γ)την διαδικασία βελτιστοποίησης και ανάπτυξης. Έναν σημαντικό περιβαλλοντικό οδηγό αποτελεί η αντικατάσταση του CO<sub>2</sub> από τοξικές ουσίες όπως το «phosgene», το οποίο χρησιμοποιείται ως αέριο πετροχημικής βιομηχανίας για την παραγωγή ισοκυανικών αλάτων, πολυανθράκων και άλλων προϊόντων χρήσιμων στις βιομηχανικές διαδικασίες. Η έρευνα έχει ανακαλύψει τον δρόμο για να είναι αυτή η αντικατάσταση εξώθερμη, υπονοώντας ότι πιο ασφαλείς επεξεργασίες μπορεί να είναι επίσης και πιο αποδοτικές οικονομικά. Η διάρκεια ζωής των προϊόντων πρέπει να αξιολογηθεί, αλλά έχει γίνει η υπόθεση ότι θα είναι περίπου από μερικά δεκάδες έως εκατοντάδες έτη. Μια άλλη προσέγγιση μπορεί να είναι η μερική οξείδωση (μέσω αεριοποίησης) για να παραχθεί ενέργεια και CO, το οποίο θα μπορούσε να χρησιμεύσει ως αέριο πετροχημικής βιομηχανίας για τις χημικές αντιδράσεις.
- Εναλλακτικά, μπορεί να είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ο άνθρακας είτε από τα καύσιμα είτε από τα προϊόντα της διαδικασίας καύσης, για τροποποίηση του εδάφους ώστε να ενισχυθεί η εναπόθεση του άνθρακα στα φυσικά συστήματα. Παρόμοιες τεχνικές ανησυχίες υπάρχουν για, παραδείγματος χάριν, το πώς θα βελτιστοποιηθούν αυτά τα προϊόντα για την επιθυμητή τελική τους χρήση. Εντούτοις, οι απαιτήσεις για επίτευξη καθαρού προϊόντος και για αποφυγή των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, διαφέρουν.
- Τέλος, πολλή προσοχή έχει στραφεί στις διαδικασίες «ουδέτερου» άνθρακα, στις οποίες τα καύσιμα και οι χημικές ουσίες διαμορφώνονται από τα αέρια πετροχημικής βιομηχανίας του CO<sub>2</sub> μέσω μεθόδων που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επιστημονικές και τεχνολογικές ικανότητες θα απαιτηθούν για να προσδιορίσουν νέους καταλύτες, ηλεκτροκαταλύτες και αποδοτικούς αντιδραστήρες. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση απαιτεί μια πηγή φτηνού υδρογόνου, για να αντιδράσει με το CO<sub>2</sub>. Σχέδια έχουν προταθεί για να διασπάσουν το νερό ώστε να παρέχουν μια πηγή υδρογόνου. Η άμεση χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο, σαν εναλλακτική λύση για την αντίδραση του υδρογόνου με το CO<sub>2</sub>, πρέπει να εξεταστεί μέσω της αξιολόγησης των δαπανών και των κερδών των συστημάτων. Γενικά, το θέμα της εναπόθεσης ή μη πρέπει να εξεταστεί με προσοχή στην επεξεργασία ουδέτερου άνθρακα.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
«Carbon Sequestration, State of the Science»

*A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)*

*Χρήση του Άνθρακα στα Υπερβολικά Ελαφριά Οχήματα.* Το Rocky Mountain Institute έχει εκτελέσει διάφορες αναλύσεις για την ανάπτυξη Ultralite οχημάτων. Τον Δεκέμβριο του 1996, δημοσίευσε μια έκθεση με τίτλο «Costing the Ultralite in Volume Production: Can Advanced – Composite Bodies – in – White be Affordable?» (Mascarin et al. 1996), η οποία εξετάζει τη χρήση μιας ίνας άνθρακα σε ένα

Ultralite όχημα ή ένα υπεραυτοκίνητο. Το σώμα του αυτοκινήτου θα αποτελείται από μέρη που κατασκευάζονται από προηγμένα πολυμερή συνθετικά και συγκολλούνται με κόλα. Τα συνθετικά θα μπορούσαν να κατασκευάζονται από ίνες άνθρακα ενσωματωμένες με μια εποξική ή άλλη ρητίνη. Οι ίνες άνθρακα θα μπορούσαν να κατέχουν περίπου 50% του συνολικού βάρους. Το τυπικό υπεραυτοκίνητο που κατασκευάστηκε από αυτά τα υλικά είχε βάρος 637 kg, εκ των οποίων περίπου 190 kg είναι το βάρος του συνθετικού σώματος. Εάν ο άνθρακας από τον κύκλο των καυσίμων χρησιμοποιούταν για να δημιουργήσει τα προϊόντα που απαιτήθηκαν για την κατασκευή ενός τέτοιου οχήματος, κάθε κυψελίδα του σώματος θα περιείχε 100 – 150 kg άνθρακα. Η έκθεση αναλύει το κόστος της ίνας άνθρακα από την πλευρά του μεγέθους της αγοράς που απαιτείται για να εξασφαλίσει χαμηλότερο κόστος για τα υλικά που χρειάστηκαν – αγορά περίπου 0,6 έως 0,9 εκατομμυρίων αυτοκινήτων με ίνες άνθρακα ετησίως. Εάν υποθεθεί ότι όλος ο άνθρακας που χρειάστηκε για ένα τέτοιο σώμα αυτοκινήτου, θα μπορούσε να προέλθει είτε από απανθράκωση καυσίμων είτε από προϊόντα που κατασκευάστηκαν από CO ή CO<sub>2</sub> τα οποία κατακρατήθηκαν αφού όλη η ένα μέρος της χημικής ενέργειας χρησιμοποιήθηκε για παραγωγή ενέργειας, τότε αυτή η αγορά μπορεί να απαιτήσει αρκετό άνθρακα ώστε να κατασκευάσει περίπου 750.000 αυτοκίνητα ανά έτος (κάθε αυτοκίνητο απαιτεί 125 kg άνθρακα). Αυτή η χρήση αντιπροσωπεύει περίπου 100.000 άνθρακα ετησίως. Συνολικά 750.000 αυτοκίνητα ετησίως θα αντιπροσώπευαν περίπου 10% της αγοράς νέων αυτοκινήτων των ΗΠΑ.



**Σχήμα 8.2.** Τρόποι για χρήση του CO<sub>2</sub> στη χημεία συνθετικών  
 Πηγή: Aresta 1998

## 8.2. Προώθηση των Χημικών Τεχνολογιών

Στις προηγούμενες παραγράφους αυτού του κεφαλαίου περιγράφηκαν οι χημικές πτυχές της εναπόθεσης του CO<sub>2</sub> για ωκεάνια αποθήκευση ως διανθρακικά άλατα και «clathrates», για αποθήκευση στο έδαφος ως στερεά ανθρακικά άλατα αλκαλίου· περιγράφηκαν επίσης οι διαγώνιες ενώσεις στις οποίες ένα απλό κατιόν κατακρατεί διάφορα μόρια του CO<sub>2</sub> και την αποθήκευση σε ανθεκτικά υλικά όπως τα πλαστικά, τα συνθετικά και τις χημικές ουσίες. Σημαντικές εξελίξεις στην προώθηση της

επιστήμης και των σχετικών τεχνολογιών απαιτείται για να υποστηριχθούν αυτά τα προγράμματα. (Σχήμα 8.3.). Μερικές διαδικασίες θα βοηθηθούν σημαντικά με τη βελτίωση των υπολογιστικών ικανοτήτων σχετικών με τη μοριακή μοντελοποίηση για ανάπτυξη νέων τρόπων σύνθεσης ούτως ώστε να δημιουργηθούν προϊόντα με βάση τον άνθρακα, ή για ανάπτυξη βελτιωμένων διαλυτών για την κατακράτηση του άνθρακα από τα αέρια σωλήνα. Πολλές από αυτές τις δυνατότητες βρίσκονται ήδη υπό ανάπτυξη για να υποστηρίξουν τη δημιουργία νέων ενεργειακών και περιβαλλοντικών τεχνολογιών. Ένας κατάλογος των τεχνολογιών που απαιτούνται παρουσιάζεται παρακάτω:

- Ανάπτυξη καταλυτών απαιτείται για να ενισχυθεί η γεωλογική εναπόθεση, η χρήση του άνθρακα που βρίσκεται στο CO<sub>2</sub> και η απανθράκωση (π.χ. «μίμηση» της φωτοσύνθεσης, χρήση του TiO<sub>2</sub> και του ηλιακού φωτός για διάσπαση του CO<sub>2</sub>).
- Ανάπτυξη νέων διαλυτών και απορροφητικών για διαχωρισμό αερίου (O<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα ή CO<sub>2</sub> από τα αέρια σωλήνα).
- Λεπτομερής κατανόηση της χημείας που είναι σημαντική στην προσρόφηση του CO<sub>2</sub> και στην εκρόφηση του μεθανίου από τις πηγές άνθρακα.
- Εξερεύνηση νέων φόρμουλων για λιπάσματα που εφαρμόζονται για ενίσχυση των προγραμμάτων γεωλογικής ή ωκεάνιας εναπόθεσης.
- Δημιουργία μεμβρανών και λεπτών ταινιών για προηγμένους διαχωρισμούς (π.χ. υψηλής θερμοκρασίας κεραμικές μεμβράνες για διαχωρισμό του αέρα).
- Βελτίωση των υλικών υψηλής θερμοκρασίας, ιδιαίτερα των μεταλλικών οξειδίων (π.χ. κύκλοι BaO και BaO<sub>3</sub> για υψηλής θερμοκρασίας διαχωρισμό, ή NiO ή CoO αναμειγνυόμενα με «zirconia» για την επαναλαμβανόμενη χημική καύση).
- Έρευνα για νέους αντιδραστήρες και τους απαραίτητους αισθητήρες.

Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,  
«Carbon Sequestration, State of the Science»

*A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)*

Η ανάπτυξη βελτιωμένων καταλυτών και νέων υλικών είναι ιδιαίτερα σημαντική.

**Κατάλυση.** Η ανάπτυξη αποτελεσματικών καταλυτών, ικανών για χημεία πολλαπλών ηλεκτρονίων είναι η σημαντικότερη πρόκληση για δημιουργία μιας αποτελεσματικής τεχνολογίας για μείωση του CO<sub>2</sub>. Ιδιαίτερη επιτυχία έχει επιτευχθεί στο σχεδιασμό, τη σύνθεση και την ανάλυση των δεκτών και αποδεκτών που είναι ικανοί για διαδικασίες διαχωρισμού ενός ηλεκτρονίου. Η τρέχουσα έρευνα δείχνει ότι εντυπωσιακά ενισχυμένες καταλυτικές αποδοτικότητες επιτυγχάνονται στα φυσικά και τεχνητά φωτοχημικά συστήματα, με τη χρήση οξειδοαναγωγικής χημείας. Οξειδοαναγωγικές συγκεντρώσεις που μιμούνται τη βιολογική διαδικασία της μείωσης του CO<sub>2</sub> κατά τη φωτοσύνθεση, θα μπορούσαν να παρέχουν ένα φωτοηλεκτροχημικό σύστημα το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει το CO<sub>2</sub> ως αέριο πετροχημικής βιομηχανίας για σύνθεση χημικών ουσιών βασισμένων στον άνθρακα. Νέοι καταλύτες θα απαιτηθούν για να ενισχύσουν τα ποσοστά σχηματισμού των ανθρακικών αλάτων αλκαλίου και των «oxalates». Πρόσθετες ουσίες οι οποίες θα μπορούσαν να ενισχύσουν τη γεωλογική εναπόθεση του CO<sub>2</sub>, είναι επίσης αναγκαίες. Αυτά τα υλικά θα εγχείονταν με το CO<sub>2</sub> ώστε κατά τη διάρκεια του χρόνου, για παράδειγμα μετά από πέντε έτη, να αρχίσουν να αντιδρούν με αυτό και να σφραγίσουν τη δεξαμενή μειώνοντας έτσι την πιθανότητα διαρροής.

*Νέα υλικά.* Νέα υλικά απαιτούνται για να χειριστούν τις ακραίες συνθήκες της διαδικασίας των ρευστών αλάτων. Χημικές προσεγγίσεις (π.χ. οξειδίο βαρίου και υπεροξειδίο βαρίου) για διαχωρισμό του αέρα ή την επαναλαμβανόμενη χημική καύση (οξειδία του νικελίου ή του κοβαλτίου που αναμιγνύονται με «zirconia») πρέπει να μελετηθούν, επειδή μπορούν να εκμεταλλευτούν τις υψηλές θερμοκρασίες των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας. Οι διαδικασίες σύνδεσης και συσσώρευσης πρέπει να καθοριστούν και για την επεξεργασία των προϊόντων άνθρακα και για άλλες χρήσεις, όπως η κατακράτηση του CO<sub>2</sub> από τα οχήματα. Παραδείγματος χάριν, υλικά όπως λίθιο «zirconate» μπορεί να είναι καλοί απορροφητές του CO<sub>2</sub> και για αυτό να επιτρέπουν την κατακράτηση μέρους του CO<sub>2</sub> από τις εκπομπές οχημάτων, μια έως τώρα παραμελημένη προσέγγιση που αξίζει μια παρατεταμένη και υψηλού κινδύνου έρευνα. Ένα άλλο παράδειγμα είναι τα σύνθετα υλικά που μπορεί να προκύψουν από την προσθήκη άνθρακα στα πλαστικά, τα πολυμερή, τα γυαλιά, τα τσιμέντα και τα κεραμικά και το οποίο πρέπει να μελετηθεί.

### 8.3. Γενικά

Αξίζει να αναφερθούν τρεις προσεγγίσεις για εναπόθεση άνθρακα, χρησιμοποιώντας προηγμένες χημικές τεχνολογίες:

1. Ανάπτυξη ασφαλών υποπροϊόντων για διάθεση. Αυτή η οδός μπορεί να προσφέρει τη δυνατότητα να εναποτεθούν μεγάλες ποσότητες (γίγατόνοι) ανθρωπογενούς άνθρακα.
2. Παραγωγή εμπορικών προϊόντων. Αυτό το θέμα πιθανώς αντιπροσωπεύει μια μικρότερη δυνατότητα (εκατομμύρια τόνων), αλλά μπορεί να οδηγήσει σε παράλληλα οφέλη που αφορούν την πρόληψη της ρύπανσης.
3. Διεύθυνση των μελετών που μπορούν να δώσουν τη δυνατότητα στις υπό ανάπτυξη τεχνολογίες άλλων περιοχών εστίασης, να εκπληρώσουν τον στόχο τους.

Με βάση την εμπειρία στις προηγμένες χημικές έννοιες, προτεραιότητα πρέπει να δοθεί στην κατάκτηση της χημικής γνώσης που απαιτείται για:

- Απορρόφηση / προσρόφηση του CO<sub>2</sub> σε «seams» άνθρακα
- Δημιουργία ανθρακικού άλατος μαγνησίου, όπως φαίνεται στην αντίδραση ανθρακικού άλατος στον πίνακα 8.1. Το προϊόν είναι αδρανές και ασφαλές
- Κατανόηση και εκμετάλλευση των CO<sub>2</sub> «clathrates», υλικά σε μορφή πάγου τα οποία παράγονται από μίγματα ύδατος και CO<sub>2</sub>, κάτω από κατάλληλες συνθήκες.
- Διαμόρφωση και διάθεση των υδάτινων διαλυμάτων των ανθρακικών αλάτων και των ιόντων διανθρακικών αλάτων (τα οποία είναι και τα πιο σημαντικά), στον ωκεανό ή σε άλλους κατάλληλους υδάτινους σχηματισμούς
- Ανάπτυξη εμπορικών προϊόντων τα οποία παράγονται από CO<sub>2</sub>, CO (από προηγμένα προγράμματα ενέργειας) ή άνθρακα που δημιουργείται μέσω απανθράκωσης

**Πίνακας 8.1.** Θερμοδυναμική των χημικών / φυσικών μετασχηματισμών που περιλαμβάνουν το CO<sub>2</sub>

Χημικοί / Φυσικοί Μετασχηματισμοί		ΔH <sub>298K</sub> (Kcal/mole)
Παραγωγή Ενέργειας		
Καύση Άνθρακα	C + O <sub>2</sub> * CO <sub>2</sub>	-94.05*
Καύση Φυσικού Αερίου	CH <sub>4</sub> + 2O <sub>2</sub> * CO <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O	-191.76*
Εναπόθεση		
Διοξείδιο Άλατος	CO <sub>2</sub> + 1/2CaSiO <sub>3</sub> + 1/2H <sub>2</sub> O * 1/2Ca <sup>2+</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 1/2SiO <sub>2</sub>	-15.70*
Ανθρακικό Άλατος	CO <sub>2</sub> + 1/3Mg <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> (OH) <sub>4</sub> * MgCO <sub>3</sub> + 2/3SiO <sub>2</sub> + 2/3H <sub>2</sub> O	-3.45*
Oxalate	CO <sub>2</sub> + CO + CaSiO <sub>3</sub> * CaC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> + SiO <sub>2</sub>	-31.34*
Clathrate	CO <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O * CO <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	-5.68
Υγροποίηση	CO <sub>2</sub> (g) * CO <sub>2</sub> (l)	-1.27 <sup>at 210°C, 63.5bar</sup>
Χρήση		
Σύνθεση Μεθανόλης (Παραγωγή Υδρογόνου)	CO <sub>2</sub> + 3H <sub>2</sub> * CH <sub>3</sub> OH + H <sub>2</sub> O (3H <sub>2</sub> O * 3H <sub>2</sub> + 3/2O <sub>2</sub> )	-31.30* (+205.05)*
Κυκλικό Οργανικό Ανθρακικό Άλατος	CO <sub>2</sub> + PhCH=CH <sub>2</sub> + 1/2O <sub>2</sub> * PhCHO(C=O)C <sub>6</sub> H <sub>5</sub>	-55.3*

\*R. C. Weast, M. J. Astle, and W. H. Boyer, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, Boca Raton, Fla., 1988-1989.

\*S. L. Miller and W. D. Smythe, "Carbon Dioxide Clathrate in the Martian Ice Cap," *Science*, 170 (1970): 531-532.

\*W. M. Braker and L. Allen, *Matheson Gas Data Book*, 6th Ed, Matheson, Lyndhurst, N.J., 1980, p. 26.

\*N. Cohen and S. W. Benson, *Chem. Rev.* 93 (1993):2419-38.

Ο πίνακας 8.2. παρέχει περισσότερες πληροφορίες για αυτές τις προσεγγίσεις.

**Πίνακας 8.2.** Προσεγγίσεις για εναπόθεση, χρησιμοποιώντας χημικές διαδικασίες και παραδείγματα της χρήσης τους

Χημική Μορφή του Άνθρακα	Παραδείγματα εφαρμογής
Υδάτινα Ιόντα Ανθρακικού Άλατος: CO <sub>3</sub> , HCO <sub>3</sub>	Ωκεάνια διάθεση, αλατούχα υδροφόρα στρώματα μεγάλου βάθους
Στερεά Ανθρακικά Άλατα: CaCO <sub>3</sub> , MgCO <sub>3</sub>	Επίγεια, στον βυθό του ωκεανού και υπεδάφια διάθεση
«Clathrates» CO <sub>2</sub> · nH <sub>2</sub> O, n~6	Ωκεάνια, στον βυθό του ωκεανού διάθεση
Προσρόφηση του CO <sub>2</sub> από τον Άνθρακα	Εξαγωγή «coal-bed» μεθανίου
Άλλες Χαμηλής Ενέργειας Μορφές του Άνθρακα, όπως οι «oxalates»	Νέες τεχνολογίες διάθεσης.
Στερεός Άνθρακας	Υπεδάφια διάθεση, αέρια πετροχημικής βιομηχανίας για σύνθετα υλικά
Βασισμένα στον Άνθρακα Καύσιμα (π.χ. μεθανόλη)	Βασισμένη στο CO <sub>2</sub> κύκλοι καυσίμου, εναλλακτική ενέργεια
Άνθρακας Συνδεδεμένος με Ανθεκτικά Εμπορικά Προϊόντα (π.χ. πλαστικά)	Μεγάλης διάρκειας ζωής κατασκευαστικά υλικά

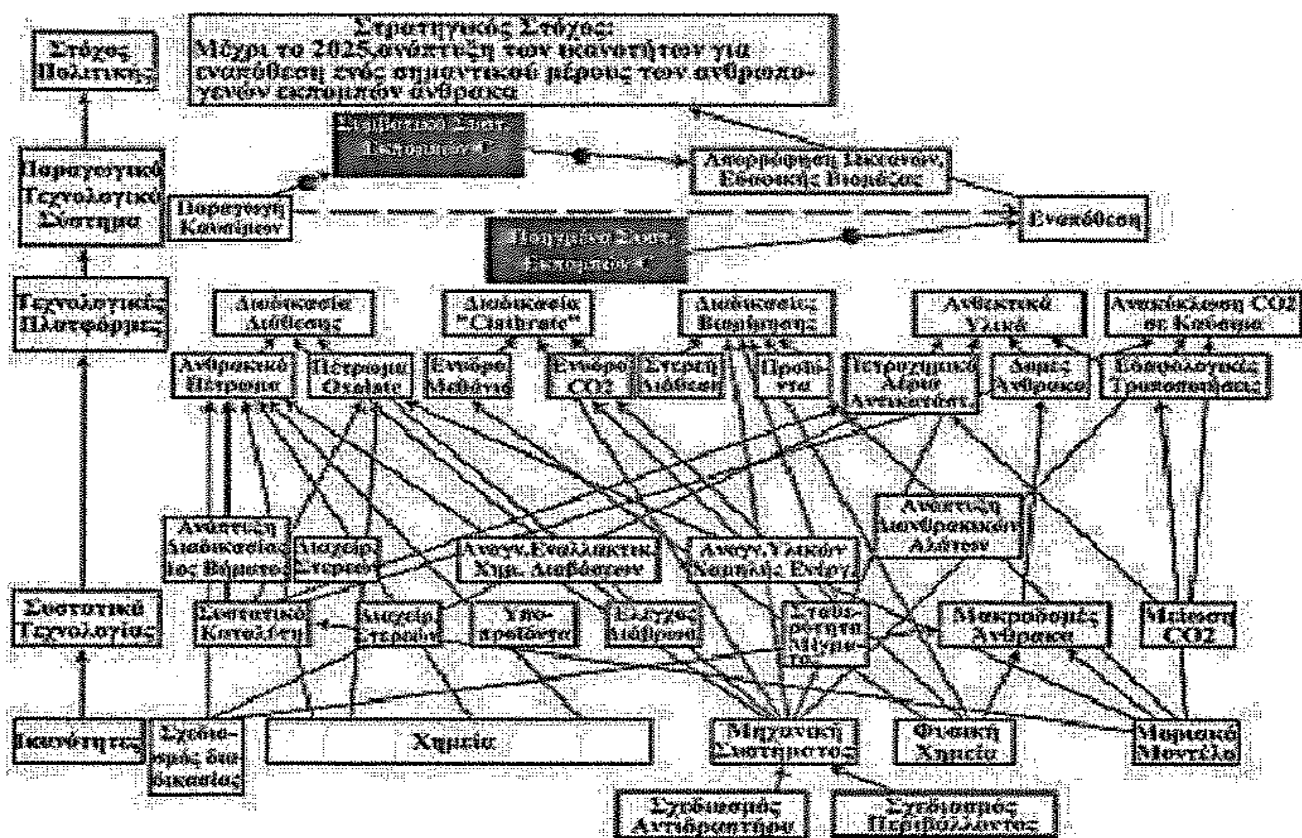
Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy,

«Carbon Sequestration, State of the Science»

A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)

Τα υλικά πάνω από τη διπλή γραμμή (δηλ., «oxalates», κ.τ.λ.) έχουν ουσιαστικά απεριόριστη δυνατότητα εναπόθεσης άνθρακα. Αυτά κάτω από τη γραμμή είναι λιγότερο πιθανό να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο, βασισμένοι και στις θερμοδυναμικές εκτιμήσεις και στο πιθανό μέγεθος αγοράς που στοχεύεται. Λαμβάνοντας υπόψη τα τρέχοντα σχέδια κατανάλωσης, μόνο ένα μικρό ποσοστό των απολιθωμένων αερίων πετροχημικής βιομηχανίας άνθρακα χρησιμοποιείται για την παραγωγή

προϊόντων με βάση τον άνθρακα. Το υπόλοιπο πηγαίνει προς την ενεργειακή παραγωγή. Η μείωση του άνθρακα θα έχει ενδιαφέρον, για την αγορά που οδηγείται από την αξία των προϊόντων που παράγει. Η χημική βιομηχανία θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει νέες χημικές διαδικασίες, για την παραγωγή πολύτιμων χημικών ουσιών και υλικών, καθώς επίσης και για να αποφύγει τις πιθανές περιβαλλοντικές ποινικές ρήτρες για τις συνεχείς εκπομπές CO<sub>2</sub>. Τα οικονομικά οφέλη των νέων διαδικασιών θα μπορούσαν να παρέχουν αυξημένη τεχνολογική ανταγωνιστικότητα για τη βιομηχανία και τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί το CO<sub>2</sub> ως αέριο πετροχημικής βιομηχανίας για τη χημική παραγωγή, συμπληρωματικά στα σημερινά βασισμένα στο πετρέλαιο αέρια πετροχημικής βιομηχανίας. Εντούτοις, η γενική επίδραση της ανάπτυξης προϊόντων στην εναπόθεση άνθρακα είναι πιθανό να είναι μικρή, εκτός και αν νέα προϊόντα που χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες μπορούν να αναπτυχθούν, όπως οικοδομικά υλικά ή υλικά για την αυτοκινητοβιομηχανία.. Τα σταθερά και ασφαλής τελικά προϊόντα για διάθεση αποτελούν μια πιο ελπιδοφόρο και υποσχόμενη προσέγγιση στο πρόβλημα.



Σχήμα 8.3. Ένα πρόγραμμα εναπόθεσης μέσω προηγμένων χημικών προσεγγίσεων. Πηγή: U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science» A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)



# 9. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΤΟΥ CO<sub>2</sub>

## 9.1. Γενική Σύγκριση των Μεθόδων Εναπόθεσης του CO<sub>2</sub>

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μια σύγκριση των τεχνολογιών εναπόθεσης του CO<sub>2</sub> με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία κάθε μεθόδου. Δεν υπάρχουν αρκετά διαθέσιμα στοιχεία για όλες τις μεθόδους. Γι' αυτόν τον λόγο οι μέθοδοι εναπόθεσης χωρίστηκαν σε δυο κατηγορίες: α) αυτές που θα συμπεριληφθούν στη σύγκριση και για τις οποίες είναι διαθέσιμα αρκετά ή έστω λίγα στοιχεία και β) αυτές που δε θα συμπεριληφθούν εξαιτίας της έλλειψης καλών πληροφοριών. Ο κατάλογος των μεθόδων παρουσιάζεται στον πίνακα 9.1.

Στην περίπτωση της ωκεάνιας λίπανσης και ορυκτοποίησης, πιστεύεται ότι αυτή τη στιγμή δεν υπάρχουν αρκετές πληροφορίες για την περιγραφή μιας μεθόδου και ότι αυτές οι διαδικασίες δεν πρέπει να συμπεριληφθούν μέχρι να εκτελεστεί περαιτέρω έρευνα.

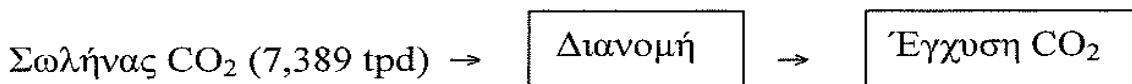
Τα χαρακτηριστικά τα οποία παρατίθενται για κάθε μέθοδο και τα οποία αποτελούν τη βάση για σύγκριση είναι τα πλεονεκτήματα, οι πιθανές προκλήσεις, η δυνατότητα εφαρμογής, η τεχνική ωριμότητα, η διαθεσιμότητα στοιχείων, η βιομηχανική αποδοχή και η συμβατότητα με τα συστήματα παραγωγής ενέργειας.

Πίνακας 9.1. Κατηγορία Προγραμμάτων

Συμπεριλαμβάνονται	Δε Συμπεριλαμβάνονται
Υδροφόρα Στρώματα	Ωκεάνια Λίπανση
Ταμιευτήρες Πετρελαίου	Ορυκτοποίηση
Εξαντλημένοι Ταμιευτήρες Πετρελαίου και Αερίου	
Ωκεάνια Αποθήκευση	
Δάση	
Καλλιεργήσιμα Εδάφη	
«coal – beds»	

### A) Αποθήκευση σε Υδροφόρα Στρώματα

Στο σχήμα 9.1. φαίνεται το αρχικό διάγραμμα του προγράμματος αποθήκευσης σε υδροφόρα στρώματα. Αυτό το πρόγραμμα είναι απλό στην εφαρμογή του. Η πολυπλοκότητα αρχίζει όταν πρέπει να αποφασιστεί η φύση της διανομής και ο αριθμός των φρεατίων.



**Σχήμα 9.1.** Αρχικό διάγραμμα του προγράμματος αποθήκευσης σε υδροφόρα στρώματα

Πηγή: Bert R. Bock (TVA), Richard G. Rhudy (EPRI), and David E. Nichols (TVA),

«Economic Evaluation of CO<sub>2</sub> Sequestration Technologies, Semi – Annual Technology Progress Report», (2001)

Τα χαρακτηριστικά του προγράμματος αποθήκευσης σε υδροφόρα στρώματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.2. Αυτό το πρόγραμμα έχει τη μεγαλύτερη χωρητικότητα αποθήκευσης από όλα τα προγράμματα, εκτός από τον ωκεανό και χρησιμοποιείται ευρέως στις ΗΠΑ. Επιπλέον, εφαρμόζεται σε εμπορική κλίμακα, αν και όχι στις ΗΠΑ. Αρκετά στοιχεία είναι διαθέσιμα.

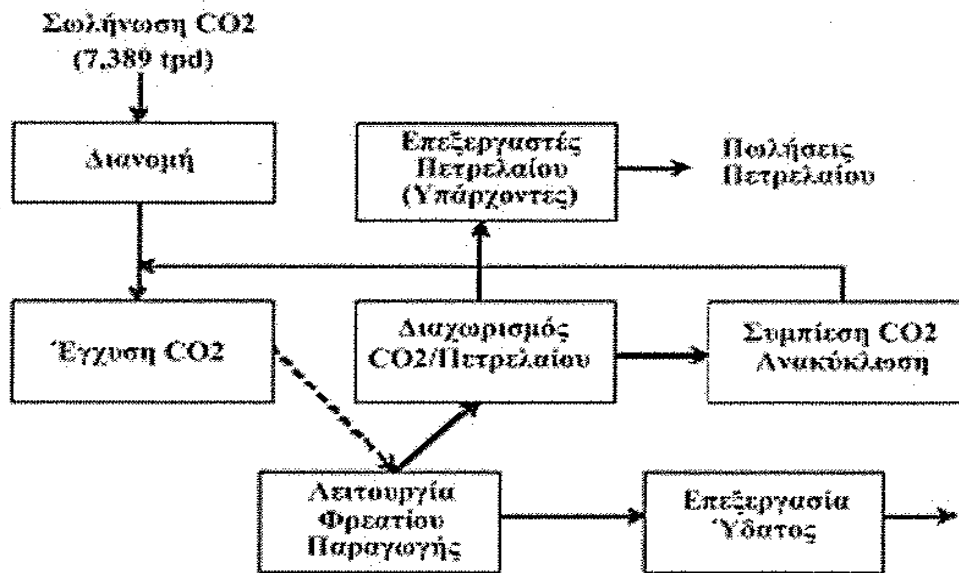
**Πίνακας 9.2.** Χαρακτηριστικά του προγράμματος αποθήκευσης σε υδροφόρα στρώματα

Πλεονεκτήματα	Πιθανές Προκλήσεις	Δυνατότητα Εφαρμογής	Τεχνική Ωριμότητα	Διαθεσιμότητα Στοιχείων	Βιομηχανική Αποδοχή	Συμβατότητα με Συστήματα Παραγωγής Ενέργειας
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Καλύτερη δυνατή χωρητικότητα αποθήκευσης CO<sub>2</sub> από όλες τις μεθόδους γεωλογικής αποθήκευσης.</li> <li>• Ο χρόνος παραμονής (του CO<sub>2</sub>) προβλέπεται να είναι χιλιάδες χρόνια.</li> <li>• Οι περισσότερες ανησυχίες για ασφάλεια αποβάλλονται όταν πρόκειται για παράκτια υδροφόρα στρώματα.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Κατανόηση του κινδύνου καταστροφικής ή αργής απελευθέρωσης του CO<sub>2</sub>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Πανταχού παρούσα και μεγάλη, διαθέσιμη διαθεσιμότητα</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Κάποια εμπειρία αποθήκευσης σε υδροφόρα στρώματα για χημικά, κ.τ.λ.</li> <li>• Λίγη πραγματική εμπειρία για αυτή τη συγκεκριμένη εφαρμογή</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Πολλές μέλλετες για αυτήν την μέθοδο αποθήκευσης</li> <li>• Απουσιάζει ένας ακριβής χαρακτηρισμός του ταμειυτήρα.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εμπορική εφαρμογή: το CO<sub>2</sub> έχει εγχυθεί στον σχηματισμό Utsira κάτω από τη βόρεια θάλασσα, από τον Αύγουστο του 1996, ως μέρος του προγράμματος Sleipner.</li> <li>• Αποδοχή υλικών, άλλων εκτός του CO<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εξαιρετική</li> </ul>

Πηγή: Bert R. Bock (TVA), Richard G. Rhudy (EPRI), and David E. Nichols (TVA), «Economic Evaluation of CO<sub>2</sub> Sequestration Technologies, Semi – Annual Technology Progress Report», (2001)

## B) Αποθήκευση σε Ταμιευτήρες Πετρελαίου μέσω Ενισχυμένης Ανάκτησης Πετρελαίου (EOR)

Στο σχήμα 9.2. φαίνεται το αρχικό διάγραμμα για το πρόγραμμα αποθήκευσης με EOR.



**Σχήμα 9.2.** Αρχικό διάγραμμα του προγράμματος αποθήκευσης σε Ταμιευτήρες Πετρελαίου μέσω Ενισχυμένης Ανάκτησης Πετρελαίου (EOR)

Πηγή: Bert R. Bock (TVA), Richard G. Rhudy (EPRI), and David E. Nichols (TVA),

«Economic Evaluation of CO<sub>2</sub> Sequestration Technologies, Semi – Annual Technology Progress Report», (2001)

Τα χαρακτηριστικά του προγράμματος αποθήκευσης σε Ταμιευτήρες Πετρελαίου μέσω Ενισχυμένης Ανάκτησης Πετρελαίου (EOR) παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.3. Αν και αυτό το πρόγραμμα έχει πιο περιορισμένη χωρητικότητα αποθήκευσης και δεν είναι τόσο διαδεδομένο, είναι πιθανό να εφαρμοστεί γρήγορα εξαιτίας της δυνατότητας για χαμηλού κόστους αποθήκευση. Εφαρμόζεται εμπορικά στις ΗΠΑ. Ωστόσο, δεν έχει βελτιστοποιηθεί για μέγιστη αποθήκευση του CO<sub>2</sub> και η συμβατότητά του με τα συστήματα παραγωγής ενέργειας αποτελεί θέμα ανησυχίας. Αρκετά στοιχεία είναι διαθέσιμα.

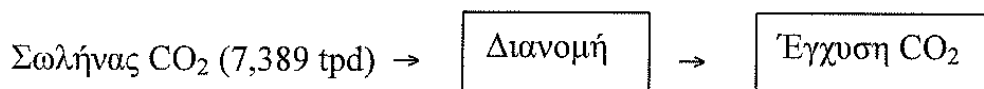
**Πίνακας 9.3.** Χαρακτηριστικά του προγράμματος αποθήκευσης σε Ταμιευτήρες Πετρελαίου μέσω Ενισχυμένης Ανάκτησης Πετρελαίου (EOR)

Πλεονεκτήματα	Πιθανές Προκλήσεις	Δυνατότητα Εφαρμογής	Τεχνική Ωριμότητα	Διαθεσιμότητα Στοιχείων	Βιομηχανική Αποδοχή	Συμβατότητα με Συστήματα Παραγωγής Ενέργειας
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Τα υποπροϊόντα του πετρελαίου καθιστούν αυτήν τη μέθοδο οικονομικά ελκυστική.</li> <li>• Δε θεωρείται να περιλαμβάνει αδικαιολόγητους κινδύνους για τον άνθρωπο ή το φυσικό περιβάλλον</li> <li>• Η έγχυση του CO<sub>2</sub> εφαρμόζεται εμπορικά σήμερα.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Συχνά μπορεί να είναι φθηνότερη η απόκτηση του CO<sub>2</sub> από φυσικές πηγές.</li> <li>• Η παγκόσμια χωρητικότητα αποθήκευσης μπορεί να είναι περιορισμένη (π.χ. έως 65 Gt.C)</li> <li>• Λόγω των σημερινών διαφυγών – διαρροών, οι λειτουργίες στον ταμιευτήρα πρέπει να αποθηκεύουν το CO<sub>2</sub> υπό πίεση.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Περιορισμένη στις περιοχές όπου υπάρχουν ενεργά πετρελαϊκά πεδία.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Η EOR εφαρμόζονταν σε συγκεκριμένα κλίμακα εδώ και 25 χρόνια</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εξαιρετική.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Η EOR έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως το 1998 περισσότερα από 65 πετρελαϊκά πεδία στις ΗΠΑ εγχέονταν με CO<sub>2</sub>.</li> <li>• Η βιομηχανία ερευνάει την πιθανότητα χρήσης CO<sub>2</sub> που έχει κατακρατηθεί.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Οι λειτουργίες πετρελαίου απαιτούν συνεχή τροφοδοσία (και όχι διακοπόμενη)</li> <li>• Θέματα σχετικά με την χρονική διακύμανση της ποσότητας του αναγκαίου CO<sub>2</sub></li> </ul>

Πηγή: Bert R. Bock (TVA), Richard G. Rhudy (EPRI), and David E. Nichols (TVA), «Economic Evaluation of CO<sub>2</sub> Sequestration Technologies, Semi – Annual Technology Progress Report», (2001)

### Γ) Αποθήκευση σε Ταμιευτήρες Πετρελαίου και Αερίου, οι οποίοι έχουν Εξαντληθεί

Στο σχήμα 9.3. φαίνεται το αρχικό διάγραμμα για το πρόγραμμα αποθήκευσης σε εξαντλημένους ταμιευτήρες πετρελαίου και αερίου.



**Σχήμα 9.3.** Αρχικό διάγραμμα του προγράμματος αποθήκευσης σε εξαντλημένους ταμιευτήρες πετρελαίου και αερίου.

Πηγή: Bert R. Bock (TVA), Richard G. Rhudy (EPRI), and David E. Nichols (TVA), «Economic Evaluation of CO<sub>2</sub> Sequestration Technologies, Semi – Annual Technology Progress Report», (2001)

Τα χαρακτηριστικά του προγράμματος αποθήκευσης σε ταμιευτήρες πετρελαίου και αερίου, οι οποίοι έχουν εξαντληθεί παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.4. Αυτό το πρόγραμμα είναι παρόμοιο με το πρόγραμμα EOR, εκτός του ότι η τοποθεσία αποθήκευσης απλά χρησιμοποιείται για αποθήκευση, χωρίς ανάκτηση πετρελαίου ή αερίου.

Εφόσον η τοποθεσία αποθήκευσης έχει γνωστή ακεραιότητα, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί σχετικά απλά. Οι ταμειυτήρες αερίου μπορεί να είναι πιο απλοί, εφόσον το αέριο θα έχει εξαντληθεί και ο ταμειυτήρας μπορεί απλά να επανασυμπιεστεί. Τα στοιχεία είναι αρκετά, εφόσον είναι παρόμοια με αυτά της EOR.

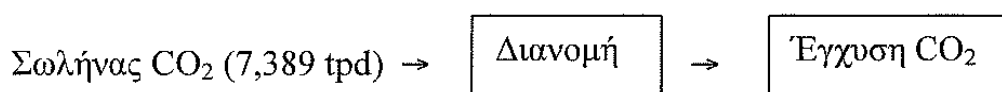
**Πίνακας 9.4.** Χαρακτηριστικά του προγράμματος αποθήκευσης σε ταμειυτήρες πετρελαίου και αερίου, οι οποίοι έχουν εξαντληθεί

Πλεονεκτήματα	Πιθανές Προκλήσεις	Δυνατότητα Εφαρμογής	Τεχνική Ωριμότητα	Διαθεσιμότητα Στοιχείων	Βιομηχανική Αποδοχή	Συμβατότητα με Συστήματα Παραγωγής Ενέργειας
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Η παγκόσμια χωρητικότητα αποθήκευσης είναι περίπου 140 Gt.C για τα πεδία αερίου και 40 Gt.C για τα πετρελαϊκά πεδία.</li> <li>• Οι ταμειυτήρες έχουν καλή ακεραιότητα κατά τη διάρκεια των γεωλογικών χρόνων.</li> <li>• Υπάρχει ήδη γνώση σχετικά με τους ταμειυτήρες.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Σήμερα υπάρχουν πολύ λίγοι εξαντλημένοι ταμειυτήρες</li> <li>• Κατανόηση του κινδύνου της καταστροφικής ή αργής απελευθέρωσης του CO<sub>2</sub>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Περιορισμένη σε περιοχές όπου υπάρχουν ταμειυτήρες πετρελαίου και αερίου που δε χρησιμοποιούνται.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Χρησιμοποιείται παρόμοια τεχνολογία με αυτήν της EOR</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Καλή.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Δεν υπάρχει ακόμα εμπορική εφαρμογή που να περιλαμβάνει ένα τέτοιο πεδίο.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μπορεί να χρειάζονται πολλοί ταμειυτήρες για τις μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας.</li> </ul>

Πηγή: Bert R. Bock (TVA), Richard G. Rhudy (EPRI), and David E. Nichols (TVA), «Economic Evaluation of CO<sub>2</sub> Sequestration Technologies, Semi – Annual Technology Progress Report», (2001)

#### Δ) Αποθήκευση «Coal – Bed»

Στο σχήμα 9.4. φαίνεται το αρχικό διάγραμμα για το πρόγραμμα αποθήκευσης «coal – bed».



**Σχήμα 9.4.** Αρχικό διάγραμμα του προγράμματος αποθήκευσης «coal – bed»

Πηγή: Bert R. Bock (TVA), Richard G. Rhudy (EPRI), and David E. Nichols (TVA), «Economic Evaluation of CO<sub>2</sub> Sequestration Technologies, Semi – Annual Technology Progress Report», (2001)

Τα χαρακτηριστικά του προγράμματος αποθήκευσης «coal – bed» παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.5. Αν και τα στοιχεία είναι περιορισμένα, η παραγωγή υποπροϊόντων μεθανίου και τα σημαντικά κοιτάσματα άνθρακα είναι σημαντικά επιχειρήματα για να συμπεριληφθεί αυτό το πρόγραμμα. Η διαθεσιμότητα των στοιχείων είναι περιορισμένη.

**Πίνακας 9.5. Χαρακτηριστικά του προγράμματος αποθήκευσης «coal – bed»**

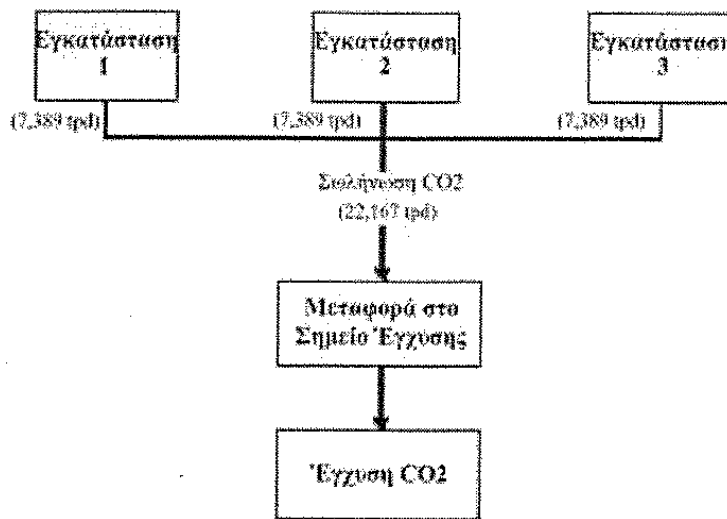
Πλεονεκτήματα	Πιθανές Προκλήσεις	Δυνατότητα Εφαρμογής	Τεχνική Ωριμότητα	Διαθεσιμότητα Στοιχείων	Βιομηχανική Αποδοχή	Συμβατότητα με Συστήματα Παραγωγής Ενέργειας
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Τα υποπροϊόντα του μεθανίου καθιστούν τη μέθοδο οικονομικά ελκυστική.</li> <li>• Το CO<sub>2</sub> εναποτίθεται πάρα πολύ αποδοτικά με απορρόφηση από την μήτρα – υλικό του άνθρακα.</li> <li>• Τα παγκόσμια μεγάλα κοιτάσματα του άνθρακα, σημαίνουν πιθανή μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης CO<sub>2</sub>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Οι μέθοδοι ενισχυμένης ανάκτησης αερίου (EOR) για εκμετάλλευση του «coal – bed» μεθανίου απαιτούν περαιτέρω ανάπτυξη</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Υπάρχει ασάφεια στο πώς πολλοί τύποι σχηματισμών άνθρακα θα είναι πρακτικοί για παραγωγή «coal – bed» μεθανίου</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Η έγχυση CO<sub>2</sub> σε «coal – beds» ήδη χρησιμοποιείται για να ενισχύσει την ανάκτηση μεθανίου, αν και η διαδικασία βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Περιορισμένη</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Καλή αποδοχή.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αναπτυχθεί μια εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας μηδενικών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, που θα χρησιμοποιεί ως καύσιμο «coal – bed» μεθάνιο, στην οποία το απόβλητο CO<sub>2</sub> θα εγχέεται σε κοιτάσματα «coal – bed» μεθανίου για παραγωγή περισσότερου μεθανίου.</li> </ul>

Πηγή: Bert R. Bock (TVA), Richard G. Rhudy (EPRI), and David E. Nichols (TVA), «Economic Evaluation of CO<sub>2</sub> Sequestration Technologies, Semi – Annual Technology Progress Report», (2001)

### E) Ωκεάνια Αποθήκευση

Στο σχήμα 9.5. φαίνεται το αρχικό διάγραμμα για το πρόγραμμα ωκεάνιας αποθήκευσης.





**Σχήμα 9.5.** Αρχικό διάγραμμα του προγράμματος ωκεάνιας αποθήκευσης  
 Πηγή: Bert R. Bock (TVA), Richard G. Rhudy (EPRI), and David E. Nichols (TVA), «Economic Evaluation of CO<sub>2</sub> Sequestration Technologies, Semi – Annual Technology Progress Report», (2001)

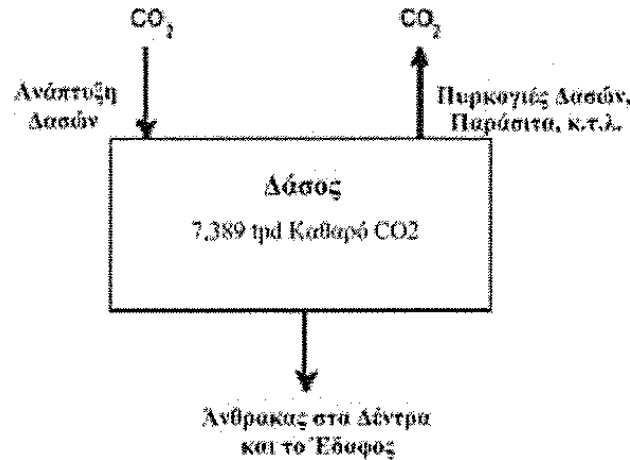
Τα χαρακτηριστικά του προγράμματος ωκεάνιας αποθήκευσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.6. Ο ωκεανός έχει τη μεγαλύτερη χωρητικότητα αποθήκευσης από όλες τις μεθόδους και πολύ δουλειά πρέπει να γίνει για να μελετηθούν τρόποι αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> στον ωκεανό. Αρκετά στοιχεία είναι διαθέσιμα.

**Πίνακας 9.6.** Χαρακτηριστικά του προγράμματος

Πλεονεκτήματα	Πιθανές Προκλήσεις	Δυνατότητα Εφαρμογής	Τεχνική Ωριμότητα	Διαθεσιμότητα Στοιχείων	Βιομηχανική Αποδοχή	Συμβατότητα με Συστήματα Παραγωγής Ενέργειας
<ul style="list-style-type: none"> <li>Μεγαλύτερη δυνατότητα δεξαμενών – ταμιευτήρων για το CO<sub>2</sub> η χωρητικότητα αποθήκευσης εκτιμάται ότι είναι πάνω από 1000 Gt.C</li> <li>Οι διαρροές δεν θέτουν θέματα ασφάλειας.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Μπορεί να έχει αρνητικό αντίκτυπο στο τοπικό θαλάσσιο περιβάλλον.</li> <li>Σημαντικά νομικά και δικαιοδοτικά θέματα πρέπει να ξεπεραστούν.</li> <li>Αρνητική αντιμετώπιση από μη κυβερνητικούς οργανισμούς (NGOs)</li> <li>Ο χρόνος διατήρησης, της τάξης εκατοντάδων χρόνων, είναι μικρότερος από αυτόν της υπεδάφιας αποθήκευσης.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Εφαρμόζεται καλύτερα σε χώρες οι οποίες βρίσκονται δίπλα σε ωκεανούς και δεν έχουν πρόσβαση σε κατάλληλους υπεδάφινους ταμιευτήρες, για παράδειγμα η Ιαπωνία.</li> <li>Οι κατοικημένες περιοχές βρίσκονται κοντά στις ακτογραμμές.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Μεγάλη εμπειρία από την παράκτια εξερεύνηση / παραγωγή είναι εφαρμοσμένη</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Μέτρια</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Δεν είχε καλή αποδοχή σε σχέση με τις μεθόδους γεωλογικής αποθήκευσης.</li> <li>Ένα πείραμα πεδίου που πραγματοποιήθηκε στην ακτή της Χαβάης το 2001, θα βοηθήσει στη μείωση μερικών από τις αβεβαιότητες.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Εξαιρετική, για εγκαταστάσεις που βρίσκονται σε ακτογραμμές.</li> </ul> <p>Πηγή: Bert R. Bock (TVA), Richard G. Rhudy (EPRI), and David E. Nichols (TVA), «Economic Evaluation of CO<sub>2</sub> Sequestration Technologies, Semi – Annual Technology Progress Report», (2001)</p>

## ΣΤ) Ενίσχυση της Δεξαμενής – Ταμιευτήρα των Δασών

Στο σχήμα 9.6. φαίνεται το αρχικό διάγραμμα για το πρόγραμμα ενίσχυσης της δεξαμενής των δασών.



**Σχήμα 9.6.** Αρχικό διάγραμμα του προγράμματος ενίσχυσης της δεξαμενής των δασών  
 Πηγή: Bert R. Bock (TVA), Richard G. Rhudy (EPRI), and David E. Nichols (TVA), «Economic Evaluation of CO<sub>2</sub> Sequestration Technologies, Semi – Annual Technology Progress Report», (2001)

**Πίνακας 9.7.** Χαρακτηριστικά του προγράμματος ενίσχυσης της δεξαμενής των δασών

Πλεονεκτήματα	Πιθανές Προκλήσεις	Δυνατότητα Εφαρμογής	Τεχνική Ωριμότητα	Διαθεσιμότητα Στοιχείων	Βιομηχανική Αποδοχή	Συμβατότητα με Συστήματα Παραγωγής Ενέργειας
<ul style="list-style-type: none"> <li>Χαμηλό κόστος.</li> <li>Σημαντικά δάση είναι διαθέσιμα</li> <li>Παρέχει χρηματοδότηση και εργασία σε αγροτικές και αναπτυσσόμενες χώρες.</li> <li>Διατήρηση της βιοποικιλότητας</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Έλεγχος και εξακρίβωση της αποθήκευσης του άνθρακα.</li> <li>Ελαχιστοποίηση των διαρροών.</li> <li>Μικρής διάρκειας αποθήκευση.</li> <li>Κίνδυνος για απώλεια των δασών μέσω πυρκαγιάς, παρασίτων ή κοινωνικών παραγόντων.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ιδιαίτερα εφαρμόσιμη σε αραιοκατοικημένες περιοχές, με λίγες επιλογές για διαφορετικές χρήσεις του εδάφους.</li> <li>Σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη τα δάση μπορεί να είναι λιγότερο αποτελεσματικά.</li> <li>Η παγκόσμια χωρητικότητα είναι περιορισμένη και τα κόστη αυξάνονται σημαντικά όσο λιγότερο ευνοϊκές τοποθεσίες χρησιμοποιούνται.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Η δασονομία είναι ώριμη τεχνικά.</li> <li>Οι ιδιοκτήτες γης και οι αγρότες πρέπει να ενημερωθούν για τα πλεονεκτήματα της αποθήκευσης του άνθρακα στα δάση.</li> <li>Υπηρεσίες ελέγχου και εξακρίβωσης είναι διαθέσιμες, αλλά περαιτέρω ανάπτυξη θα ήταν ωφέλιμη για την αύξηση της ακρίβειας και τη μείωση των δαπανών.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Καλή.</li> <li>Τα τρέχοντα προγράμματα είναι μικρά και μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικά των μεγάλων σχεδίων.</li> <li>Τα τρέχοντα προγράμματα μεγάλης κλίμακας είναι κυρίως αποφυγή καταστροφής των δασών.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ακόμη συζητείται στη συνεδρίαση COP 6.</li> <li>Θεωρείται η εύκολη, χαμηλού κόστους μέθοδος.</li> <li>Μερικές εταιρίες ήδη αγοράζουν πιστώσεις για άνθρακα από τα δάση.</li> <li>Υπάρχουν ακόμα ανησυχίες για διαρροή και κινδύνους.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Εφαρμόσιμη σε όλα τα συστήματα παραγωγής ενέργειας, εφόσον δεν υπάρχει άμεση σύνδεση με την εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας.</li> </ul>

Πηγή: Bert R. Bock (TVA), Richard G. Rhudy (EPRI), and David E. Nichols (TVA), «Economic Evaluation of CO<sub>2</sub> Sequestration Technologies, Semi – Annual Technology Progress Report», (2001)

Τα χαρακτηριστικά του προγράμματος ενίσχυσης της δεξαμενής των δασών παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.7. Τα δάση θεωρούνται γενικά ως η μέθοδος αποθή-

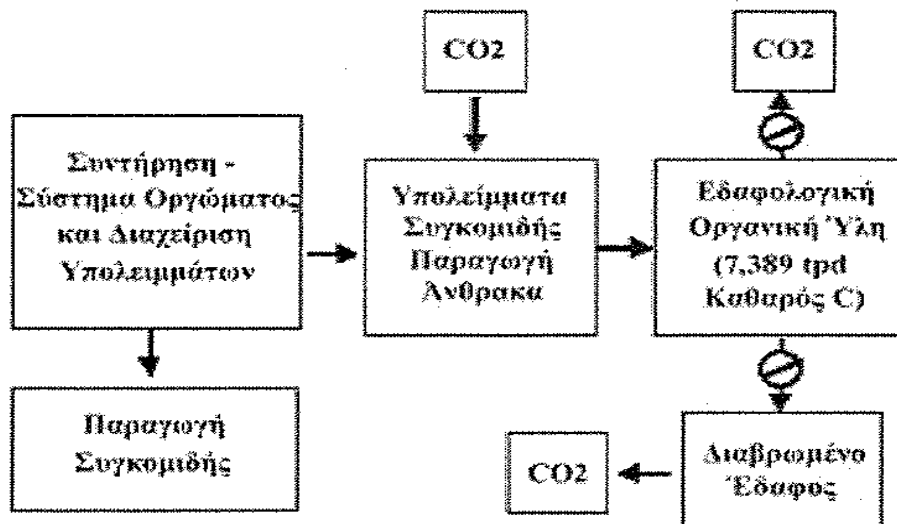
κευσης χαμηλότερου κόστους και πρέπει να εξεταστούν εκτενώς. Ένας αριθμός ανησυχητικών θεμάτων παραμένουν ακόμα και η επεξεργασία των οικονομικών θα είναι δύσκολη. Αρκετά στοιχεία είναι διαθέσιμα.

## Z) Ενίσχυση της Δεξαμενής – Ταμειυτήρα των Καλλιεργημένων Εδαφών

Στο σχήμα 9.7. φαίνεται το αρχικό διάγραμμα για το πρόγραμμα ενίσχυσης της δεξαμενής των καλλιεργημένων εδαφών. Το πρόγραμμα καλλιεργημένων εδαφών περιλαμβάνει την ενίσχυση της εναπόθεσης του εδαφικού άνθρακα μετατρέποντας τα συμβατικά συστήματα οργώματος σε συντηρητικά και βελτιώνοντας τη διαχείριση υπολειμμάτων. Τα συντηρητικά συστήματα οργώματος χρησιμοποιούν λιγότερο εντατικό όργωμα, συχνά καθόλου όργωμα και αφήνουν τουλάχιστον 30% των υπολειμμάτων της συγκομιδής στην επιφάνεια του εδάφους. Τα συστήματα συντηρητικού οργώματος, επίσης, μερικές φορές περιλαμβάνουν κάλυψη της συγκομιδής τον χειμώνα, η οποία παραμένει στην επιφάνεια του εδάφους για να μειώσει την εδαφολογική διάβρωση. Η κάλυψη της συγκομιδής κατά τον χειμώνα δε μπορεί να συγκομισθεί και προσθέτει συμπληρωματικά υπολείμματα συγκομιδής στην οργανική ύλη του εδάφους.

Οι γενικές παράμετροι για την εκτίμηση του καθαρού κόστους της μετατροπής σε συντηρητικά συστήματα οργώματος παρουσιάζεται στο σχήμα 9.7. Το καθαρό κόστος της μετατροπής σε συντηρητικά συστήματα οργώματος είναι το προστιθέμενο κόστος της εισαγωγής του συστήματος οργώματος, μείων ή συν την αλλαγή του εισοδήματος από τις αλλαγές στο πεδίο της συγκομιδής.

Οι γενικές παράμετροι για την εκτίμηση του πρόσθετου CO<sub>2</sub> που εναποτίθεται στην οργανική ύλη του εδάφους, παρουσιάζονται επίσης στο σχήμα 9.7. Αυτές οι παράμετροι είναι α) η αύξηση των υπολειμμάτων άνθρακα της συγκομιδής που προστίθενται στην οργανική ύλη του εδάφους, β) το μειωμένο ποσοστό της αποσύνθεσης του οργανικού υλικού του εδάφους σε CO<sub>2</sub> και γ) η μειωμένη διάβρωση του εδάφους και η σχετική μείωση των εκπομπών του CO<sub>2</sub> από τα εδάφη που έχουν διαβρωθεί.



**Σχήμα 9.7.** Αρχικό διάγραμμα του προγράμματος ενίσχυσης της δεξαμενής των καλλιεργημένων εδαφών.

Πηγή: Bert R. Bock (TVA), Richard G. Rhudy (EPRI), and David E. Nichols (TVA); «Economic Evaluation of CO<sub>2</sub> Sequestration Technologies, Semi – Annual Technology Progress Report», (2001)

Τα χαρακτηριστικά του προγράμματος ενίσχυσης της δεξαμενής των καλλιεργημένων εδαφών παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.8. Η αυξημένη υιοθέτηση των συντηρητικών συστημάτων οργώματος και η βελτίωση της διαχείρισης των υπολειμμάτων θα επιφέρει το 1/2 της δυνατότητας για μείωση των εκπομπών θερμοκηπίου από τα καλλιεργημένα εδάφη των ΗΠΑ.

Στα συμβατικά συστήματα οργώματος, το έδαφος οργώνεται εντατικά και όλα τα υπολείμματα καλλιέργειας ανακατεύονται με το έδαφος. Αντίθετα, τα συντηρητικά συστήματα περιλαμβάνουν λιγότερο εντατικό όργωμα (συχνά καθόλου όργωμα), αφήνουν 30% ή περισσότερα από τα υπολείμματα συγκομιδής στην επιφάνεια του εδάφους και εναποθέτουν πρόσθετο άνθρακα στην οργανική ύλη του εδάφους, η οποία διαφορετικά θα απελευθερωνόταν στην ατμόσφαιρα ως CO<sub>2</sub>. Εκτός του ότι εναποθέτουν περισσότερο άνθρακα, τα συντηρητικά συστήματα οργώματος επίσης μειώνουν δραματικά τη διάβρωση του εδάφους και τις εκπομπές CO<sub>2</sub> από το διαβρωμένο έδαφος, βελτιώνουν την ποιότητα του εδάφους και διατηρούν το νερό του εδάφους μειώνοντας τη διαφυγή υδάτων και την εξάτμισή τους απ' αυτό.

**Πίνακας 9.8.** Χαρακτηριστικά του προγράμματος ενίσχυσης της δεξαμενής των καλλιεργημένων εδαφών.

Πλεονεκτήματα	Πιθανές Προκλήσεις	Δυνατότητα Εφαρμογής	Τεχνική Ωριμότητα	Διαθεσιμότητα Στοιχείων	Βιομηχανική Αποδοχή	Συμβατότητα με Συστήματα Παραγωγής Ενέργειας
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Σχετικά χαμηλό κόστος / τόνο CO<sub>2</sub>.</li> <li>• Παράλληλα οφέλη του συντηρητικού οργώματος – βελτιωμένη ποιότητα εδάφους, μειωμένη διάβρωση, βελτιωμένη αποτελεσματικότητα της χρήσης ύδατος, βελτιωμένη παραγωγικότητα συγκομιδής.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Πιθανή ανάγκη για περιοδική χρήση συμβατικού οργώματος για τη διατήρηση της παραγωγικότητας της συγκομιδής, εξαιτίας της μερικής απώλειας του CO<sub>2</sub> που έχει εναποτεθεί.</li> <li>• Πιθανή επαναφορά σε συμβατικό όργωμα λόγω αλλαγής της ιδιοκτησίας γης.</li> <li>• Αντίσταση στο να συμπεριληφθούν βιολογικές δεξαμενές για εναπόθεση του άνθρακα.</li> <li>• Φτωχά αναπτυγμένη υποδομή για την αγορά του CO<sub>2</sub></li> <li>• Καλές βάσεις για υποδομή</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εξαιρετική στα «στεγνά» εδάφη, στα συστήματα καλλιέργειας ανεπαρκή σε νερό και στα εδάφη υψηλής διάβρωσης.</li> <li>• Μέτρια καλή στα περισσότερα άλλα συστήματα καλλιέργειας.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Τα συντηρητικά συστήματα οργώματος βρίσκονται υπό ανάπτυξη από τη δεκαετία του 1970.</li> <li>• Περίπου 35% υιοθέτηση του συντηρητικού συστήματος έχει επιτευχθεί μέχρι σήμερα στις ΗΠΑ.</li> <li>• Η τεχνολογία είναι έτοιμη για γρήγορη υιοθέτηση, πράγμα το οποίο έδωσε πρόσθετα οικονομικά κίνητρα.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Καλά για τα κόστη των συστημάτων οργώματος.</li> <li>• Μέτρια για τα ποσοστά εναπόθεσης του CO<sub>2</sub>.</li> <li>• Ελλιπή για τα επίπεδα ισορροπίας του άνθρακα που έχει εναποτεθεί και τον χρόνο ισορροπίας.</li> <li>• Καλά για τους παράγοντες εκπομπής του CO<sub>2</sub> που σχετίζονται με το σύστημα οργώματος.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Γενικά καλή αποδοχή από τους αγρότες, εξαιτίας των παράλληλων πλεονεκτημάτων.</li> <li>• Κάπως μεγαλύτερος οικονομικός κίνδυνος για τους αγρότες.</li> <li>• Μπορεί να απαιτεί μέτρια κίνητρα υιοθέτησης, για να επιτευχθεί γρήγορη πρόσθετη υιοθέτηση.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Καλή.</li> </ul> <p><i>Πηγή: Bert R. Bock (TVA), Richard G. Rhudy (EPRI), and David E. Nichols (TVA), «Economic Evaluation of CO<sub>2</sub> Sequestration Technologies, Semi – Annual Technology Progress Report», (2001)</i></p>

## 9.2. Σύγκριση των Επιλογών Αποθήκευσης για Κάθε Μέθοδο Εναπόθεσης

### A) Τεχνολογία Γεωλογικής Αποθήκευσης

Η υπεδάφια αποθήκευση στους γεωλογικούς σχηματισμούς είναι μια σημαντική επιλογή για εναπόθεση του CO<sub>2</sub>. Η γεωλογική αποθήκευση εξετάζεται αυτήν την περίοδο από δυο προγράμματα: στο πρώτο, το CO<sub>2</sub> από τα πεδία αερίου της Νορβηγίας αποθηκεύεται προς το παρόν σε ένα υποθαλάσσιο υδροφόρο στρώμα στη Βόρεια Θάλασσα και το δεύτερο, ένα σημαντικά μεγαλύτερο πρόγραμμα μπορεί σύντομα να αναληφθεί από την Exxon και Pertamina στα πεδία φυσικού αερίου στην Natuna στην Νότια Θάλασσα της Κίνας. Το κύριο ζήτημα είναι οι αβεβαιότητες στους διαθέσιμους όγκους για εναπόθεση (πλαίσιο 9.1.), η μακροπρόθεσμη ακεραιότητα της αποθήκευσης και οι δαπάνες που συνδέονται με τη μεταφορά του CO<sub>2</sub> στην περιοχή αποθήκευσης και η ίδια η επιχείρηση αποθήκευσης (Herzog et al. 1993, Freund and Ormerod 1997). Η ακεραιότητα της αποθήκευσης είναι σημαντική όχι μόνο για την αποφυγή της απρογραμμάτιστης επιστροφής του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα, αλλά επίσης και για ανησυχίες για τη δημόσια ασφάλεια και την πιθανή ευθύνη εάν υπάρξει μια καταστροφική διαρροή. Το αέριο CO<sub>2</sub> είναι βαρύτερο από τον αέρα και αν εμφανιστεί μια μεγάλη διαρροή, θα μπορούσε να αντικαταστήσει τον αέρα στην εποφάνεια και να προκαλέσει ασφυξία.

Οι κύριες επιλογές για αποθήκευση στο υπέδαφος, όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι οι εξής (Herzog et al. 1993):

- Αποθήκευση σε ενεργούς ταμιευτήρες πετρελαίου
- Αποθήκευση σε «coal – beds»
- Αποθήκευση σε εξαντλημένους ταμιευτήρες πετρελαίου και αερίου
- Αποθήκευση σε υδροφόρα στρώματα μεγάλου βάθους
- Αποθήκευση σε θόλους με άλμη ή σπήλαια πετρωμάτων

Οι σχετικές αξίες αυτών των επιλογών περιγράφονται στον πίνακα 9.9. και περιλαμβάνουν ζητήματα χωρητικότητας αποθήκευσης, κόστους, ακεραιότητας αποθήκευσης και εφικτότητας.

Πίνακας 9.9. Σύγκριση των επιλογών γεωλογικής αποθήκευσης

Μέθοδοι Αποθήκευσης	Σχετική Χωρητικότητα	Σχετικό Κόστος	Ακεραιότητα Αποθήκευσης	Τεχνική Εφικτότητα
Ενεργοί ταμιευτήρες πετρελαίου (EOR)	Χαμηλή	Πολύ χαμηλό	Καλή	Υψηλή
«coal – beds»	Άγνωστη	Χαμηλό	Άγνωστη	Άγνωστη
Εξαντλημένοι ταμιευτήρες πετρελαίου/ αερίου	Μέτρια	Χαμηλό	Καλή	Υψηλή
Υδροφόρα στρώματα	Υψηλή	Άγνωστο	Άγνωστη	Άγνωστη
Θόλοι με άλμη / σπήλαια	Υψηλή	Πολύ Υψηλή	Καλή	Υψηλή

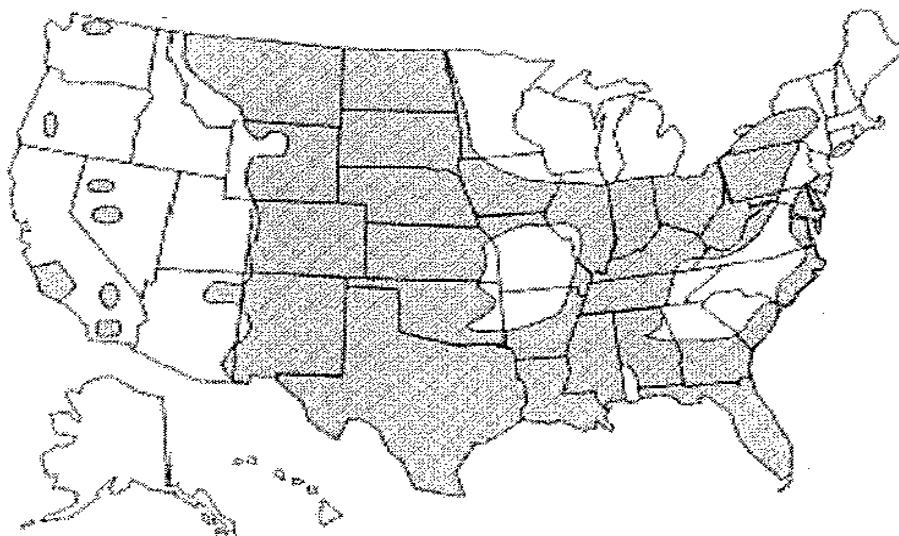
Πηγή: Howard Herzog, Elizabeth Drake, Eric Adams, «CO<sub>2</sub> Capture, Reuse, and Storage Technologies for Mitigating Global Climate Change», Energy Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, (1997)

Οι εξαντλημένοι ταμιευτήρες πετρελαίου και αερίου εμφανίζονται να είναι η πιο ελπιδοφόρος επιλογή γεωλογικής αποθήκευσης, τουλάχιστον βραχυπρόθεσμα (Herzog et al. 1993). Επειδή αυτοί οι ταμιευτήρες έχουν ήδη δείξει τη δυνατότητά τους να περιέχουν συμπιεσμένα ρευστά για μεγάλες χρονικές περιόδους, πιθανόν η ακεραιότητα αποθήκευσής τους να είναι καλή. Πρόσφατα εγκαταλελειμμένοι ταμιευτήρες πετρελαίου και αερίου στις ΗΠΑ θα μπορούσαν να κρατήσουν περίπου 2,9 δισεκατομμύρια τόνους CO<sub>2</sub>, ενώ τα τελευταία αποθέματα πετρελαίου και αερίου θα κρατούσαν κατά προσέγγιση 100 δισεκατομμύρια τόνους CO<sub>2</sub> (Winter and Bergman 1996). Αυτά συγκρίνονται με τις τρέχουσες εκπομπές των σταθμών παραγωγής ενέργειας στις ΗΠΑ που είναι περίπου 1,7 δισεκατομμύρια τόνους CO<sub>2</sub> ανά έτος. Ωστόσο, τα περισσότερα από τα φρεάτια θα έπρεπε να επαναεξορυχτούν και η πραγματική αποτελεσματικότητα της ικανότητάς τους είναι αβέβαιη, δεδομένου ότι αλλαγές στον ταμιευτήρα μπορεί να έχουν εμφανιστεί λόγω της εισβολής ύδατος / άλμης ή της αλλαγής της γεωλογικής τους δομής. Η βιομηχανία πετρελαίου και αερίου έχει σημαντική εμπειρία στη διαχείριση τέτοιων ταμιευτήρων, αλλά είναι ιδιαίτερα ανήσυχη για τα θέματα μακροπρόθεσμης ευθύνης. Με εξαίρεση το Τέξας, οι περισσότεροι ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου δε βρίσκονται κοντά στις αρχικές πηγές παραγωγής του CO<sub>2</sub>, έτσι ένα νέο δίκτυο σωληνώσεων CO<sub>2</sub> θα χρειαζόταν για τη σύνδεση των σταθμών παραγωγής ενέργειας με τις κατάλληλες τοποθεσίες αποθήκευσης. Οι δαπάνες, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τα ζητήματα ασφάλειας που σχετίζονται με ένα τέτοιο δίκτυο πρέπει να εξεταστούν με κάθε δυνατή ανάλυση της μεθόδου αποθήκευσης. Κυρίως εξαιτίας των διαφορών στην απαραίτητη σωλήνωση, οι δαπάνες τις αποθήκευσης θα είναι πολύ συγκεκριμένες ανά τοποθεσία.

Οι ενεργοί ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν. Για παράδειγμα, το CO<sub>2</sub> χρησιμοποιείται συχνά στην ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου (OTA 1978, Lake 1989). Η ποσότητα του CO<sub>2</sub> η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου και σχετικές εφαρμογές είναι μικρή σε σχέση με τις συνολικές εκπομπές του CO<sub>2</sub> και το CO<sub>2</sub> μπορεί αυτήν την περίοδο να παρασχεθεί από φυσικές πηγές με περίπου το 1/3 του κόστους που φαίνεται να έχει το CO<sub>2</sub> αν κατακρατηθεί από εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας (Herzog et al. 1993). Ως εκ τούτου δεν υπάρχει κανένα άμεσο κίνητρο για χρήση του CO<sub>2</sub> των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας για αυτόν τον λόγο. Εν τούτοις, εάν εξεταστούν οι πιστώσεις για τις εκπομπές του CO<sub>2</sub> που αποφεύχθηκαν, η τιμή του CO<sub>2</sub> των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας μειώνεται και αυτή η επιλογή γίνεται πολύ ελκυστική. Ενώ υπάρχει η βασική τεχνολογία για ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου, πρόσθετη έρευνα απαιτείται για τροποποίηση των διαδικασιών ενισχυμένης ανάκτησης πετρελαίου για βελτιστοποίηση της αποθήκευσης CO<sub>2</sub>.

Το CO<sub>2</sub> μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να ενισχύσει την ανάκτηση «coal - bed» μεθανίου (Gunter et al. 1997). Χρησιμοποιώντας αυτήν την τεχνολογία, οι εγκαταλελειμμένες και αντικοινομικές «ραφές» άνθρακα γίνονται πιθανές περιοχές αποθήκευσης. Αντίθετα από την ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου, όπου διαρροή του CO<sub>2</sub> εμφανίζεται τελικά, το CO<sub>2</sub> που εγχέεται απορροφάται στην επιφάνεια του άνθρακα και έτσι παραμένει εναποτεθειμένο. Οι κατ' εκτίμηση πηγές «coal - bed» μεθανίου στις ΗΠΑ είναι μεγάλες, κυμαινόμενες από 275 έως 649 τρισεκατομμύρια κυβικά πόδια, με την τρέχουσα παραγωγή να προέρχεται κυρίως από το San Juan Basin στο SW Colorado και το Black Warrior Basin στην Alabama (Dawson, 1995). Αν και ακόμα στο στάδιο ανάπτυξης, η διαδικασία έχει εξεταστεί σε πιλοτικής κλίμακας μελέτες πεδίου που πραγματοποιούνται από την Amoco και Meridian στο San Juan Basin.

Οι θόλοι με άλμη και τα σπήλαια έχουν θεωρητικά μια μεγάλη ικανότητα αποθήκευσης και έχουν χρησιμοποιηθεί για παρεμφερείς σκοπούς αποθήκευσης πετρελαίου, συμπιεσμένου αερίου και φυσικού αερίου (Tek 1989), αλλά οι σχετικές δαπάνες είναι ένα σημαντικό εμπόδιο. Χωρίς μια σημαντική ανακάλυψη, οι δαπάνες ανασκαφής των σπηλαίων είναι πολύ υψηλές για να είναι πρακτικές. Οι θόλοι με άλμη μπορούν να ανασκαφούν με λιγότερο κόστος από τη λύση των μεταλλείων. Ωστόσο, και στις δυο περιπτώσεις μεγάλες ποσότητες πετρωμάτων ή άλμης θα έπρεπε να ανασκαφούν, να διαχειριστούν και είτε να χρησιμοποιηθούν είτε να διατεθούν με τρόπο περιβαλλοντικά αποδεκτό.



**Σχήμα 9.8.** Αλατούχα υδροφόρα στρώματα στις ΗΠΑ βασιζόμενα στην αμερικανική γεωλογική έρευνα

Πηγή: Bergman and Winter, 1996

Τα υδροφόρα στρώματα μεγάλου βάθους μπορούν να είναι η καλύτερη μακροπρόθεσμη επιλογή αποθήκευσης στο υπέδαφος. Τέτοια υδροφόρα στρώματα είναι γενικά αλατούχα και υδάτινα απομονωμένα από τα υδροφόρα στρώματα μικρού βάθους και την τροφοδοσία του νερού της επιφάνειας που χρησιμοποιείται ως πόσιμο νερό. Ανάλογα με τις ιδιότητες των υδροφόρων στρωμάτων, το  $\text{CO}_2$  που εγχέεται θα μπορούσε να αντικαταστήσει το ύδωρ και μέρος αυτού θα μπορούσε να μείνει ως καθαρό  $\text{CO}_2$  (Gunter et al. 1993, Hitchon 1996). Η κατ' εκτίμηση δυνατότητα αποθήκευσης των υδροφόρων στρωμάτων μεγάλου βάθους στις ΗΠΑ είναι 5 – 500 δισεκατομμύρια τόνοι  $\text{CO}_2$  (Bergman and Winter 1996), έναντι των ετήσιων εκπομπών των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας στις ΗΠΑ που είναι περίπου 1,7 δισεκατομμύρια τόνοι  $\text{CO}_2$ . Το σχήμα 9.8. παρουσιάζει τις θέσεις που βρίσκονται τα υδροφόρα στρώματα μεγάλου βάθους στις ΗΠΑ. Η χωρική αντιστοιχία μεταξύ των τοποθεσιών αποθήκευσης και των πηγών του  $\text{CO}_2$  είναι κάπως καλύτερη για τα υδροφόρα στρώματα μεγάλου βάθους από ότι για τους ταμειυτήρες πετρελαίου και αερίου· πράγματι, οι Bergman and Winter (1996) υπολογίζουν ότι το 65% του  $\text{CO}_2$  που έχει κατακρατηθεί από τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας στις ΗΠΑ θα μπορούσε πιθανόν να εγχυθεί άμεσα στα υδροφόρα στρώματα μεγάλου βάθους χωρίς την ανάγκη για μεγάλο δίκτυο σωληνώσεων. Επειδή έχει στραφεί λιγότερο ενδιαφέρον σε αυτά, οι ιδιότητες των υδροφόρων στρωμάτων δεν είναι τόσο γνωστές όσο εκείνες των ταμειυτήρων πετρελαίου και αερίου, γεγονός το οποίο οδηγεί σε τεχνική αβεβαιότητα. Το υδροφόρο στρώμα πρέπει να βρίσκεται κάτω από ένα σχετικά στεγανό πέτρωμα, όμως πρέπει



να υπάρχει υψηλή διαπερατότητα, καθώς επίσης και πορώδες, κάτω από το πέτρωμα ώστε να επιτραπεί στο CO<sub>2</sub> να διανεμηθεί αποτελεσματικά. Οι επιπτώσεις του διαχωρισμού βαρύτητας και της δακτυλίωσης μπορεί να περιορίσουν την αποτελεσματικότητα της αποθήκευσης και τα σπασίματα και τα ανοίγματα του περιβλήματος μπορεί να επιτρέψουν τη διαρροή (Lindeberg 1997). Τα ζητήματα της ασφάλειας που συνδέονται με τη διαρροή είναι επίσης μια σημαντική ανησυχία (Holloway 1997). Οι επιχειρήσεις ενέργειας έχουν πληροφορίες οι οποίες μπορούν να βοηθήσουν στη διευκρίνιση μερικών από αυτές τις τεχνολογικές ανησυχίες και να παρέχουν πιο εξακριβωμένες πληροφορίες για τις θέσεις των υδροφόρων στρωμάτων στις ΗΠΑ, αλλά τα ζητήματα της ευθύνης πρέπει να επιλυθούν προτού να επιτευχθεί η συνεργασία με τη βιομηχανία. Επίσης πρέπει να αποκτηθεί εμπειρία από την εναπόθεση των βιομηχανικών αποβλήτων, καθώς οι ΗΠΑ χρησιμοποιούν σήμερα πάνω από 400 φρεάτια για έγχυση περίπου 75 εκατομμυρίων κυβικών μέτρων βιομηχανικών αποβλήτων (μερικά επικίνδυνα και μερικά όχι) σε υδροφόρα στρώματα μεγάλου βάθους κάθε χρόνο (Bergman and Winter 1996). Εντούτοις, οι κανονισμοί σχετικά με την εναπόθεση στα υδροφόρα στρώματα ποικίλουν από κράτος σε κράτος και δε θα επέτρεπαν σήμερα όλα τα κράτη μια τέτοια εναπόθεση. Η DOE / PETC έχει αρχίσει μια μελέτη των οικονομικών, νομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών ζητημάτων που περιβάλλουν τη χρήση ενός μεγάλου υδροφόρου στρώματος, του Mt. Simon, το οποίο βρίσκεται κάτω από το Illinois, την Indiana, το Ohio, το Michigan, το Kentucky και την Pennsylvania.

#### Πλαίσιο 9.1. Παγκόσμια Δυνατότητα Αποθήκευσης του CO<sub>2</sub>

Το IEA Greenhouse Gas R&D Programme υπολόγισε την παγκόσμια δυνατότητα αποθήκευσης σε δισεκατομμύρια τόνους CO<sub>2</sub> (Ormerod 1994). Όπως φαίνεται από το μεγάλο εύρος των τιμών παρακάτω, αυτός ο στόχος είναι πολύ δύσκολος λαμβάνοντας υπόψη όλες τις αβεβαιότητες:

• Ωκεανός	5,100 -> 100,000
• Υδροφόρα στρώματα μεγάλου βάθους	320 - 10,000
• Εξαντλημένοι ταμειυτήρες αερίου	500 - 1100
• Εξαντλημένοι ταμειυτήρες πετρελαίου	150 - 700

Δεδομένου ότι ο κόσμος παράγει περίπου 22 δισεκατομμύρια τόνους CO<sub>2</sub> ετησίως από την παραγωγή ενέργειας, είναι σαφές ότι οι θεωρητικές χωρητικότητες είναι περισσότερο από επαρκείς. Έρευνα απαιτείται για να βοηθήσει να μικρύνει το εύρος αυτών των τιμών και να καθορίσει ποια μερίδα αυτής της δυνατότητας πρέπει να χρησιμοποιηθεί πρακτικά.

Πηγή: Howard Herzog, Elizabeth Drake, Eric Adams, «CO<sub>2</sub> Capture, Reuse, and Storage Technologies for Mitigating Global Climate Change», Energy Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, (1997)

Οι δαπάνες για γεωλογική αποθήκευση του CO<sub>2</sub> μπορεί να ποικίλουν από €0,8 - 6,7 ανά τόνο CO<sub>2</sub> ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες. Οι δαπάνες αποθήκευσης μέσω σωληνώσεων έχουν υπολογιστεί σε €0,8 - 2,5 ανά τόνο CO<sub>2</sub> ανά 100km (Hendriks 1994). Το εύρος των δαπανών για την εναπόθεση (συμπεριλαμβανομένης της μεταφοράς) είναι €4,2 - 12,5 ανά τόνο CO<sub>2</sub>.

Με βάση τα παραπάνω, αρκετά βήματα πρέπει να εφαρμοστούν για περαιτέρω ανάπτυξη της γεωλογικής εναπόθεσης του CO<sub>2</sub>. Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι μερικές από τις αναγκαίες πληροφορίες είναι διαθέσιμες, αλλά μη προσιτές λόγω του ότι είναι ιδιόκτητες και αναξιόπιστες εκτιμήσεις· αυτά τα εμπόδια πρέπει να υπερνικηθούν προκειμένου να αποφευχθεί ο διπλασιασμός του κόστους.

## *B) Τεχνολογία Ωκεάνιας Αποθήκευσης*

Ο ωκεανός αντιπροσωπεύει τη μεγαλύτερη πιθανή δεξαμενή για το ανθρωπογενές CO<sub>2</sub> (πλαίσιο 9.1.) και ήδη περιέχει περίπου 140,000 δισεκατομμύρια τόνους CO<sub>2</sub> (οι ετήσιες παγκόσμιες ανθρωπογενείς εκπομπές είναι περίπου 22 δισεκατομμύρια τόνοι CO<sub>2</sub>). Επιπλέον, η άμεση απελευθέρωση του CO<sub>2</sub> στον ωκεανό θα επιτάχυνε τις τρέχουσες, αλλά αργές, φυσικές διαδικασίες, μέσω των οποίων πάνω από 90% των τωρινών εκπομπών εισάγονται αυτήν την περίοδο έμμεσα στον ωκεανό (Sarmiento 1993). Όπως φαίνεται στο σχήμα 9.9., απελευθερώνοντας το CO<sub>2</sub> άμεσα στον ωκεανό, θα μειώνονταν και οι μέγιστες ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις του CO<sub>2</sub> και το ποσοστό αύξησής τους. Εντούτοις, οι συγκεντρώσεις του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα και τον ωκεανό θα εξισορροπηθούν σε χρονικό διάστημα των 1000 ή περισσότερων ετών, ανεξάρτητα από το μέρος στο οποίο απελευθερώθηκε το CO<sub>2</sub>. Η ιδέα της ωκεάνιας αποθήκευσης αναφέρθηκε αρχικά από τον Marchetti (1997) ο οποίος συνέλαβε τη διοχέτευση του CO<sub>2</sub> με σωλήνες στις εκροές της Μεσογείου, από όπου θα μπορούσε να απομακρυνθεί βαθύτερα στον Ατλαντικό. Μετέπειτα εργασία αναλήφθηκε προς τα τέλη του 1970 (π.χ. Hoffert et al. 1979, Baes et al 1980), αλλά περισσότερη έρευνα έχει πραγματοποιηθεί τα τελευταία έξι χρόνια, κυρίως από ερευνητές στην Ιαπωνία, τη Νορβηγία και τις ΗΠΑ.

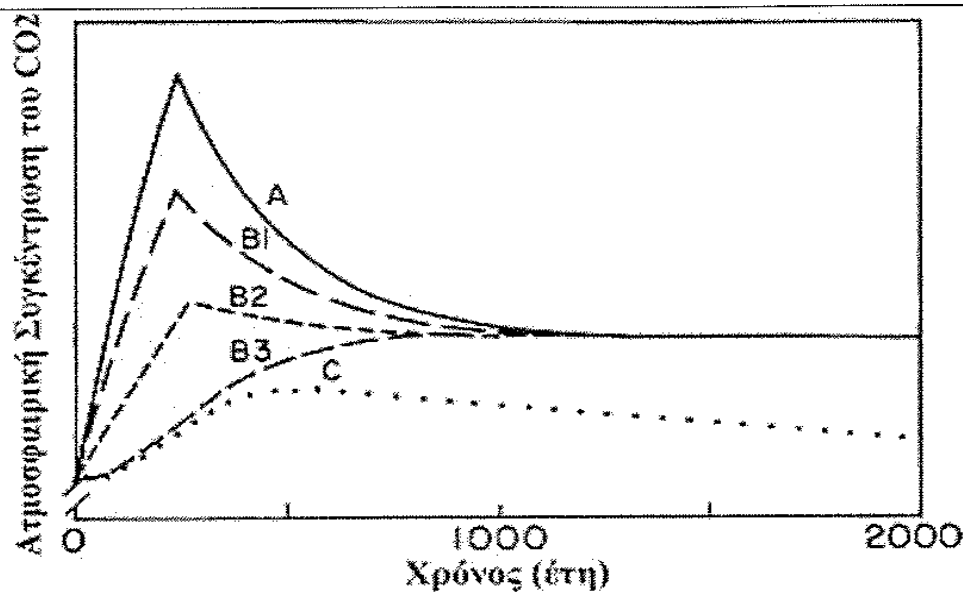
Το σχήμα 9.10. παρουσιάζει πέντε μεθόδους για άμεση έγχυση του CO<sub>2</sub> στον ωκεανό:

- Ξηρός πάγος που απελευθερώνεται στην ωκεάνια επιφάνεια από ένα σκάφος (Nakashiki et al. 1991)
- Έγχυση υγρού CO<sub>2</sub> σε ένα βάθος περίπου 1000 μέτρων από έναν σωλήνα που ρυμουλκείται από ένα κινούμενο σκάφος και διαμορφώνει έναν αυξανόμενο όγκο σταγονιδίων (Ozaki et al. 1995)
- Έγχυση υγρού CO<sub>2</sub> σε βάθος περίπου 1000 μέτρων από ένα πολλαπλό στρώμα στον πάτο του ωκεανού και διαμορφώνει έναν αυξανόμενο όγκο σταγονιδίων (Liro et al. 1992)
- Ένα πυκνό μίγμα θαλασσινού νερού - CO<sub>2</sub>, το οποίο δημιουργείται σε βάθος μεταξύ 500 και 1000 μέτρων και διαμορφώνει ένα βυθιζόμενο ρεύμα (Haugan and Drange 1992)
- Υγρό CO<sub>2</sub> που εισάγεται σε ένα θαλάσσιο στρώμα χαμηλής πίεσης και δημιουργεί μια σταθερή «βαθιά λίμνη» σε βάθος περίπου 400 μέτρων (Ohsumi 1995)

Οι σχετικές αξίες κάθε σεναρίου περιλαμβάνουν ζητήματα αποδοτικότητας της εναπόθεσης, του κόστους, της τεχνικής εφικτότητας και της περιβαλλοντικής επίδρασης (πίνακας 9.10.).

Η αποδοτικότητα της εναπόθεσης εξαρτάται από το πόσο καιρό θα παραμείνει το CO<sub>2</sub> στον ωκεανό (σχήμα 9.9.). Όπως φαίνεται, μέσω της χρήσης παγκόσμιων προτύπων κυκλοφορίας, η αποδοτικότητα της εναπόθεσης είναι σαφώς ανάλογη με την περιοχή (Bacastow and Dewey 1996). Εάν το CO<sub>2</sub> που εγχέεται ενσωματωθεί στη

γενική ωκεάνια κυκλοφορία των υδάτων μεγάλου βάθους, αναμένεται χρόνος παραμονής περίπου 1000 ετών.



**Σχήμα 9.9.** Ποιοτική απεικόνιση της επίδρασης της ωκεάνιας εναπόθεσης στις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις του CO<sub>2</sub>, βάση ενός σταθερού ποσοστού εκπομπής CO<sub>2</sub> για 250 έτη και καμία περαιτέρω εκπομπή. Η γραμμή A αντιπροσωπεύει τις συνηθισμένες εκπομπές στην ατμόσφαιρα. Επειδή η ατμόσφαιρα και ο ωκεανός δε βρίσκονται σε ισορροπία, οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις θα μειώνονται μετά το τέλος των εκπομπών μέχρι να επιτευχθεί ισορροπία σε περίπου 1000 έτη. Οι γραμμές B1, B2, B3 παρουσιάζουν την επίδραση της ωκεάνιας αποθήκευσης είτε με αυξανόμενη ποσότητα έγχυσης CO<sub>2</sub> στον ωκεανό είτε με αυξανόμενο βάθος εναπόθεσης, που οδηγεί σε πιο μεγάλους χρόνους παραμονής. Η γραμμή C παρουσιάζει την πιθανή επίδραση της χημείας του ανθρακικού άλατος (ή της στερεής απόθεσης στον ωκεάνιο βυθό), με την οποία μερικό από το CO<sub>2</sub> εναποτίθεται μόνιμα, χωρίς ποτέ να επιστρέψει στην ατμόσφαιρα

Πηγή: Wilson 1992

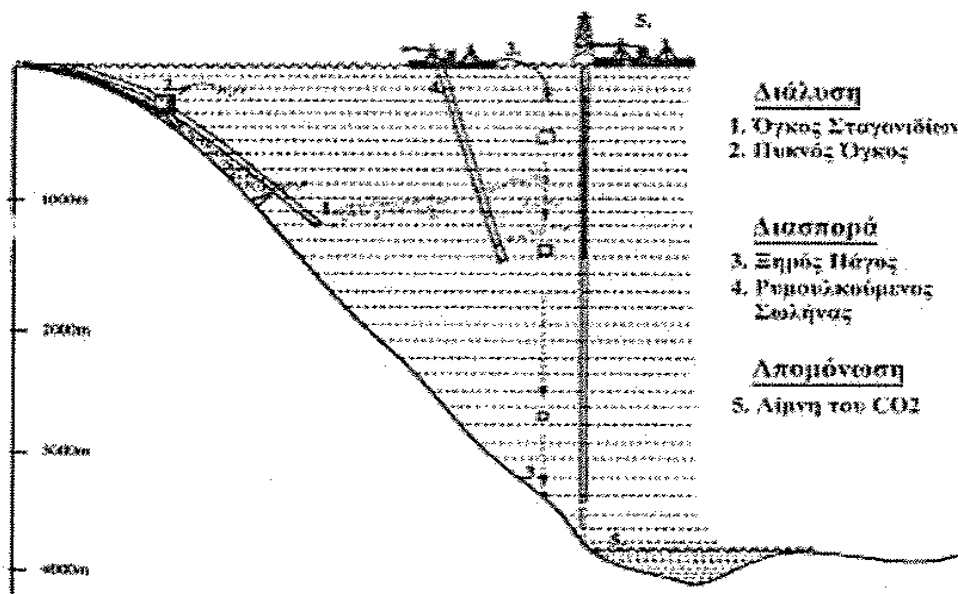
Οι δαπάνες και η εφικτότητα είναι παράγοντες της απόστασης και του βάθους μεταξύ της κατακράτησης και της έγχυσης του CO<sub>2</sub>. Οι μικρότερες αποστάσεις ευνοούν τη μεταφορά με σωληνώσεις, με συμπιεσμένο CO<sub>2</sub> ως υπερκρίσιμο (πυκνή φάση) υγρό, ενώ οι μεγαλύτερες αποστάσεις ευνοούν τη μεταφορά με φορτηγά πλοία με το CO<sub>2</sub> ως «κατεψυγμένο» υγρό (Golomb 1997). Στην περίπτωση του ξηρού πάγου, σημαντικές πρόσθετες δαπάνες θα υπάρχουν για τη στερεοποίηση του CO<sub>2</sub>. Η τεχνολογία συμβατικών σωληνώσεων δεν έχει εφαρμοστεί σε βάθη πέρα των 1000 μέτρων, όπως θα απαιτούσε μια βαθιά λίμνη, αν και οι λόγοι μάλλον οφείλονται στις τρέχουσες ανάγκες της βιομηχανίας πετρελαίου και αερίου και όχι σε οποιονδήποτε περιορισμό της ωκεάνιας μηχανικής. Ελάχιστη εμπειρία υπάρχει για την τεχνολογία των σωλήνων που ρυμουλκούνται από κινούμενα σκάφη, από την έρευνα OTEC και το αρχικό σχέδιο του προγράμματος στην Ιαπωνία (Ozaki et al. 1995, Ozaki 1997). Το πυκνό ρεύμα βαρύτητας θα απαιτούσε μια κατάλληλη τοποθεσία με κατάλληλη κλίση και σχεδιασμό μιας συσκευής ανάμιξης για τη συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> (Adams et al 1995, Kajishima et al 1995), προκειμένου να παραχθεί μια ικανοποιητική πλευστότητα. Επομένως, η έγχυση ως όγκος σταγονιδίων από έναν σωλήνα στο βυθό είναι η μόνη επιλογή που είναι εφικτή με την υπάρχουσα αποδεδειγμένη τεχνολογία, αλλά

ακόμη και αυτή η επιλογή έχει αβεβαιότητες οι οποίες συνδέονται με τη φυσική / χημική συμπεριφορά του CO<sub>2</sub> καθώς αναμιγνύεται με το θαλασσίνο νερό. Οι δαπάνες για την ωκεάνια εναπόθεση του CO<sub>2</sub> (συμπεριλαμβανομένης της μεταφοράς) είναι κατ' εκτίμηση τόσο χαμηλές όσο €0,8 - 5 ανά τόνο CO<sub>2</sub> (Freund and Ormerod 1997), αλλά βάσει των Herzog et al (1995) μια τιμή των €4,2 – 12,5 ανά τόνο CO<sub>2</sub> είναι μια πιο ρεαλιστική εκτίμηση.

**Πίνακας 9.10. Σύγκριση των ωκεάνιων επιλογών αποθήκευσης**

Επιλογές	Ανάπτυξη που Απαιτείται	Κόστος	Περιβαλλοντικές Επιδράσεις	Διαρροή στην ατμόσφαιρα
Ξηρός πάγος	Χαμηλότερη	Υψηλό	Χαμηλές	Χαμηλή – Μέτρια
Ρυμουλκούμενος σωλήνας	Μέτρια	Χαμηλό - Μέτριο	Χαμηλότερες	Μέτρια
Αυξανόμενος όγκος σταγονιδίων	Χαμηλή	Χαμηλό	Χαμηλές – Μέτριες	Μέτρια
Πυκνός όγκος σταγονιδίων	Μέτρια	Χαμηλότερο	Υψηλότερες	Μέτρια
Λίμνη CO <sub>2</sub>	Υψηλότερη	Υψηλό;	Χαμηλές	Χαμηλότερη

Πηγή: Howard Herzog, Elizabeth Drake, Eric Adams, «CO<sub>2</sub> Capture, Reuse, and Storage Technologies for Mitigating Global Climate Change», Energy Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, (1997)



**Σχήμα 9.10.** Πέντε σενάρια εγχύσεων στα οποία εστίασε η πρόσφατη έρευνα. Τα σενάρια παρουσιάζονται σχηματικά στο σχήμα. Κατά κοινή ομολογία τα σενάρια του ρυμουλκούμενου σωλήνα και του όγκου σταγονιδίων προσφέρουν τις καλύτερες προσεγγίσεις για το εγγύς μέλλον

Πηγή: Howard Herzog, Elizabeth Drake, Eric Adams, «CO<sub>2</sub> Capture, Reuse, and Storage Technologies for Mitigating Global Climate Change», Energy Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, (1997)

Οι περιβαλλοντικές επιδράσεις μπορεί να είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που καθορίζει την αποδοχή της ωκεάνιας αποθήκευσης, δεδομένου ότι η στρατηγική βασίζεται στο γεγονός ότι οι επιδράσεις στον ωκεανό θα είναι σημαντικά λιγότερες

από τις επιδράσεις της συνεχούς εκπομπής στην ατμόσφαιρα που αποφεύχθηκαν. Διάφορες αναφορές έχουν προσδιορίσει τις πιθανές επιδράσεις (Magnesen and Wahl 1993, Kollek 1993, Auerbach et al. 1996), με σημαντικότερη αυτή της μείωσης του pH ως αποτέλεσμα της αντίδρασης του CO<sub>2</sub> με το θαλασσινό νερό. Το ανθρακικό άλας που διαλύεται στο θαλασσινό νερό και στα ιζήματα σε μικρά βάθη θα παράσχει μια προφύλαξη, αλλά ανάλογα με τη μέθοδο απελευθέρωσης, το pH αναμένεται να ποικίλει από τόσο χαμηλά όσο 4 πολύ κοντά στο σημείο έγχυσης, μέχρι την περιβαλλοντική του τιμή των 8. Επιδράσεις θα εμφανίζονταν κυρίως στους θαλάσσιους οργανισμούς που δεν κολυμπάνε (π.χ. ζωοπλαγκτόν και βακτηρίδια) και κατοικούν σε βάθη περίπου 1000 μέτρων ή μεγαλύτερα και το μέγεθός τους θα εξαρτηθεί και από το επίπεδο αλλαγής του pH και από τη διάρκεια της έκθεσης (Auerbach 1996). Εντούτοις, τα διαθέσιμα στοιχεία δείχνουν ότι η θνησιμότητα που συνδέεται με την αλλαγή του pH μπορεί να αποφευχθεί πλήρως εάν η έγχυση σχεδιαστεί κατάλληλα, ώστε να διασκορπίζει το CO<sub>2</sub> καθώς διαλύεται (Caulfield 1996).

Σε παγκόσμιες κλίμακες, οι ανθρωπογενείς εκπομπές του CO<sub>2</sub> που εμφανίζονται σήμερα θα προκαλέσουν μια βαθμιαία πτώση του μέσου ωκεάνιου pH περίπου 0,5 μονάδων, κατά τη διάρκεια των επόμενων αιώνων. Η άμεση έγχυση του CO<sub>2</sub> στον ωκεανό θα διαταράξει το σύστημα λιγότερο από άλλη 0,1 μονάδα του pH. Ωστόσο, η αυξανόμενη οξύτητα λόγω της άμεσης προσθήκης του CO<sub>2</sub> θα εμφανιστεί πρώτιστα στον βαθύ ωκεανό, ενώ η οξύτητα των παραγωγικότερων υδάτων της επιφάνειας θα μετριαζόταν (Haugan and Drange 1995).

Η βιωσιμότητα της ωκεάνιας αποθήκευσης ως επιλογή μετριασμού του CO<sub>2</sub> θα εξαρτηθεί από κοινωνικές και πολιτικές εκτιμήσεις. Λαμβάνοντας υπόψη τη σημασία που δείχνει η κοινωνία στον ωκεανό, η στρατηγική θα απαιτήσει να συμπεριληφθούν όλα τα μέρη (ιδιωτικές, δημόσιες, μη κυβερνητικές οργανώσεις) στην τρέχουσα έρευνα και συζήτηση.

### *Γ) Τεχνολογίες Άμεσης Χρήσης*

Αν και η άμεση χρήση δε φαίνεται να προσφέρει ευκαιρίες μεγάλης κλίμακας για μετριασμό, είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ότι ένας μεγάλος αριθμός μικρών χρήσεων μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στην συνολική στρατηγική μετριασμού. Επιπλέον, αν το CO<sub>2</sub> μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή χρήσιμων προϊόντων, παρέχει ένα πλεονέκτημα έναντι των δαπανών κατακράτησης και αποφεύγει τις δαπάνες γεωλογικής ή ωκεάνιας αποθήκευσης. Οι ευκαιρίες της άμεσης χρήσης του CO<sub>2</sub> είναι :

- Πολλές διαφορετικές βιομηχανικές ευκαιρίες υπάρχουν για τη χρήση του CO<sub>2</sub> από εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, για σύνδεση των βιομηχανικών διαδικασιών για ελαχιστοποίηση των εκπομπών του CO<sub>2</sub>, ή για ανέξοδη κατακράτηση των πλούσιων σε CO<sub>2</sub> ρευμάτων
- Η αυξανόμενη παραγωγή του υδρογόνου για χρήση ως καύσιμο, προσφέρει πρόσθετες ευκαιρίες ανέξοδης κατακράτησης CO<sub>2</sub>
- Η μετατροπή του CO<sub>2</sub> σε βιομάζα με μικροάλγη είναι ο κύριος υποψήφιος για την άμεση βιολογική χρήση του CO<sub>2</sub> των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας και έχει δυνατότητα για σημαντικές βελτιώσεις της παραγωγικότητας της μετατροπής
- Οι πιο μακροπρόθεσμες προοπτικές για πιθανή αποθήκευση του CO<sub>2</sub> εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας ως μετάλλευμα είναι ενδιαφέρουσες αλλά αβέβαιες ως προς την πρακτικότητα

- Η μεγάλης κλίμακας μετατροπή του CO<sub>2</sub> εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας σε καύσιμα, όπως η μεθανόλη, εμφανίζεται ελκυστική βάση των κριτηρίων για αποτελεσματική ενεργειακή χρήση.

#### Προτεινόμενα Κριτήρια Εφικτότητας για την Αξιολόγηση των Επιλογών Χρήσης

Οι Audus και Oonk (1997) παρουσιάζουν τα ακόλουθα κριτήρια για την αξιολόγηση της χρησιμότητας των πιθανών διαδικασιών χρήσης για σημαντικό μετριασμό του CO<sub>2</sub> :

1. Μείωση των καθαρών εκπομπών του CO<sub>2</sub> : καταναλώνει η διαδικασία τον άνθρακα; (δηλ, είναι η μοριακή αναλογία άνθρακα / υδρογόνου των στερεών προϊόντων μεγαλύτερη από αυτή των πρώτων υλών;)
2. Λογική είσοδος ενέργειας για μετατροπή: η θερμότητα της αντίδρασης για τη διαδικασία δεν πρέπει να είναι περισσότερη από 1,25 φορές της θερμότητας της καύσης των καυσίμων αναφοράς (αυτή η εμπειρική μέθοδος ισχύει ικανοποιητικά για χημικές ουσίες, οι οποίες είναι κυρίως άνθρακας και υδρογόνο, αλλά μπορεί να δώσει συγκρουόμενα αποτελέσματα με άλλες χημικές ουσίες)
3. Όταν εναλλακτικές διαδικασίες χρήσης συγκρίνονται, η καλύτερη επιλογή θα περιλαμβάνει συνήθως :
  - Μείωση του αριθμού των βημάτων της επεξεργασίας
  - Ηπιότερες συνθήκες λειτουργίας
  - Λιγότερες ασυνέχειες στις συνθήκες λειτουργίας
  - Βελτιωμένες δυνατότητες για την ολοκλήρωση της διαδικασίας
4. Βελτιωμένη ισορροπία της χημικής αντίδρασης: αρνητική ή ελαφρώς θετική αλλαγή της ελεύθερης ενέργειας ( $\Delta G$ ) υποδηλώνει ότι η ισορροπία της αντίδρασης ευνοεί το επιθυμητό προϊόν
5. Αποτελεσματικότητα:
  - Σημαντική διάρκεια ζωής της αποθήκευσης (χρονικά διαστήματα 100 έως 1000 ετών ή περισσότερα)
  - Επαρκές μέγεθος αγοράς για να εναποτεθούν τουλάχιστον 10 εκατομμύρια τόνοι CO<sub>2</sub> ανά έτος
  - Διαθεσιμότητα των συναντιδρώντων για επεξεργασία τουλάχιστον 10 εκατομμυρίων τόνων CO<sub>2</sub> ετησίως

Δυο παραδείγματα αυτών των κριτηρίων παρουσιάζονται στην εργασία τους με τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η σταθεροποίηση του CO<sub>2</sub> στα ανόργανα ανθρακικά άλατα φαίνεται μια εφικτή μέθοδος μείωσης των εκπομπών του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα
- Από την άποψη της μείωσης των εκπομπών CO<sub>2</sub>, η παραγωγή της μεθανόλης από την μετατροπή του ατμού του μεθανίου είναι καλύτερη διαδικασία από την παραγωγή μεθανόλης από CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>.

#### Δ) Άλλες Προσεγγίσεις για Μείωση του CO<sub>2</sub>

Αυτό το κεφάλαιο έχει εστιάσει ως τώρα στις μέσο- και μακροπρόθεσμες τεχνολογίες κατακράτησης και εναπόθεσης του CO<sub>2</sub>. Επιπλέον, υπάρχουν ποικίλες άλ-

λες δυνατότητες, οι οποίες είναι ενδιαφέρουσες για την βιομηχανία απολιθωμένων καυσίμων εάν αναζητά τεχνολογίες για αντιστάθμιση του CO<sub>2</sub>.

*Δασονομία.* Τα δέντρα και τα ξυλώδη φυτά εναποθέτουν CO<sub>2</sub> κατά τη διάρκεια των περιόδων ανάπτυξής τους. Η καταστροφή των δασών, ιδιαίτερα με την καύση των αποθεμάτων, απελευθερώνει το αποθηκευμένο CO<sub>2</sub> πίσω στην ατμόσφαιρα. Οι επιλογές δασονομίας περιλαμβάνουν την αποφυγή της αποδάσωσης, την επαναδάσωση (μετατροπή του εδάφους ξανά σε δάσος) και την αναδάσωση (φύτευση για δημιουργία ενός νέου δάσους). Κατά τη διάρκεια ζωής ενός δάσους, η παραγωγικότητα βιομάζας είναι περίπου 3-10 ξηροί τόνοι ανά εκτάριο ετησίως (περίπου ισότιμο με του ίδιου βάρους CO<sub>2</sub>). Καθώς το δάσος ωριμάζει πάνω από εκατό έτη, μερικό από το CO<sub>2</sub> που έχει εναποτεθεί μπορεί να απελευθερωθεί πίσω στην ατμόσφαιρα, μέσω της αποσύνθεσης των πεσμένων δέντρων ή μέσω δασικών πυρκαγιών. Όταν το δάσος είναι ώριμο, η πρόσθετη αποθήκευση άνθρακα είναι ελάχιστη. Οι δαπάνες φύτευσης είναι περίπου €833,3 - €1666,7 ανά εκτάριο στις προσπελάσιμες περιοχές (Yokoyama 1997). Εάν μια έκταση των 370 εκατομμυρίων εκταρίων αναδασωνόταν (περίπου ένα δεύτερο της έκτασης της λεκάνης του Αμαζονίου), θα μπορούσαν να κατακρατούνται ετησίως περίπου 3,6 δισεκατομμύρια τόνοι CO<sub>2</sub>, μέχρι να ωριμάσει το δάσος (Jarvis 1989). Εάν καμία άλλη δαπάνη δεν απαιτείται για την απόκτηση του εδάφους, την εδαφολογική αποκατάσταση, ή την άρδευση, τότε παρέχεται ένας αρχικός μετριασμός του CO<sub>2</sub> με κόστος από €0,8 έως €1,6 ανά τόνο που κατακρατήθηκε. Το IPCC (Bruce et al. 1996) υπολογίζει τις δαπάνες αναδάσωσης σε ένα κόστος της τάξης των €2,5 - €8,3 ανά τόνο CO<sub>2</sub> που εναποτέθηκε, αλλά σημειώνει ότι οι δαπάνες αυξάνονται ανάλογα με την κλίμακα των δραστηριοτήτων. Οι πραγματικές δαπάνες μπορεί να είναι σημαντικά υψηλότερες, εάν το κόστος του εδάφους και η δασική διαχείριση συμπεριλαμβάνονται και εάν λαμβάνεται μέριμνα για την απελευθέρωση μέρους του CO<sub>2</sub> πίσω στην ατμόσφαιρα. Οι Audus και Saroff (1995) παρουσιάζουν μια πλήρη αξιολόγηση του κύκλου ζωής μιας επιλογής αναδάσωσης σε μια μέση ευρωπαϊκή χώρα και εκτιμάνε τις δαπάνες περίπου €21,7 ανά τόνο CO<sub>2</sub> που αποφεύχθηκε.

Διάφορα επιχειρήματα πέρα από το κόστος μπορούν να προβληθούν ενάντια σε σημαντικά προγράμματα αναδάσωσης. Η εναπόθεση του CO<sub>2</sub> στα δάση είναι περιορισμένη και θα μειωνόταν κατά τη διάρκεια του επόμενου αιώνα, όταν οι ανάγκες για μετριασμό του CO<sub>2</sub> είναι πιθανό να είναι ακόμα περισσότερο έντονες. Η μακροπρόθεσμη μοίρα του άνθρακα που εναποτίθεται στα δάση είναι κάπως αβέβαιη, καθώς μια ποσότητα καταλήγει εναποτεθειμένη στο έδαφος και μια άλλη επιστρέφει τελικά στην ατμόσφαιρα ως CO<sub>2</sub>. Δεν υπάρχει επαρκής γνώση για τις ισορροπίες άνθρακα για τους διάφορους τύπους βιομάζας. Επίσης, η διαδεδομένη αναδάσωση αφαιρεί το έδαφος από την οικονομική χρήση και απαιτεί να μην χρησιμοποιούνται στο μέλλον τα ώριμα δάση κατά τρόπο που απελευθερώνουν το CO<sub>2</sub> που έχει εναποτεθεί πίσω στην ατμόσφαιρα. Εντούτοις, η αναδάσωση του εδάφους χαμηλής παραγωγικότητας μπορεί να είναι χρήσιμη, όπως η χρήση της για φύτευση δέντρων για σκιασμό και ζώνες καταφυγής γύρω από τα κτίρια ως μέτρο ενεργειακής συντήρησης. Επίσης, η αναδάσωση μπορεί να προσφέρει ψυχαγωγικά οφέλη, μπορεί να βοηθήσει τη βιοποικιλότητα, εάν αυτός είναι ένας παράλληλος στόχος, και μπορεί να σχεδιαστεί για προστασία των υδάτων. Μπορεί επίσης να χρησιμεύσει ως ένα βήμα προς την ενεργό βιώσιμη χρήση του ξύλου σαν βιοκαύσιμο για αντικατάσταση των απολιθωμένων καυσίμων ή ως συμπληρωματικό καύσιμο.

*Καλλιέργεια Βιοενέργειας.* Μια περισσότερο πρακτική και βιώσιμη προσέγγιση στην αναδάσωση είναι η καλλιέργεια βιομάζας για αντικατάσταση των απολιθωμένων καυσίμων. Εάν τα δέντρα ή τα φυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο το οποίο αντικαθιστά τη χρήση απολιθωμένων καυσίμων, τότε εμφανίζεται μια καθα-



ρή μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Ο Yokoyama (1997) επισημαίνει ότι η πιθανή διαθέσιμη γη για αναδάσωση παγκοσμίως (για έδαφος το οποίο δεν απαιτεί σημαντικές επενδύσεις στην εδαφολογική βελτίωση ή την άρδευση) είναι περίπου 340 εκατομμύρια εκτάρια. Εάν όλη αυτή η γη αναπτυσσόταν για ενεργειακές φυτείες, υπολογίζει μια θεωρητική ικανότητα για μετριασμό 5,1 δισεκατομμυρίων τόνων άνθρακα ετησίως, χρησιμοποιώντας δέντρα ευκαλύπτου με χρόνο ενός κύκλου 6 ετών (δηλ. φύτευση, ανάπτυξη, κοπή και χρήση ως βιοκαύσιμο και στη συνέχεια επανάληψη του κύκλου). Για σύγκριση, η συνολική έκταση της Βραζιλίας είναι 850 εκατομμύρια εκτάρια. Εντούτοις, η ενέργεια βιομάζας περιλαμβάνει συμπληρωματικές δαπάνες, όπως η διαχείριση των καλλιεργειών, η συγκομιδή και η μεταφορά. Εάν οι αποστάσεις μεταφοράς υπερβαίνουν τα 50 – 75 km, η ενέργεια μεταφοράς γίνεται μια σημαντική μερίδα της ενέργειας που περικλείει η βιομάζα. Οι καλύτερες εφαρμογές για την καλλιέργεια βιομάζας φαίνεται να είναι οι χαμηλότερα αναπτυσσόμενες περιοχές που εξυπηρετούν μιας μεσαίου μεγέθους εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας ή για χρήση ως συμπληρωματικού καυσίμου μαζί με τον άνθρακα.

*Χρήση των Καυσίμων Βιομάζας.* Τα βιολογικά καύσιμα αποτελούν προς το παρόν περίπου 4% της αρχικής ενέργειας που χρησιμοποιείται στις ΗΠΑ και χρησιμοποιούνται πρώτιστα στις βιομηχανίες δασικών προϊόντων. Η διαθέσιμη δασονομία και τα γεωργικά απόβλητα και υπολείμματα θα μπορούσαν να παρέχουν διπλάσια ενέργεια, εάν υπήρχαν κίνητρα για τη χρήση τους (Robertson and Sharouri 1993). Τα δημοτικά στερεά απόβλητα παράγουν περίπου 2,000 MW σήμερα στις ΗΠΑ. Ωστόσο, η βιομηχανία ξύλου έχει πρόβλημα, με εγκαταστάσεις στην Καλιφόρνια και τα Βορειοανατολικά να κλείνουν για οικονομικούς λόγους, κυρίως από τη συνεχόμενη πτώση των τιμών των απολιθωμένων καυσίμων και του ηλεκτρισμού και ενδεχομένως επιδεινώθηκαν περαιτέρω από την άρση των ελέγχων της βιομηχανίας ηλεκτρικής ενέργειας.

Η αποδοτική χρήση της βιομάζας στην αντικατάσταση των απολιθωμένων καυσίμων πρέπει να είναι ένα μεγάλο μέρος οποιουδήποτε προγράμματος μετριασμού του CO<sub>2</sub>. Για να γίνει η βιομάζα ένα περισσότερο ελκυστικό καύσιμο, απαιτούνται τεχνολογικές βελτιώσεις στην αποδοτικότητα καύσης. Αυτήν την περίοδο, οι αυτόνομες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας βιομάζας έχουν αποδοτικότητες περίπου 20 – 25 % σε σύγκριση με τα απολιθωμένα καύσιμα, τα οποία χρησιμοποιούνται τυπικά με αποδοτικότητες 30 – 40%. Η θερμοχημική αεριοποίηση μπορεί να έχει τη δυνατότητα για επίτευξη βελτιωμένων αποδοτικοτήτων, αλλά ακόμα απαιτεί σημαντική ανάπτυξη για να υπερνικήσει τα προβλήματα απόθεσης πίσσας και αλκαλίων. Βελτιωμένες τεχνολογίες αναπτύσσονται επίσης για να επιτραπεί η ξήρανση και καύση ολόκληρων δέντρων και καλύτερη διαχείριση της τέφρας και σκουριάς στους θαλάμους καύσης (Wiltsee et al. 1993). Επένδυση στις βελτιωμένες τεχνολογίες καύσης βιομάζας μπορεί να χρησιμεύσει ως μια γέφυρα για περισσότερο διαδεδομένη χρήση της ενέργειας βιομάζας στο μέλλον.

Η δυνατότητα για παραγωγή υγρών καυσίμων από τη βιομάζα είναι περιορισμένη. Οι συγκομιδές αμύλου ή πετρελαίου που χρησιμοποιούνται για μετατροπή σε αιθανόλη ή βιοντίζελ είναι ακριβές, με υψηλές απαιτήσεις ενέργειας και παράγουν μόνο μέτριο (ή μερικές φορές αρνητικό) μετριασμό του CO<sub>2</sub>. Ενώ μπορούν να υπάρξουν βολικές χρήσεις λόγω του επιθυμητού των υγρών καυσίμων, η μεγαλύτερη δυνατότητα για τη μείωση των απολιθωμένων εκπομπών CO<sub>2</sub> προέρχεται από τη χρήση στερεάς βιομάζας στις συμπληρωματικές ή αυτόνομες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας.

*Συμπληρωματικό Καύσιμο Βιομάζας με Άνθρακα και άλλα Απολιθωμένα Καύσιμα.* Αυτή η επιλογή, η οποία χρησιμοποιεί βιοκαύσιμα σε εγκαταστάσεις παραγωγής

γής ενέργειας απολιθωμένων καυσίμων υψηλότερης αποδοτικότητας, έχει μελετηθεί για πολλά έτη (McGowin and Hughes 1992). Προηγούμενες μελέτες υπογράμμισαν τη συμπληρωματική καύση των «παραγόμενων από απορρίμματα καυσίμων» (Refuse Derived Fuels, RDF), ενώ πρόσφατα έχει δοθεί έμφαση στα καύσιμα με βάση το ξύλο που είναι καθαρότερα και περισσότερο ομοιόμορφα από τα παραγόμενα από απορρίμματα καύσιμα. Η συμπληρωματική καύση του άνθρακα με τα απόβλητα ξύλου σε χαμηλά επίπεδα (περίπου 1% του ποσοστού θερμότητας) είναι ήδη σε εμπορική εφαρμογή. Πρόσφατα διάφορες χρήσεις (Hunt et al. 1997, Benjamin 1997) έχουν εξετάσει τη συμπληρωματική καύση των καυσίμων βιομάζας με άνθρακα σε υψηλότερα επίπεδα. Οι προκαταρκτικές ενδείξεις είναι ότι μερικοί τύποι υφιστάμενων λέβητων είναι κατάλληλη για καύση βιομάζας μέχρι τουλάχιστον 10% του ποσοστού θέρμανσης και 20% του βάρους τροφοδοσίας. Το συστατικό της βιομάζας μειώνει τις εκπομπές θείου και οι βελτιώσεις των καυστήρων μπορεί επίσης να οδηγήσουν σε μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub>. ωστόσο, η αποδοτικότητα μειώνεται από την ενέργεια που απαιτείται για να κονιοποιηθεί η βιομάζα και για ατμοποίηση της σχετικής υγρασίας. Η ενεργός ξήρανση της βιομάζας έχει μεγάλες ενεργειακές απώλειες. Έχουν γίνει σκέψεις για καύση της βιομάζας από τα επιλεγμένα ξηρά ρεύματα αποβλήτων, όπως το πριονίδι από ένα πριονιστήριο.

Παρά τις αβεβαιότητες, τα αποτελέσματα αυτών των μελετών δείχνουν ότι για συγκεκριμένους καυστήρες και για μικρού μεγέθους καύσιμα βιομάζας, οι κύριες δαπάνες για την προετοιμασία του καυσίμου και την τροφοδοσία του συστήματος είναι μόνο €83,3 – 166,7 ανά kW. Ακόμη και για τους λέβητες κονιοποιημένου άνθρακα, που απαιτούν περισσότερη προετοιμασία τροφοδοσίας και πιθανές τροποποιήσεις του λέβητα, οι δαπάνες εμφανίζονται ουσιαστικά χαμηλότερες από οποιαδήποτε άλλη επιλογή απομάκρυνσης του CO<sub>2</sub>. Εντούτοις, διάφορες τεχνικές αβεβαιότητες παραμένει να επιλυθούν για τη συμπληρωματική καύση: ποιότητα ιπτάμενης τέφρας, μέγιστο ποσοστό βιομάζας που μπορεί να εκμεταλλευτεί, αποτελέσματα της μεταβλητότητας της πηγής στην ποιότητα, κόστος και περιεκτικότητα σε υγρασία, για τη γενική απόδοση των εγκαταστάσεων. Τον Σεπτέμβριο του 1996, η DOE και το Electric Power Research Institute (EPRI) υπέγραψαν μια τρίχρονη συνεταιριστική συμφωνία των €4,2 εκατομμυρίων, για συνχρηματοδότηση των προγραμμάτων συμπληρωματικής καύσης και άλλων προγραμμάτων μετριασμού σε συνεργασία με την βιομηχανία ηλεκτρισμού.

Αν και μια πιο λεπτομερής ανάλυση των πηγών και των οικονομικών απαιτείται, προκαταρκτικές εκτιμήσεις δείχνουν ότι μέχρι 5% των εκπομπών των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας με καύση άνθρακα των ΗΠΑ θα μπορούσε να μετριαστεί μέσω της συμπληρωματικής καύσης, με κόστος λιγότερο από €8,3 ανά τόνο CO<sub>2</sub> που αποφεύχθηκε (Hughes and Benneman 1997). Στο μέλλον, η κατάλληλη βιομάζα για συμπληρωματική καύση θα μπορούσε να επεκταθεί πολύ μέσω της χρήσης συγκεκριμένων και εντατικά παραγόμενων τοπικών ξύλινων καυσίμων και ενεργειακών συγκομιδών.

*Τεχνητή Φωτοσύνθεση.* Έχει υπάρξει τρέχουσα βασική έρευνα για την ανάπτυξη φωτοχημικών διαδικασιών οι οποίες μιμούνται την βιολογική φωτοσύνθεση, μετατρέποντας την ηλιακή ενέργεια σε σταθερή χημική ενέργεια, χρησιμοποιώντας τη χλωροφύλλη ως καταλύτη. Οι περισσότερες από αυτές τις έρευνες έχουν εστιάσει σε μια διαδικασία φωτόλυσης, παράγοντας το υδρογόνο από το ύδωρ χρησιμοποιώντας το ηλιακό φως. Αν και μερικά συγκροτήματα ήταν σε θέση να καταλύσουν μια τέτοια αντίδραση, οι χαμηλές αποδοτικότητες και η αστάθεια της αντίδρασης είναι αποθαρρυντικές. Αυτό παραμένει ένας ενδιαφέρον τομέας για τη βασική έρευνα, αλλά πιθανή επιτυχία φαίνεται να βρίσκεται μακριά στο μέλλον (Lewis 1995).

*Παραγωγή Υδρογόνου μέσω Βιοφωτόλυσης.* Μερικές πρωταρχικές μελέτες (Miura et al. 1997, Ohtaguchi et al. 1997) ερευνούν τα βακτηριακά συστήματα τα οποία απορροφούν το CO<sub>2</sub> μέσω τεχνητής φωτοσύνθεσης και στη συνέχεια υποβάλλονται σε αναερόβια ζύμωση χωρίς φως για να παράγουν H<sub>2</sub>. Ένας πρόσθετος βιολογικός αντιδραστήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετατρέψει τα οργανικά συστατικά των απορριμμάτων σε διάφορα βιολογικά καύσιμα. Αυτά τα νέα συστήματα δημιουργούν ενδιαφέρουσες δυνατότητες, αν και υπόκεινται στους ίδιου τύπου περιορισμούς και δαπάνες που περιορίζουν την ενός βήματος βιομετατροπή σε καύσιμα.

Μια άλλη δυνατότητα είναι η χρήση ορισμένων πιέσεων (με άλγη) που μπορούν να χωρίσουν το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο με μια ενιαία ελαφριά αντίδραση. Αυτά τα άλγη μπορούν να αυξηθούν με το CO<sub>2</sub> ως μόνη πηγή άνθρακα (Greenbaum 1996). Αυτοί οι τύποι αντιδράσεων είναι πολύ ενδιαφέροντες, αλλά θα απαιτήσουν πρόσθετη έρευνα και ανάπτυξη για μελλοντική τους χρησιμότητα.

*Ωκεάνια Λίπανση για Σταθεροποίηση του CO<sub>2</sub>.* Ο Martin (1990) έδειξε ότι η έλλειψη της παραγωγικότητας φυτοπλαγκτού στο νότιο ωκεανό οφειλόταν στις περιορισμένες συγκεντρώσεις σιδήρου. Ο Kumar et al. (1995) επιβεβαίωσε αυτήν την υπόθεση δείχνοντας ότι κατά τη διάρκεια των παγετώνων όπου η συγκέντρωση σιδήρου αυξήθηκε στους ωκεανούς, η παραγωγικότητα ενισχύθηκε πολύ. Ένα πείραμα με σκόνη σιδήρου στον Ειρηνικό παρήγαγε μια μεγάλη αύξηση στην παραγωγικότητα που υπερέβη τις προσδοκίες και φάνηκε να διατηρείται για μια περίοδο ημερών (Dopyera 1996). Ενώ η βραχυπρόθεσμη λήψη του CO<sub>2</sub> ήταν εμφανής, το πείραμα ήταν πάρα πολύ σύντομο για να μελετήσει κανείς τις ανάγκες για τη συνεχόμενη λίπανση ή για την καθαρή εναπόθεση CO<sub>2</sub> πέρα από τον κύκλο ζωής του φυτοπλαγκτού. Αβεβαιότητες υπάρχουν σχετικά με το πού απελευθερώνει το φυτοπλαγκτόν το ανθρακούχο υλικό του. Λίγη καθαρή εναπόθεση εμφανίζεται εάν αυτό είναι στα ανώτερα στρώματα του ωκεανού, παρά στον βαθύ ωκεανό. Άλλη έρευνα στην Ιαπωνία (Horiuchi et al. 1997) εξετάζει τη γενική ωκεάνια λίπανση με άζωτο και φώσφορο. Πάλι αυτό εμφανίζεται να παράγει μια καθαρή βραχυπρόθεσμη αφομοίωση του CO<sub>2</sub> από το φυτοπλαγκτόν.

Η επόμενη φάση για αυτή την έρευνα θα περιλαμβάνει πειράματα στον Νότιο ωκεανό. Ο νότιος ωκεανός προστατεύεται από ένα σύνολο διεθνών νόμων, σχεδιασμένοι ειδικά για να κρατήσουν το περιβάλλον αμόλυντο. Περισσότερα στοιχεία για τον αντίκτυπο θα απαιτηθούν για να καταδείξουν ότι ένα μελλοντικό, μεγαλύτερης κλίμακας πείραμα στο νότιο ωκεανό είναι αποδεκτό. Ωστόσο, έως ότου αποκτηθεί περισσότερη γνώση για τις πιθανές οικολογικές επιδράσεις της λίπανσης σιδήρου, πρέπει να θεωρηθεί ιδιαίτερα θεωρητική μια πιο μακροπρόθεσμη επιλογή μείωσης του CO<sub>2</sub>.

*Αντισταθμισμό του Φαινομένου του Θερμοκηπίου.* Υπάρχουν μερικές περισσότερο απίθανες επιλογές που εστιάζουν στην πρόκληση ψύξης για να αντισταθμίσουν οποιαδήποτε παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου. Είναι γνωστό ότι οι εκπομπές θείου μπορούν να παράγουν αερολύματα τα οποία προκαλούν την ψύξη στην ατμόσφαιρα· αυτό συνήθως δε θεωρείται μια υπεύθυνα στρατηγική μετριασμού (Messner 1996). Προτάσεις για «σκόνισμα» της ατμόσφαιρας (όπως γίνεται φυσικά μέσω μεγάλων ηφαιστειακών εκρήξεων) είναι επίσης ένας πιθανός τρόπος για παραγωγή κάποιας ψύξης, όπως είναι και οι προτάσεις για εφαρμογή μιας γιγαντιαίας σκιάς και άλλες. Αυτές οι γεωμηχανικές επιλογές φαίνονται αρκετά ακραίες και μπορούν μόνο να εξεταστούν σοβαρά σε περίπτωση επικείμενης παγκόσμιας καταστροφής.

### 9.3. Προγράμματα Ενέργειας Δασών και Βιομάζας: Συγκρίσεις της αποθήκευσης και του κόστους του CO<sub>2</sub>

Αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζει μια περιεκτική μεθοδολογία για τον υπολογισμό των δαπανών και των καθαρών ροών άνθρακα των διάφορων προγραμμάτων ενέργειας δασών και βιομάζας και περιγράφει την εφαρμογή της σε προγράμματα της λατινικής Αμερικής. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι και η ανάπτυξη της ενέργειας της βιομάζας και τα μέτρα δασονομίας, συμπεριλαμβανομένων της αναδάσωσης και της προστασίας των δασών, μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στη μείωση των παγκόσμιων εκπομπών του CO<sub>2</sub> και η τοπική ικανότητα χρήσης γης πρέπει να καθορίσει τον τύπο του προγράμματος που είναι κατάλληλος σε κάθε περίπτωση. Καμία προσέγγιση από μόνη της δεν είναι ικανοποιητική, είτε ως μια εθνική ή παγκόσμια στρατηγική για διατήρηση του εδάφους που χρησιμοποιείται είτε ως τρόπος μείωσης των εκπομπών του άνθρακα. Η μεθοδολογία επιτρέπει συγκρίσεις των δαπανών και των ποσοτήτων άνθρακα που αποθηκεύονται στους διαφορετικούς τύπους προγραμμάτων και/ή εθνικών προγραμμάτων και διευκολύνει τον συνυπολογισμό των προγραμμάτων ενέργειας δασών και βιομάζας με την πιθανή μείωση των εκπομπών του CO<sub>2</sub>.

#### *A) Εισαγωγή*

Για να σταθεροποιηθεί η ατμοσφαιρική συγκέντρωση του CO<sub>2</sub>, οι παγκόσμιες εκπομπές πρέπει να μειωθούν κατά τουλάχιστον 60% από τα τρέχοντα επίπεδα. Περίπου 80% των συνολικών εκπομπών προέρχονται από τα απολιθωμένα καύσιμα, κυρίως από τα βιομηχανικά κράτη. Ένα μεγάλο μέρος του υπόλοιπου 20% πιστεύεται ότι έχει προέλθει από την αποδάσωση, συνήθως στα τροπικά κράτη, με τη Βραζιλία να είναι ο μεγαλύτερος συνεισφέρον των ανθρακικών εκπομπών λόγω αποδάσωσης. Το ποσοστό αποδάσωσης κατά τη δεκαετία του 1980 υπολογίζεται σε 15 Mha ανά έτος, ελευθερώνοντας περίπου 1600 εκατομμύρια τόνους άνθρακα (MtC) στην ατμόσφαιρα κάθε χρόνο. Κάποιες εκτιμήσεις των ποσοστών αποδάσωσης είναι ακόμα υψηλότερες.

#### *B) Ο Ρόλος των Δασών και της Βιομάζας*

Η ανατροπή της τάσης για τροπική αποδάσωση και η προώθηση της αναδάσωσης παγκοσμίως, θεωρούνται μέρος μιας παγκόσμιας στρατηγικής για μείωση της καθαρής ατμοσφαιρικής συσσώρευσης του CO<sub>2</sub>. Η τροπική γη που ενδεχομένως μπορεί να «χαραμιστεί» από την αποδάσωση, ή να αναγεννηθεί μέσω αναδάσωσης είναι μεγάλη, της τάξης των εκατοντάδων εκατομμυρίων εκταρίων. Αυτό αντιπροσωπεύει μια σημαντική δεξαμενή για τις παγκόσμιες εκπομπές άνθρακα και πιθανώς ένα από τα λιγότερο δαπανηρά διαθέσιμα μέτρα για την επιβράδυνση του ποσοστού συσσώρευσης του CO<sub>2</sub>. Διάφορες εκτιμήσεις έχουν γίνει για την γενική δυνατότητα της αποθήκευσης άνθρακα μέσω της αναδάσωσης και για τη γη που θα απαιτούταν για να εναποτεθούν ποσότητες άνθρακα.

Οι πιθανές δαπάνες αυτής της προσέγγισης σε παγκόσμια βάση έχουν υπολογιστεί, βασιζόμενες στα μακροοικονομικά μοντέλα και στην τρέχουσα εμπειρία δασονομίας. Εντούτοις, η τεχνική και πολιτική δυνατότητα πραγματοποίησης τέτοιων παγκόσμιων σχεδίων δασονομίας είναι αμφισβητήσιμη, δεδομένου ότι δεν εξετάζουν

τις πολλές συγκρουόμενες οικονομικές και περιβαλλοντικές χρήσεις του εδάφους. Η ανάλυση του δασικού τομέα που εξαρτάται από την εφαρμογή μερικών τεχνικών ή οικονομικών παραμέτρων σε παγκόσμια βάση είναι επίσης αμφισβητήσιμη. Επιπλέον, αυτός ο τρόπος αποθήκευσης άνθρακα είναι «μιας φορές» ευκαιρία και επομένως παρέχει μόνο προσωρινό μετριασμό ενάντια στην μελλοντική αύξηση των εκπομπών άνθρακα από τα απολιθωμένα καύσιμα.

Εν τω μεταξύ, μερικοί αναλυτές έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι τα δάση θα μπορούσαν να συμβάλλουν περισσότερο στη σταθεροποίηση του παγκόσμιου CO<sub>2</sub>, μέσω συνεχούς παραγωγής καυσίμων για ενεργειακά συστήματα βιομάζας ώστε να αντικαταστήσουν τη χρήση απολιθωμένων καυσίμων στο μέλλον. Εκτός αν δεν επιτευχθούν δραματικές αυξήσεις στην παραγωγικότητα, το κατάλληλο έδαφος για ετήσιες καλλιέργειες θα περιοριστεί από τον ανταγωνισμό με τις καλλιέργειες τροφίμων. Κατά συνέπεια οποιαδήποτε φιλόδοξη μακροπρόθεσμη ανάπτυξη της ενέργειας βιομάζας πρέπει να στηριχθεί στην ξύλινη βιομάζα από τα δέντρα, ή άλλα φυτά, τα οποία να αναπτύσσονται σε έδαφος που δεν μπορεί να υποστηρίξει ετήσια καλλιέργεια. Ο βαθμός στον οποίο η βιομάζα από τις ενεργειακές φυτείες είναι μια αληθινά ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που δεν προσθέτει στη συσσώρευση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> εξαρτάται από την ικανότητα των φυτειών να χρησιμοποιηθούν ως έδαφος. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα ανεπιτυχών προσπαθειών δημιουργίας φυτειών, συνοδευόμενες από συνθήκες φτωχού εδάφους, ανεπαρκή τεχνική επέκταση και άλλα προβλήματα. Τέτοια προγράμματα δεν παρέχουν ούτε ανανεώσιμη ενέργεια ούτε αποθήκευση του CO<sub>2</sub> και προσθέτουν μόνο στην πίεση για περαιτέρω αποδάσωση.

Μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση, συγκρίνει την καθαρή κατακράτηση άνθρακα από την προστασία των δασών και τη βιώσιμη ανάπτυξη ενέργειας της βιομάζας, χρησιμοποιώντας ένα απλό γενικό μοντέλο της κατακράτησης άνθρακα κατά τη διάρκεια της αναδάσωσης. Τα αποτελέσματα εξαρτώνται από τον χρονικό ορίζοντα, την παραγωγικότητα της περιοχής και την αποδοτικότητα της μετατροπής ενέργειας της βιομάζας και είναι γενικά σε συμφωνία με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω. Ωστόσο, το απλό μοντέλο που χρησιμοποιείται δεν συμπεριλαμβάνει την πιθανή υποβάθμιση της παραγωγικότητας των περιοχών κατά τη διάρκεια του χρόνου, ούτε εξετάζει άλλες παραγωγικές δυνατότητες χρήσης του εδάφους.

### *Γ) Μια Διαβαθμισμένη Προσέγγιση στη Δασοκομία και τη Χρήση του Εδάφους*

Πρόκειται επίσης, για μια συνεπή ανάλυση του μεγέθους και του κόστους της κατακράτησης άνθρακα, αρχίζοντας από το επίπεδο του προγράμματος μέχρι τη βιώσιμη ανάπτυξη της δασονομίας. Αντί να υποθέτει σχετικά με τις περιοχές αναδάσωσης των ηπείρων, η προσέγγιση εξετάζει την αποθήκευση του άνθρακα σε μια περιοχή στην οποία μπορεί να πετύχει: αυτή μιας τοπικής ή εθνικής βιώσιμης δασικής στρατηγικής ανάπτυξης. Αν και οι προτάσεις αφθονούν, καμία τέτοια στρατηγική δεν έχει εφαρμοστεί πλήρως μέχρι σήμερα, κυρίως εξαιτίας της δυσκολίας στη χρηματοδότηση των απαιτούμενων, μη εμπορικών ή ασύμφωνων, συστατικών. Αυτή η προσέγγιση εφαρμόζεται στα προγράμματα που έχουν μελετηθεί στην Costa Rica και σε άλλες χώρες της λατινικής Αμερικής και σε μια σειρά από προγράμματα που προτάθηκαν στην Costa Rica στο πλαίσιο του Tropical Forest Action Plan, ώστε να δημιουργηθεί ένα δείγμα, σε επίπεδο προγράμματος και εθνικό επίπεδο, για τις δαπάνες της μείωσης του CO<sub>2</sub>.

Μια ανάλυση με διαβάθμιση από κάτω προς τα πάνω πρέπει να αρχίσει με ανάλυση της ικανότητας χρήσης του εδάφους. Η ικανότητα χρήσης του εδάφους ορίζεται ως «η βιοφυσική ικανότητα της εντατικότερης χρήσης που μια μονάδα εδάφους μπορεί να υποστηρίξει χωρίς επιδείνωση της παραγωγικής ικανότητας...χρήση τόσο όσο η ικανότητα ή λιγότερο από αυτήν μπορεί να προταθεί, αλλά η υπερβολική χρήση προκαλεί υποβάθμιση και απώλεια παραγωγικής ικανότητας, τα οποία διαφαίνονται από τις ενδείξεις της διάβρωσης, της ιζηματογένεσης των ποταμών και των λιμνών, των επιδράσεων στον υδρολογικό κύκλο, κ.τ.λ.». Οι αιτίες της αποδάσωσης στη λατινική Αμερική είναι πολυάριθμες και σύνθετες, αλλά η πλειοψηφία προκύπτει από τη γεωργική μετατροπή, κυρίως για βοσκή, του εδάφους που δε μπορεί να υποστηρίξει την εντατική χρήση. Η εμπορική υλοτομία δεν αποτελεί σημαντική άμεση αιτία της αποδάσωσης στη λατινική Αμερική, αλλά υπάρχει περίπτωση οι υλοτόμοι να χρησιμοποιήσουν μεγαλύτερες περιοχές δασών από αυτές που χρησιμοποιούνται για υλοτομία. Η αναδάσωση απαιτεί τον προσδιορισμό και την εφαρμογή των βιώσιμων χρήσεων του εδάφους, οι οποίες ταιριάζουν στην έμφυτη ικανότητα χρήσης του εδάφους.

Τα υψηλά ποσοστά αποδάσωσης και μετατροπής εδάφους στην κεντρική Αμερική δεν είναι σύμφωνα με αυτήν την ικανότητα. Και η Costa Rica και η Guatemala, για παράδειγμα, έχουν ήδη υπέρ χρησιμοποιήσει ένα μεγάλο μέρος του εδάφους με δασική ικανότητα μόνο. Ωστόσο, όπως φαίνεται στον πίνακα 9.11., μεγάλο μέρος της γης με μια περισσότερο εντατική γεωργική ικανότητα βρίσκεται σε υποαποσχόληση, ως λιβάδι. Γεωργική μετατροπή μπορεί να απαιτηθεί για την αύξηση της εντατικής χρήσης του εδάφους σε γη κατάλληλη για ετήσιες καλλιέργειες. Εντούτοις, ένα μεγάλο μέρος του εδάφους που είναι κατάλληλο για δασονομία, όπως οι φυτείες ενεργειακής βιομάζας, πρέπει να μετατραπεί από λιβάδια ή βρίσκεται σε μακρινές προστατευμένες περιοχές. Το υπόλοιπο έδαφος, που είναι κατάλληλο για μακροχρόνιες καλλιέργειες, δε μπορεί να υποστηρίξει φυτείες.

**Πίνακας 9.11.** Ικανότητα χρήσης εδάφους και πραγματική χρήση του εδάφους στην κεντρική Αμερική

	Costa Rica		Guatemala	
	Ικανότητα	Πραγματική	Ικανότητα	Πραγματική
Ετήσιες Συγκομιδές	19%	9%	26%	11%
Λιβάδια	9%	53%	10%	30%
Αιώνιες Συγκομιδές	16%	7%	12%	7%
Δασική Παραγωγή	32%	6%	37%	11%
Προστασία Δασών	25%	24%	14%	40%

Πηγή: Joel N. Swisher, «Forestry and Biomass Energy Projects: Bottom – up Comparisons of CO<sub>2</sub> Storage and Costs», UNEP Collaborating Center, Rise National Laboratory, (1994)

Γη η οποία δεν μπορεί να υποστηρίξει τέτοια εντατική χρήση μπορεί να αφιερωθεί σε μια ποικιλία από άλλες χρήσεις, συμπεριλαμβανομένης της προστασίας της δασονομίας σε μερικές περιπτώσεις, για να αντιστρέψει τη διαδικασία αποδάσωσης και να παρέχει μακροπρόθεσμα οφέλη από την άποψη του περιβάλλοντος και τις τοπικής κοινωνικής και οικονομικής κατάστασης. Αντί να θεωρήσει αυτά τα εδάφη ως πηγή ανανεώσιμης καύσιμης βιομάζας, η ανάλυση μεταχειρίζεται τη δυνατότητά τους για μακροπρόθεσμη αποθήκευση του CO<sub>2</sub> μόνο με βιώσιμες επιλογές χρήσης γης, οι οποίες τους ταιριάζουν. Όσον αφορά την αποθήκευση άνθρακα και τη μακροπρόθεσμη επιβίωση του προγράμματος, υπάρχουν σημαντικές ευαίσθητες περιοχές που α-

φορούν το κλίμα, το έδαφος, τη βιοποικιλότητα, την επιλογή ειδών και τις τοπικές περιβαλλοντικές και κοινωνικές συνθήκες. Οι συνολικές δαπάνες της κατακράτησης άνθρακα στα προγράμματα ενέργειας δασονομίας και βιομάζας εξαρτώνται από τον τύπο του προγράμματος, το κλίμα, τη δυνατότητα ανάπτυξης, των κύριων αναγκών, τις δαπάνες διαχείρισης και κατάρτισης και το κόστος της γης. Ενώ η εστίαση στην αποθήκευση του CO<sub>2</sub> είναι κάπως τεχνητή, παρέχει ένα παγκοσμίου επιπέδου πλαίσιο στο οποίο αναλύονται αυτά τα προγράμματα και η βάση στην οποία θα γίνει η σύγκριση των οικονομικών και οικολογικών αποτελεσμάτων τους.

Βιώσιμη δασονομία μπορεί να οριστεί ως οι δασικές πρακτικές που διατηρούν ή αυξάνουν και το δασικό απόθεμα και τη ροή των δασικών προϊόντων κατά τη διάρκεια του χρόνου. Τα προγράμματα για κατακράτηση που αναλύθηκαν σε αυτήν την προσέγγιση περιλαμβάνουν ποικίλα βιώσιμα προγράμματα δασονομίας, τα οποία μπορούν να αυξήσουν τη μακροπρόθεσμη αποθήκευση του άνθρακα σε μια περιοχή. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι προγραμμάτων δασονομίας, κάθε ένα με διαφορετικές δαπάνες και διαφορετικές καθαρές ροές άνθρακα, οι οποίες αυξάνουν την αποθήκευσή του. Η αντιστροφή της τάσης για αποδάσωση περιλαμβάνει τρεις γενικές προσεγγίσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν επτά διαφορετικές ταξινομήσεις προγραμμάτων δασονομίας:

- Αναδάσωση της γης χρησιμοποιώντας φυσική αποκατάσταση, φύτευση δασών ή δασικές φυτείες. Η μέτρηση του άνθρακα που αποθηκεύεται πρέπει να υπολογίζεται για διαφορές στην ενδεχόμενη μοίρα της βιομάζας (δέντρα, ξυλεία, καυσόξυλα, κ.τ.λ.). Η μέτρηση είναι ένα σημαντικό πρόβλημα αλλά μπορεί να γίνει με λογικό κόστος.
- Αντικατάσταση της καύσης απολιθωμένων καυσίμων χρησιμοποιώντας καύσιμα από φυτείες βιομάζας, στα οποία τα ταχέως αναπτυσσόμενα δέντρα φυτεύονται και κόβονται με αλληλουχία, ειδικά για να παράγουν καύσιμα για εμπορική παραγωγή ενέργειας, όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Προστασία των δασικών εδαφών που έχουν απομείνει με διατήρηση των δασών ή προγράμματα διαχείρισης των φυσικών δασών, αποφεύγοντας νέες εκπομπές στην ατμόσφαιρα. Αυτό πραγματοποιείται σε περιοχές που έχουν την έγκριση των τοπικών αρχών και προστατεύονται νόμιμα με χρηματοδότηση για λειτουργία και συντήρηση.

Εάν η ποσότητα του αποθηκευμένου άνθρακα εξετάζεται για την επαναφύτευση και όχι για την προστασία των υπάρχοντων φυσικών δασών, τότε θα υπήρχε ένα αντιπαραγωγικό κίνητρο για την αφαίρεση των φυσικών δασών και στη συνέχεια επαναφύτευση. Αν και αυτή η στρατηγική προτείνεται μερικές φορές ως ένας τρόπος να αυξηθεί το ποσοστό κατακράτησης του CO<sub>2</sub> από τα δέντρα, πιθανώς θα οδηγούσε σε μια καθαρή ροή άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

#### *Δ) Δαπάνες Κατακράτησης Άνθρακα στα Προγράμματα Ενέργειας Δασονομίας και Βιομάζας*

Για να συγκριθούν τα κόστη της αποθήκευσης του άνθρακα σε ένα πρόγραμμα δασονομίας, με τις δαπάνες άλλων μέτρων μείωσης εκπομπών του άνθρακα, όπως ενεργειακά προγράμματα, το κόστος πρέπει να εκφραστεί σε τόνους άνθρακα (tC) που αποθηκεύονται από το πρόγραμμα. Το κόστος πρέπει να περιλαμβάνει την πλήρη αξία του κόστους που είναι δυνατό για το πρόγραμμα και μιας επαρκούς χρηματοδότησης να καλύψει την ανάπτυξη του προγράμματος και τα έξοδα της τρέχουσας συ-



ντήρησής του, τη διαχείριση και τον έλεγχο. Συμπληρωματικές δαπάνες για τη μετατροπή της ενέργειας βιομάζας πρέπει επίσης να περιληφθούν.

$$\text{Συνολικό κόστος μονάδας} = C'_{\text{net}} / R'_{\text{net}} \quad (1)$$

,όπου  $C'_{\text{net}}$  =καθαρό κόστος του προγράμματος κατακράτησης άνθρακα (€ / ha)και  $R'_{\text{net}}$  = καθαρή αύξηση της αποθήκευσης άνθρακα από το πρόγραμμα.(tC / ha)

Η σχετική μονάδα μέτρησης για την αποθήκευση άνθρακα στα προγράμματα δασονομίας είναι η αύξηση στη ροή του CO<sub>2</sub>, που εκφράζεται ως ισοδύναμοι τόνοι άνθρακα (tC), έξω από την ατμόσφαιρα, συγκρινόμενοι με τις υπάρχουσες συνθήκες (στην περίπτωση της αφαίρεσης άνθρακα) ή με μια κατάσταση αναφοράς (στην περίπτωση της αποφυγής). Η διαδικασία υπολογισμού του άνθρακα πρέπει ρητά να υπολογίζει την αποθήκευση άνθρακα από την χρήση γης χωρίς το πρόγραμμα, ένα δύσκολο αλλά απαραίτητο βήμα στην εκτίμηση του αντίκτυπου και του δάσους και των ενεργειακών προγραμμάτων. Η κατακράτηση των εκπομπών για τα ανανεώσιμα ενεργειακά προγράμματα πρέπει να συγκριθεί βάση της περιεκτικότητας σε άνθρακα των απολιθωμένων καυσίμων που αντικαθίστανται. Ενώ η αποθήκευση του άνθρακα μέσω ανάπτυξης δασών έχει αξία «μιας φοράς» που περιορίζεται από την ωρίμανση των δασών, η παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας και βιοκαυσίμων για αντικατάσταση των απολιθωμένων καυσίμων μπορεί να ελαττώσει τις ανθρακικές εκπομπές επ' αόριστον στο μέλλον, υπό τον όρο ότι οι φυτείες βιομάζας μπορούν να αναπτύσσονται και να κόβονται.

Κάθε τύπος προγράμματος είναι διαφορετικός από την άποψη των καθαρών ροών άνθρακα, οι οποίες παρέχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης άνθρακα. Μερικοί αποθηκεύουν τον άνθρακα σε μόνιμο φυσικό δάσος, μερικοί τον συσσωρεύουν σε νέα βιομάζα, μερικοί τον συσσωρεύουν στα προϊόντα που δέχονται μακροπρόθεσμη αποθήκευση και οι φυτείες βιομάζας αποθηκεύουν πρόσθετο καθαρό άνθρακα στα άκαυστα απολιθωμένα καύσιμα αποφεύγοντας ανθρακικές εκπομπές από τη χρήση απολιθωμένων καυσίμων. Για τους σκοπούς της ανάλυσης, η δυναμική των ροών άνθρακα κατά τη διάρκεια του χρόνου δεν εξετάζεται. Προτιμώνται οι καταστάσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας κατά μέσο όρο (πάνω από 20 έτη) ή σταθερές καταστάσεις αποθήκευσης άνθρακα για ανάλυση.

Η βασική μορφή της καθαρής τιμής αποθήκευσης του άνθρακα ( $R'_{\text{net}}$ ), για ένα συγκεκριμένο πρόγραμμα συγκρινόμενη με μια χρήση γης αναφοράς, δίνεται ως:

$$R'_{\text{net}} = CV_{\text{nat-p}} + CV_{\text{av-p}} + CV_{\text{h-p}} + CS_p + CF_p - (CV_{\text{nat-r}} + CV_{\text{av-r}} + CV_{\text{h-r}} + CS_r) \quad (2)$$

,όπου  $CV_{\text{nat-p}}$  = πυκνότητα αποθήκευσης άνθρακα στο φυσικό δάσος με το πρόγραμμα,  $CV_{\text{av-p}}$  = μέσος άνθρακας στη βιομάζα κατά τη διάρκεια της αλλαγής της φυτείας του προγράμματος,  $CV_{\text{h-p}}$  = τιμή του άνθρακα σταθερής κατάστασης της βιομάζας που έχει συγκομισθεί με το πρόγραμμα,  $CS_p$  = αποθηκευμένος άνθρακας στο έδαφος μέσω του προγράμματος,  $CF_p$  = περιεκτικότητα σε άνθρακα των απολιθωμένων καυσίμων που αντικαταστάθηκαν από καύσιμα βιομάζας μέσω του προγράμματος,  $CV_{\text{nat-r}}$  = πυκνότητα αποθήκευσης άνθρακα στα φυσικά δάση για κατάσταση αναφοράς χωρίς το πρόγραμμα,  $CV_{\text{av-r}}$  = μέσος άνθρακας στη βιομάζα κατά τη διάρκεια της αλλαγής της φυτείας για την κατάσταση αναφοράς,  $CV_{\text{h-r}}$  = τιμή του άνθρακα σταθερής κατάστασης της βιομάζας που έχει συγκομισθεί για την κατάσταση αναφοράς και  $CS_r$  = ο άνθρακας που έχει αποθηκευτεί στο έδαφος για την κατάσταση αναφοράς, χωρίς το πρόγραμμα.

Η περιεκτικότητα σε άνθρακα των απολιθωμένων καυσίμων που αντικαθίστανται από ένα ενεργειακό πρόγραμμα βιομάζας, είναι αυτή των απολιθωμένων καυσί-

μων που θα καταναλωνόταν για την παραγωγή ισοδύναμης ποσότητας εμπορικής ενέργειας κατά τη διάρκεια ζωής του προγράμματος. Υποθέτοντας ίσες αποδοτικότητες για την καύση της βιομάζας και την καύση των απολιθωμένων καυσίμων και μια θερμογόνο δύναμη 19 GJ / τόνο βιομάζας, ή 38 GJ / tC και λαμβάνοντας την περιεκτικότητα σε άνθρακα των καυσίμων που αντικαταστάθηκαν ως 24 kg / GJ για τον γαιάνθρακα, 20 kg / GJ για το πετρέλαιο και 14 kg / GJ για το φυσικό αέριο, ο άνθρακας που κατακρατήθηκε είναι 0,91 tC για τον γαιάνθρακα, 0,76 tC για το πετρέλαιο και 0,53 tC για το φυσικό αέριο ανά tC ξύλου που καίγεται. Αυτή η ποσότητα πρέπει να διορθωθεί για τις διαφορές στις αποδοτικότητες των δύο καυσίμων και για τον άνθρακα που ενσωματώνεται στα απολιθωμένα καύσιμα και χρησιμοποιείται για να αναπτυχθούν, την συγκομιδή και μεταφορά των βιοκαυσίμων, τα οποία μπορεί να αποτελούν ένα μεγάλο μέρος της περιεκτικότητας σε άνθρακα της βιομάζας.

Για κάθε ταξινόμηση του προγράμματος μπορεί τώρα να συσχετιστούν οι όροι της εξίσωσης (2) με τις διαφορετικές καθαρές ροές του άνθρακα σε ένα πρόγραμμα. Κάθε τύπος καθαρής ροής άνθρακα (μόνιμη βιομάζα, νέα βιομάζα, συγκομισμένη βιομάζα, εδαφικός άνθρακας, απολιθωμένα καύσιμα αντιστοιχεί σε έναν όρο ( $CV_{nat}$ ,  $CV_{av}$ ,  $CV_h$ , CS, CF). Όπως φαίνεται στον πίνακα 2, οι διαφορετικές ταξινομήσεις του προγράμματος διακρίνονται από τους όρους ροής άνθρακα, οι οποίοι είναι σχετικοί, οπότε σε αυτή την περίπτωση φαίνονται με ένα «+» στον πίνακα 9.12. Οι καθαρές ροές άνθρακα οι οποίες δεν είναι σχετικές για την ταξινόμηση ενός προγράμματος παρουσιάζονται με ένα «0» στον πίνακα 9.12.

**Πίνακας 9.12.** Παράμετροι αποθήκευσης άνθρακα μέσω ταξινόμησης του εδάφους χρήσης

Καθαρή ροή άνθρακα:	Μόνιμη Βιομάζα	Νέα Βιομάζα	Συγκομισμένη Βιομάζα	Εδαφικός Άνθρακας	Απολιθωμένα Καύσιμα
Μεταβλητές:	$CV_{nat}$	$CV_{av}$	$CV_h$	CS	CF
<b>Βιώσιμα προγράμματα δασονομίας:</b>					
Δασικά αποθέματα	+	0	0	+	0
Διαχείριση φυσικών δασών	+	0	+	+	0
Αποκατάσταση των δασών	0	+	0	+	0
Φυτείες ξυλείας	0	+	+	+	0
Αγροδασοκομία	+	+	0	+	0
Φάρμες με καυσόξυλα	+	+	+	+	0
Φυτείες ενέργειας βιομάζας	0	+	+	+	+

«+» σημαίνει ότι η καθαρή ροή άνθρακα εφαρμόζεται στην ταξινόμηση του προγράμματος και «0» σημαίνει ότι δεν εφαρμόζεται.

Πηγή: Joel N. Swisher, «Forestry and Biomass Energy Projects: Bottom – up Comparisons of  $CO_2$  Storage and Costs», UNEP Collaborating Center, Rise National Laboratory, (1994)

## *Ε) Ανάλυση του Δείγματος των Προγραμμάτων Δασονομίας*

Ο πίνακας 9.13. δίνει τις εκτιμήσεις των δαπανών και τις δυνατότητες αποθήκευσης άνθρακα των μεμονωμένων προγραμμάτων που μελετήθηκαν στην Costa Rica, ως ένα παράδειγμα της ανάλυσης της μεθοδολογίας αποθήκευσης άνθρακα που παρουσιάστηκε παραπάνω. Πρόσθετες εκτιμήσεις έγιναν, βασισμένες στα δεδομένα προγράμματος από τρεις λογοτεχνικές πηγές: δυο που εξετάζουν τις φυτείες ξυλείας και μια που εξετάζει την ανάπτυξη της ενέργειας της βιομάζας. Επίσης, οι δαπάνες και ο άνθρακας που κατακρατήθηκε υπολογίζονται εκ νέου, υποθέτοντας ότι όλο το συγκομισμένο ξύλο από κάθε πρόγραμμα χρησιμοποιείται για ενεργειακή μετατροπή της βιομάζας. Το ενεργειακό πρόγραμμα υποτίθεται ότι είναι μια γεννήτρια με αεριοστρόβιλο και συμπυκνωτή (CEST) και καθαρή αποδοτικότητα 21%. Η ηλεκτρική ενέργεια από αυτές τις πηγές αντικαθιστά 30% της απόδοσης των εγκαταστάσεων πετρελαίου.

Το πρόγραμμα που μελετήθηκε περιλαμβάνει το Forest Development Program for Small and Medium Farmers, στην Costa Rica. Το πρόγραμμα αυτό είναι μια προσπάθεια της Forest Service της Costa Rica, του Department of Rural Forest Development (Desarrollo Campesino Forestal, DECAFOR) για την ενίσχυση των ιδιωτικών οργανώσεων δασονομίας που στερούνται, αυτήν την περίοδο, την απαιτούμενη διοικητική και οργανωτική ικανότητα για να εκτελέσουν προγράμματα δασονομίας σε διαδεδομένη βάση. Ο κύριος μηχανισμός χρηματοδότησης αυτού του προγράμματος είναι η Fondo para Desarrollo Forestal (FDF) που, για τέσσερα έτη με αρχή το 1989, έχει χρηματοδοτήσει 12,000 εκτάρια ανά έτος δασικών φυτειών μέσω μικρών αγροτικών οργανώσεων και συνεταιρισμών, με ένα καινοτόμο αγροτικό πιστωτικό πρόγραμμα. Η κατάρτιση και η τεχνική βοήθεια παρέχονται μέσω ενός αγροτικού προγράμματος επέκτασης.

**Πίνακας 9.13.** Κόστη αποθήκευσης άνθρακα για τα ενεργειακά προγράμματα δασονομίας και βιομάζας

Πρόγραμμα	Προγράμματα Δασονομίας			Πρόγραμμα Βιοενέργειας (CEST)	
	Κόστος Προγράμματος (1989 \$/ ha)	Άνθρακας που Αποθηκεύεται (tC / ha)	Κόστος (€/ tC)	Άνθρακας που Αποθηκεύτηκε (tC / ha)	Κόστος (€/ tC)
<b>Προγράμματα δασονομίας της Costa Rica</b>					
CACH/ DECAFOR	1120	88	10,8	104	9,2
Monteverde/ DECAFOR	1120	90	10	107	8,3
Project Boscosa/ DECAFOR	990	98	8,3	115	7,5
Canas Plantation	840	64	10,8	64	10,8
Διαχείριση φυσικών δασών	1180	73	13,3	77	12,5
Lomas Barbudal Reserve	295	60	4,2		
Monteverde Reserve	295	65	4,2		
Corcovado National Park	295	70	3,3		
Guanacaste N.P. Restoration	2730	107	21,7		
<b>Δασικές Φυτείες του Ecuador</b>					
Φυτείες Δάφνης	920	75	10	73	10,8
Φυτείες Pachaco	945	93	8,3	89	9,2
Φυτείες Ευκαλύπτου	435	92	4,2	94	4,2
Φυτείες Πεύκων	500	90	5	88	5
<b>Δασικές Φυτείες της Βραζιλίας</b>					
Φυτείες Gmelina	730	103	5,8	102	5,8
Φυτείες Ευκαλύπτου	1400	111	10,8	107	10,8
Φυτείες Πεύκων	985	92	9,2	88	9,2
<b>Φυτείες Βιοενέργειας στη Βραζιλία</b>					
Κλιματική ζώνη 1	1215	102	10	125	8,3
Κλιματική ζώνη 2	1215	85	11,7	104	10
Κλιματική ζώνη 3	1215	60	16,7	74	13,3
Κλιματική ζώνη 4	1215	40	25,8	48	20,8

**Σημειώσεις:** Το κόστος και η αποθήκευση άνθρακα για τα προγράμματα δασονομίας υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω. Για τα προγράμματα δασονομίας το 25% της συγκομισμένης βιομάζας υποτέθηκε ότι αποθηκεύτηκε μακροπρόθεσμα και αποσυντίθεται 1% ανά έτος. Για τα προγράμματα βιοενέργειας, το 100% της συγκομισμένης βιομάζας υποτέθηκε ότι μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια με αποδοτικότητα 21%, αντικαθιστώντας μια εγκατάσταση πετρελαίου με 30% αποδοτικότητα και κόστος €0,03 / kWh. Η αποδοτικότητα και οι δαπάνες της μετατροπής της βιομάζας βασίζονται σε αεριοστρόβιλο με συμπυκνωτή με κύριο κόστος €1266,7 / kW, με παράγοντα χωρητικότητας 75% και λειτουργικά κόστη €0,014 / kWh, συμπεριλαμβανομένης της σμίλευσης του ξύλου. Η διάρκεια ζωής του προγράμματος είναι 40 έτη και το ποσοστό έκπτωσης είναι 10%.

Πηγή: Joel N. Swisher, «Forestry and Biomass Energy Projects: Bottom – up Comparisons of CO<sub>2</sub> Storage and Costs», UNEP Collaborating Center, Rise National Laboratory, (1994)

**Πίνακας 9.14.** Δαπάνες της αποθήκευσης του άνθρακα για ανεπτυγμένα ενεργειακά προγράμματα βιομάζας

Πρόγραμμα	Τεχνολογία STIG		Τεχνολογία GTCC	
	Άνθρακας που Αποθηκεύτηκε (tC / ha)	Κόστος (€ / tC)	Άνθρακας που Αποθηκεύτηκε (tC / ha)	Κόστος (€ / tC)
<b>Δασικές Φυτείες του Ecuador</b>				
Φυτείες Δάφνης	92	11,7	104	29,2
Φυτείες Pachaco	115	10,8	131	29,2
Φυτείες Ευκαλύπτου	114	5,8	126	21,2
Φυτείες Πεύκων	112	7,5	126	25,8
<b>Δασικές Φυτείες της Βραζιλίας</b>				
Φυτείες Gmelina	126	7,5	140	32,5
Φυτείες Ευκαλύπτου	137	11,7	155	30
Φυτείες Πεύκων	113	10,8	128	30
<b>Φυτείες Βιοενέργειας στη Βραζιλία</b>				
Κλιματική ζώνη 1	162	10	184	29,2
Κλιματική ζώνη 2	135	10,8	154	30
Κλιματική ζώνη 3	95	14,2	109	33,3
Κλιματική ζώνη 4	62	20	71	37,5

**Σημειώσεις:** Το κόστος και η αποθήκευση άνθρακα υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω. Όλοι η συγκομισμένη βιομάζα υποτέθηκε ότι μετατράπηκε σε ηλεκτρική ενέργεια, αντικαθιστώντας μια εγκατάσταση πετρελαίου με αποδοτικότητα 30% και κόστος €0,03 / kWh. Η αποδοτικότητα και οι δαπάνες της μετατροπής της βιομάζας βασίζονται στη χρήση αεριοποιημένης βιομάζας και γεννήτριες στροβίλου έγχυσης αερίου με κύριο κόστος €1058,3 / kW, αποδοτικότητα 33%, παράγοντα χωρητικότητας 75% και λειτουργικά κόστη €0,018 / kWh, συμπεριλαμβανομένης της σμίλευσης και ξήρανσης του ξύλου. Η διάρκεια ζωής του προγράμματος είναι 40 έτη και το ποσοστό έκπτωσης είναι 10%.

Πηγή: Joel N. Swisher, «Forestry and Biomass Energy Projects: Bottom – up Comparisons of CO<sub>2</sub> Storage and Costs», UNEP Collaborating Center, Rise National Laboratory, (1994)

Οι κατά προσέγγιση δαπάνες των προγραμμάτων δασονομίας που μελετήθηκαν στην Costa Rica κυμαίνονται από €3,3 / tC για τη διατήρηση των δασών μέχρι €10 / tC για μικρά κτήματα με ξύλο και €21,7 / tC για την αποκατάσταση των υποβαθμισμένων φυσικών δασικών οικοσυστημάτων. Οι υπολογισμένες δαπάνες για τα άλλα προγράμματα είναι παρόμοιες και οι δυνατότητες αποθήκευσης άνθρακα για τα προγράμματα φυτειών είναι κυρίως μεταξύ 80 και 100 tC / εκτάριο, ανάλογα με το κλίμα και τον σχεδιασμό του προγράμματος. Όταν τα ίδια προγράμματα θεωρούνται ως ενεργειακές φυτείες βιομάζας, η αποθήκευση άνθρακα ανά εκτάριο γενικά αυξάνεται ελαφρώς και το κόστος ανά τόνο μειώνεται κάπως, αν και όχι σε κάθε περίπτωση. Κατά συνέπεια, με βάση την συμβατική τεχνολογία μετατροπής ενέργειας, η απόδοση των ενεργειακών φυτειών βιομάζας στην αποφυγή των ανθρακικών εκπομπών δεν είναι πολύ διαφορετική από αυτή των δασικών φυτειών και άλλων προγραμμάτων.

Η αποθήκευση άνθρακα και οι δαπάνες των ενεργειακών προγραμμάτων βιομάζας υπολογίζονται εκ νέου στον πίνακα 9.14., υποθέτοντας περισσότερο ανεπτυγ-

μένες διαδικασίες ενεργειακής μετατροπής, βασισμένες στην τεχνολογία αεριοποίησης της βιομάζας, όπως αυτή βρίσκεται σήμερα υπό εμπορική ανάπτυξη στη Σουηδία και τη Βραζιλία. Η βελτιωμένη αποδοτικότητα της τεχνολογίας στροβίλου αερίου έγχυσης ατμού (STIG) αυξάνει την αποθήκευση άνθρακα ανά εκτάριο, χωρίς να αυξάνεται σημαντικά το κόστος. Η τεχνολογία συνδυασμένου κύκλου αεριοστροβίλου (GTCC) βελτιώνει περαιτέρω την απόδοση αλλά με σημαντικά αυξανόμενο κόστος, επειδή το κόστος της αποθήκευσης άνθρακα είναι σχετικά ευαίσθητο σε αυξήσεις του κύριου κόστους του εξοπλισμού μετατροπής.

### *ΣΤ) Εθνικές Δυνατότητες Αποθήκευσης Άνθρακα και Δαπάνες*

Δεν είναι διαθέσιμες ικανοποιητικές πληροφορίες για τον υπολογισμό της εθνικής δυνατότητας για αποθήκευση του άνθρακα ως ένας παράγοντας κόστους, ακόμη και για μια χώρα. Εντούτοις, η ανάλυση που παρουσιάζεται παρακάτω είναι ένα πρώτο βήμα στη διαδικασία υπολογισμού του κόστους και των δυνατοτήτων. Έγινε χρήση των αποτελεσμάτων της αποθήκευσης άνθρακα για τους διαφορετικούς τύπους προγραμμάτων που αναλύθηκαν παραπάνω, ώστε να εκτιμηθεί η εθνική δυνατότητα αποθήκευσης άνθρακα της Costa Rica, βάση των προτάσεων των προγραμμάτων και τις εκτιμήσεις των δαπανών που δόθηκαν από το Tropical Forest Action Plan (TFAP).

Η διαδικασία TFAP έχει διάφορα βήματα, κατά τη διάρκεια των οποίων η εθνική κατάσταση των δασών και της δασονομίας αξιολογείται και οι απαραίτητες πολιτικές και πρωτοβουλίες προσδιορίζονται. Στα μεταγενέστερα στάδια της διαδικασίας, συγκεκριμένα προγράμματα και ανάγκες χρηματοδότησης αναπτύχθηκαν σε ένα επίσημο σχέδιο εργασίας. Ένα σχέδιο έχει αναπτυχθεί για την Costa Rica. Το εθνικό TFAP δεν προορίζεται να προτείνει τη συνολική δυνατότητα για τις επενδύσεις δασονομίας σε μια χώρα, ούτε εξετάζει συγκεκριμένα της αποθήκευση άνθρακα. Παρέχει, εντούτοις, έναν κατάλογο απαραίτητων προγραμμάτων που θα μπορούσαν να εκτελεστούν εάν ικανοποιητικά κονδύλια ήταν διαθέσιμα για τον δασικό τομέα και τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή εκτιμήσεων εθνικού επιπέδου για τη δυνατότητα αποθήκευσης άνθρακα και τις δαπάνες.

Το TFAP για την Costa Rica προτείνει 27 προγράμματα με εκτίμηση συνολικού κόστους των €222,5 εκατομμυρίων, από τα οποία περίπου το 80% είναι για προγράμματα που είναι σχετικά με την αποθήκευση άνθρακα. Πολλαπλασιάζοντας την περιοχή του προγράμματος και το κόστος ανά εκτάριο με την εκτίμηση αποθήκευσης άνθρακα, δίνεται ο συνολικός άνθρακας που αποθηκεύτηκε και το κόστος ανά τόνο άνθρακα για το κάθε πρόγραμμα, όπως φαίνεται στον πίνακα 5. Επιπρόσθετα κόστη για έλεγχο και σε μερικές περιπτώσεις περιοχή γης, που προστίθενται στις δαπάνες του προγράμματος δίνονται από το TFAP. Εκτός από τα προγράμματα TFAP, περαιτέρω φυτείες ξυλείας και καυσόξυλων εξετάζονται, με τις ίδιες δαπάνες προγράμματος όπως φαίνονται στον πίνακα 9.13., αλλά με αυξανόμενη ευκαιρία κόστους για την περιοχή γης, βάση των δεδομένων αξίας γης των αγροτικών εδαφών της Costa Rica με τις ελάχιστες υπηρεσίες.

Χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε παραπάνω για την εκτίμηση της αποθήκευσης καθαρού άνθρακα, η συνολική δυνατότητα αποθήκευσης άνθρακα στην Costa Rica, βάση των προτάσεων του προγράμματος TFAP, είναι περίπου 110 MtC με ένα οριακό κόστος κάτω από €6,7 / tC. Εάν συμπεριληφθεί η αναδάσωση σε ακριβότερη γη από αυτήν που θεωρήθηκε στον κατάλογο του προγράμματος TFAP, αυξάνεται η συνολική δυνατότητα αποθήκευσης άνθρακα σε πάνω από 140 MtC, αλλά με ένα μεγαλύτερο οριακό κόστος περίπου €25 / tC. Όταν τα ίδια

προγράμματα TFAP θεωρούνται ως ενεργειακές φυτείες βιομάζας, όπου αυτό είναι δυνατό, η συνολική αποθήκευση άνθρακα αυξάνεται κατά 5% σε σχέση με έναν σταθμό παραγωγής ενέργειας, διάρκειας ζωής 40 ετών. Συμπεριλαμβάνοντας την πρόσθετη γη για αναδάσωση, τα ενεργειακά προγράμματα βιομάζας αυξάνουν την συνολική αποθήκευση άνθρακα κατά περίπου 15%. Η επιλογή βιοενέργειας έχει σημαντικά αυξανόμενες δαπάνες ανά τόνο άνθρακα που αποθηκεύεται.

Οι τιμές που παρουσιάζονται στον πίνακα 9.15. για τα ενεργειακά προγράμματα βιομάζας βασίζονται στην υπόθεση ότι η συγκομισμένη βιομάζα από τις φυτείες και όλα τα άλλα προγράμματα είναι ικανά για μια βιώσιμη παραγωγή, που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, χρησιμοποιώντας την πιο αποδοτική διαδικασία (GTCC) που αναλύθηκε παραπάνω, για να αντικατασταθεί το 30% της αποδοτικότητας μιας εγκατάστασης πετρελαίου. Μια λιγότερο ακριβή διαδικασία (STIG) θα έδινε λιγότερη αποθήκευση άνθρακα, αλλά το κόστος ανά τόνο άνθρακα που αποθηκεύεται θα ήταν χαμηλότερο, συγκρινόμενο με αυτό των προγραμμάτων δασονομίας. Κάποιος θα μπορούσε επίσης να υποθέσει ότι οι ανεπτυγμένες τεχνολογίες μετατροπής της βιομάζας θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν την προηγμένη τεχνολογία απολιθωμένων καυσίμων, παρά τη συμβατική τεχνολογία όπως υποτέθηκε παραπάνω. Αυτή η υπόθεση θα μείωνε επίσης την αποθήκευση άνθρακα και το κόστος ανά τόνο των προγραμμάτων βιοενέργειας.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η αποθήκευση άνθρακα για τα ενεργειακά προγράμματα βιομάζας βασίζεται σε έναν σταθμό παραγωγής ενέργειας με διάρκεια ζωής 40 ετών, ή περίπου 3-6 κύκλους συγκομιδής βιομάζας από τις φυτείες. Το πλεονέκτημα της ενέργειας βιομάζας, ως στρατηγική για χρήση των δασικών φυτειών με ένα τρόπο ο οποίος μειώνει τις παγκόσμιες εκπομπές άνθρακα, είναι ότι πρόσθετοι σταθμοί παραγωγής ενέργειας θα μπορούσαν να κατασκευαστούν και να λειτουργήσουν επ' αόριστον στο μέλλον. Τα καύσιμα βιομάζας θα μπορούσαν να παρασχεθούν από το ίδιο έδαφος, υπό τον όρο ότι θα μπορούσαν να συνεχίσουν να συγκομίζονται βιώσιμα. Κατά συνέπεια, μακροπρόθεσμα, η αποθήκευση άνθρακα μπορεί να συνεχίσει να συσσωρεύει πέρα από τις τιμές που υπολογίζονται ανωτέρω, ενώ η αποθήκευση άνθρακα των μεθόδων δασονομίας έχουν ουσιαστικά αξία μιας φοράς.



**Πίνακας 9.15.** Αποθήκευση άνθρακα στην Costa Rica TFPA και προγράμματα βιοενέργειας

	Πρόταση του Προγράμματος TFAP			Πρόγραμμα Βιοενέργειας (GTCC)		
	Άνθρακας που Αποθηκεύτηκε (tC / ha)	Κόστος Μονάδας (€ / tC)	Συνολικός Άνθρακας (MtC)	Άνθρακας που Αποθηκεύτηκε (tC / ha)	Κόστος Μονάδας (€ / tC)	Συνολικός Άνθρακας (MtC)
<b>Δασικά αποθέματα</b>						
Βουνά Talamanca	69	0,8	48,1			48,1
Χερσόνησος Osa	70	0,8	11,2			11,2
Πεδιάδα Tortuguero	65	0,8	9,1			9,1
Ηφαίστεια Central	70	0,8	10,5			10,5
Ηφαίστεια Arenal	65	1,7	6,5			6,5
Rincon de la Vieja	60	0,8	6,1			6,1
Χερσόνησος Nicoya	60	2,5	3,0			3,0
Διαχείριση φυσικών δασών	73	13,3	2,0			2,0
<b>Δασική αποκατάσταση</b>						
Προστασία φυτειών	64	10	0,6			0,6
Αναγέννηση watershed	43	3,3	0,3			0,3
Αναδάσωση watershed	57	1,7	0,7			0,7
Ευλώδεις φυτείες Αγροδασοκομία	72	12,5	6,8	101	31,7	9,6
<b>Αγροδασοκομία</b>	79	3,3	1,4	114	17,5	2,0
Silvoagroforestry	44	2,5	0,3	66	18,3	0,4
Διατήρηση του εδάφους	76	5,8	0,8			0,8
Ανεμοφράκτες	57	1,7	0,7			0,7
Φυτείες καυσόξυλων	87	10,8	2,5	142	25,8	4,0
<b>Συνολικό TFAP</b>			<b>110,6</b>			<b>115,5</b>
<b>Αναδάσωση και πρόσθετη γη</b>						
Ευλώδεις φυτείες	72	15,8	23,0	101	34,2	32,3
Φυτείες καυσόξυλων	87	14,2	9,3	142	25,8	15,1
<b>Συνολικό TFAP με πρόσθετη γη</b>			<b>142,9</b>			<b>162,9</b>

Πηγή: Joel N. Swisher, «Forestry and Biomass Energy Projects: Bottom – up Comparisons of CO<sub>2</sub> Storage and Costs», UNEP Collaborating Center, Rise National Laboratory, (1994)

### *Z) Επιπτώσεις των Στρατηγικών Μείωσης στις Εκπομπές Άνθρακα*

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης που περιγράφηκε παραπάνω προτείνουν μια ενδιάμεση στρατηγική, μεταξύ των άκρων που απαιτούν είτε την παγκόσμια αναδάσωση είτε την ενεργειακή ανάπτυξη βιομάζας, για τον μετριασμό της παγκόσμιας αλλαγής κλίματος. Επειδή η ογκώδης αναδάσωση που βασίζεται στις φυτείες ξυλείας θα έκανε με την παραγωγή της την αργά αυξανόμενη παγκόσμια αγορά ξυλείας να κορεστεί, τα ενεργειακά προγράμματα βιομάζας για να ικανοποιήσουν τις αυξανόμενες απαιτήσεις στις αναπτυσσόμενες χώρες θα παρείχαν μια πιο αξιόπιστη μακροπρόθε-

σμη χρήση για την αύξηση της βιομάζας στις φυτείες. Επιπλέον, οι ενεργειακές φυτείες βιομάζας θα μπορούσαν να αναπτυχθούν σε έδαφος που δεν είναι σε θέση να υποστηρίξει ετήσιες συγκομιδές και έτσι μειώνεται ο πιθανός ανταγωνισμός μεταξύ της ενέργειας και της παραγωγής τροφίμων.

Το βασικό ζήτημα σχετικά με την ικανότητα υποστήριξης, ωστόσο, είναι η ικανότητα του εδάφους χρήσης. Ενώ η ενεργειακές φυτείες βιομάζας προσφέρουν μια ελκυστική χρήση για παραγωγή σε δασική γη, δεν μπορούν όλα τα πιθανά δασικά εδάφη να υποστηρίξουν την παραγωγή δασονομίας σε βιώσιμη βάση. Εάν εφαρμόζεται σε περιοχές όπου το έδαφος δεν μπορεί να υποστηρίξει τέτοια χρήση, τα προγράμματα βιοενέργειας θα επέβαλλαν την απαίτηση καυσίμων, η οποία δε θα μπορούσε να ικανοποιηθεί, δημιουργώντας την πίεση να συγκομισθούν άλλα εδάφη εκτός του αρχικού δάσους. Η απερίσκεπτη ανάπτυξη βιοενέργειας θα μπορούσε ακόμη και να επιταχύνει την αποδάσωση, αντιστρέφοντας μερικές από τις ποσότητες αποθηκευμένου άνθρακα που επιτεύχθηκαν μέσω της αντικατάστασης των απολιθωμένων καυσίμων.

Άλλες περιοχές εδάφους έχουν διαφορετικές ικανότητες χρήσης, συμπεριλαμβανομένης της αγροδασοκομίας και της δασικής προστασίας. Προγράμματα σχεδιασμένα να επιτύχουν αυτές τις χρήσεις γης όπου χρειάζεται, μπορούν σημαντικά να αυξήσουν την αποθήκευση άνθρακα και να μειώσουν τις καθαρές εκπομπές άνθρακα, όπως διευκρινίστηκε παραπάνω, με σχετικά χαμηλότερο κόστος. Κατά συνέπεια, αυτά τα προγράμματα πρέπει να θεωρηθούν ένα σημαντικό μέρος των εθνικών στρατηγικών για την προώθηση βιώσιμης χρήσης γης και αποθήκευση των ανθρακικών εκπομπών. Ο πίνακας 9.15. δείχνει ότι, ακόμη και με την προηγμένη τεχνολογία, η ενεργειακή ανάπτυξη της βιομάζας θα μπορούσε να επιτύχει ανύψωση σε σχέση με τον σταθμό παραγωγής ενέργειας 40 ετών, όχι πάνω από 15% στη συνολική αποθήκευση άνθρακα μέσω της εφαρμογής του εθνικού TFAP μαζί με φυτείες σε πρόσθετο διαθέσιμο έδαφος στην Costa Rica. Ο περισσότερος από τον αποθηκευμένο άνθρακα του αρχικού σχεδίου προέρχεται από την προστασία της μόνιμης βιομάζας στα δασικά εδάφη που κινδυνεύουν με αποδάσωση, ενώ περίπου το 15% προέρχεται από νέα βιομάζα μέσω δασικής αποκατάστασης, διαχείρισης των φυσικών δασών, αγροδασοκομίας και προγραμμάτων φύτευσης.

Έδαφος κατάλληλο για δασικές φυτείες μπορεί να παρέχει καύσιμα για ανάπτυξη της ενέργειας της βιομάζας για αντικατάσταση των απολιθωμένων καυσίμων και, μέχρι το σημείο που οι συγκομιδές είναι βιώσιμες, μπορεί να συνεχίσει να αποφεύγει τις εκπομπές άνθρακα επ' αόριστον στο μέλλον. Μακροπρόθεσμα, επομένως, ένα εκτάριο εδάφους φυτείας που διαχειρίζεται συγκρατημένα και βιώσιμα, μπορεί να αποθηκεύσει περισσότερο άνθρακα μέσω της βιοενέργειας παρά μέσω άλλων δασικών χρήσεων, συμπεριλαμβανομένων των ογκωδών φυτειών ξυλείας. Αυτό το αποτέλεσμα είναι σύμφωνο με εκείνα άλλων μελετών. Μεσοπρόθεσμα, ωστόσο, η συνολική δυνατότητα αποθήκευσης άνθρακα άλλων μεθόδων δασονομίας είναι το ίδιο ή και ακόμα πιο σημαντικές και μπορούν να επιτευχθούν σε σχετικά χαμηλό κόστος. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν προστασία και εφαρμογή της αγροδασοκομίας, της διαχείρισης των φυσικών δασών και άλλες μικτές χρήσεις στο έδαφος το οποίο δε μπορεί να υποστηρίξει φυτείες. Στα επόμενα 40 – 50 έτη, ένα μεγάλο μέρος της παγκόσμιας στρατηγικής για μείωση των εκπομπών του άνθρακα πρέπει να καθιερωθεί. Η βιώσιμη ανάπτυξη των δασών, βασισμένη σε ρεαλιστικές αξιολογήσεις της ικανότητας του εδάφους για χρήση, μπορεί να παίξει ένα σημαντικό ρόλο, αντιστρέφοντας τη σύγχρονη τάση για τροπική αποδάσωση. Επομένως εμφανίζεται να είναι μια ψευδής διχοτομία, η θεώρηση ότι η αποθήκευση του άνθρακα μέσω της ανάπτυξης της ενέργειας βιομάζας και η αποθήκευση του άνθρακα με δασική διατήρηση και αναδάσωση

είναι εναλλακτικές, ανταγωνιστικές τακτικές. Αυτές οι στρατηγικές ισχύουν, ως επί το πλείστον, για διαφορετικές περιοχές εδάφους και για αυτό μπορούν να θεωρηθούν ως συμπληρωματικές προσεγγίσεις για χρήση εδάφους και μείωση των εκπομπών άνθρακα.

## *H) Συμπεράσματα*

Διάφοροι παγκόσμιοι μηχανισμοί χρηματοδότησης και συστήματα εμπορικών συναλλαγών έχουν προταθεί που θα μετέφεραν πηγές από συστήματα εκπομπής άνθρακα στις τροπικές χώρες, με σκοπό τη μείωση των εκπομπών του άνθρακα. Μερικές τέτοιες προτάσεις περιλαμβάνουν τη χρηματοδότηση των προγραμμάτων δασονομίας για αποθήκευση άνθρακα. Η διεθνής χρηματοδότηση των προγραμμάτων αποθήκευσης άνθρακα, βασίζεται πιθανόν σε έναν μηχανισμό όπως τα συστήματα αντιστάθμισης άνθρακα, θα μπορούσε να επιτρέψει σε τέτοιες μεταφορές να γίνουν συνηθισμένες εμπορικές συναλλαγές, οι οποίες εσωτερικοποιούν τα περιβαλλοντικά κόστη των εκπομπών του CO<sub>2</sub> και τα περιβαλλοντικά οφέλη της αναδάσωσης και της ανανεώσιμης ενέργειας.

Η προϋπόθεση για συστήματα αντιστάθμισης άνθρακα δεν είναι ότι το έδαφος είναι ελεύθερα διαθέσιμο στις αναπτυσσόμενες χώρες για να αντικατασταθούν άλλες χρήσεις εδάφους και φύτευση δέντρων οποιουδήποτε επιθυμητού τύπου. Μάλλον, είναι μια πραγματική ανάγκη που υπάρχει για αναδάσωση, διαχείριση των δασών και ανάπτυξη της ενέργειας της βιομάζας, οι οποίες δε θα χρηματοδοτούνταν υπό τους υπάρχοντες όρους, αλλά θα προσφέρουν και στα τοπικά και στα παγκόσμια οφέλη εάν εφαρμοστούν υπό τις κατάλληλες συνθήκες. Η ανάγκη για αναδάσωση στα αναπτυσσόμενα κράτη και η δυνατότητα των ενεργειακών προγραμμάτων δασονομίας και βιομάζας για αποθήκευση άνθρακα, δείχνει ότι τα πλεονεκτήματα της βιώσιμης ανάπτυξης της δασονομίας θα μπορούσαν να ισχύσουν μέσω ενός διεθνούς μηχανισμού χρηματοδότησης για προγράμματα αποθήκευσης άνθρακα.

Οι μέθοδοι εναπόθεσης άνθρακα συγκρίνονται συγκεντρωτικά μεταξύ τους με βάση τα πλεονεκτήματα, τη δυνατότητα εφαρμογής, τη συμβατότητα με συστήματα παραγωγής ενέργειας, τις πιθανές προκλήσεις, την τεχνική ωριμότητα και τη βιομηχανική αποδοχή στους πίνακες 9.16. και 9.17. που ακολουθούν.

	Πλεονεκτήματα	Δυνατότητα Εφαρμογής	Συμβατότητα με Συστήματα Παραγωγής Ενέργειας
Αποθήκευση σε Υδροφόρα Στρώματα	<ul style="list-style-type: none"> <li>Καλύτερη δυνατή χωρητικότητα αποθήκευσης από όλες τις μεθόδους γεωλογικής αποθήκευσης.</li> <li>Ο χρόνος παραμονής προβλέπεται να είναι χιλιάδες χρόνια.</li> <li>Οι περισσότερες ανησυχίες για ασφάλεια αποβάλλονται όταν πρόκειται για παράκτια υδροφόρα στρώματα.</li> <li>Τα υποπροϊόντα του πετρελαίου καθιστούν αυτήν τη μέθοδο οικονομικά ελκυστική.</li> <li>Δεν περιλαμβάνει αδικαιολόγητους κινδύνους για τον άνθρωπο ή το φυσικό περιβάλλον</li> <li>Η έγχυση του CO<sub>2</sub> εφαρμόζεται εμπορικά σήμερα.</li> <li>Η παγκόσμια χωρητικότητα αποθήκευσης είναι περίπου 140 Gt.C για τα πεδία αερίου και 40 Gt.C για τα πετρελαϊκά πεδία.</li> <li>Οι ταμειυτήρες έχουν καλή ακεραιότητα κατά τη διάρκεια των γεωλογικών χρόνων.</li> <li>Ήδη υπάρχει γνώση σχετικά με τους ταμειυτήρες.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Πανταχού παρούσα και μεγάλη, διαδεδομένη διαθεσιμότητα</li> <li>Περιορισμένη στις περιοχές όπου υπάρχουν ενεργά πετρελαϊκά πεδία.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Εξαιρετική</li> <li>Οι λειτουργίες πετρελαίου απαιτούν συνεχή τροφοδοσία</li> <li>Θέματα σχετικά με την χρονική διακύμανση της ποσότητας του αναγκαίου CO<sub>2</sub></li> </ul>
Αποθήκευση σε Ταμειυτήρες Πετρελαίου μέσω EOR	<ul style="list-style-type: none"> <li>Η παγκόσμια χωρητικότητα αποθήκευσης είναι περίπου 140 Gt.C για τα πεδία αερίου και 40 Gt.C για τα πετρελαϊκά πεδία.</li> <li>Οι ταμειυτήρες έχουν καλή ακεραιότητα κατά τη διάρκεια των γεωλογικών χρόνων.</li> <li>Ήδη υπάρχει γνώση σχετικά με τους ταμειυτήρες.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Περιορισμένη σε περιοχές όπου υπάρχουν ταμειυτήρες πετρελαίου και αερίου που δε χρησιμοποιούνται.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Μπορεί να χρειάζονται πολλοί ταμειυτήρες για τις μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας.</li> </ul>
Αποθήκευση «coal – bed»	<ul style="list-style-type: none"> <li>Τα υποπροϊόντα του μεθανίου καθιστούν τη μέθοδο οικονομικά ελκυστική.</li> <li>Το CO<sub>2</sub> αναοξυγονώνεται παρά πολύ αποδοτικά με απορρόφηση από την μήτρα του άνθρακα.</li> <li>Τα παγκόσμια μεγάλα κοιτάσματα του άνθρακα, σημαίνουν πιθανή μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης CO<sub>2</sub>.</li> <li>Μεγαλύτερη δυναμότητα δεξαμενών – ταμειυτήρων για το CO<sub>2</sub>: η χωρητικότητα αποθήκευσης εκτιμάται ότι είναι πάνω από 1000 Gt.C</li> <li>Οι διαφορές δεν θέτουν θέματα ασφάλειας.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Υπάρχει ασάφεια στο πώς πολλοί τύποι σχηματισμών άνθρακα θα είναι πρακτικοί για παραγωγή «coal – bed» μεθανίου</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αναπτυχθεί μια εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας μηδενικών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, που θα χρησιμοποιεί ως καύσιμο «coal – bed» μεθάνιο, στην οποία το απόβλητο CO<sub>2</sub> θα εγχέεται σε κοιτάσματα «coal – bed» μεθάνιου για παραγωγή περισσότερο μεθανίου.</li> <li>Εξαιρετική, για εγκαταστάσεις που βρίσκονται σε ακτογραμμές</li> </ul>
Ωκεάνια Αποθήκευση	<ul style="list-style-type: none"> <li>Χαμηλό κόστος.</li> <li>Σημαντικά δάση είναι διαθέσιμα</li> <li>Παρέχει χρηματοδότηση και εργασία σε αγροτικές και αναπτυσσόμενες χώρες.</li> <li>Διατήρηση της βιοποικιλότητας</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Εφαρμόζεται καλύτερα σε χώρες οι οποίες βρίσκονται δίπλα σε ωκεανούς και δεν έχουν πρόσβαση σε κατάλληλους υπεδάφιους ταμειυτήρες, για παράδειγμα η Ιαπωνία.</li> <li>Οι κατοικημένες περιοχές βρίσκονται κοντά στις ακτογραμμές.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Εξαιρετική, για εγκαταστάσεις που βρίσκονται σε ακτογραμμές</li> </ul>
Ενίσχυση του Ταμειυτήρα των Δασών	<ul style="list-style-type: none"> <li>Σχετικά χαμηλό κόστος / τόνο CO<sub>2</sub>.</li> <li>Παράλληλα οφέλη του συντηρητικού οργάνωτος – βελτιωμένη ποιότητα εδάφους, μειωμένη διάβρωση, βελτιωμένη αποτελεσματικότητα της χρήσης ύδατος, βελτιωμένη παραγωγικότητα συγκομιδής.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ιδιαίτερα εφαρμόσιμη σε αραιοκατοικημένες περιοχές, με λίγες επιλογές για διαφορετικές χρήσεις του εδάφους.</li> <li>Σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη τα δάση μπορεί να είναι λιγότερο αποτελεσματικά.</li> <li>Η παγκόσμια χωρητικότητα είναι περιορισμένη και τα κόστη αυξάνονται σημαντικά όσο λιγότερο ευνοϊκές τοποθεσίες χρησιμοποιούνται.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Εφαρμόσιμη σε όλα τα συστήματα παραγωγής ενέργειας, εφόσον δεν υπάρχει άμεση σύνδεση με την εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας.</li> </ul>
Ενίσχυση του Ταμειυτήρα των Καλλιεργημένων Εδαφών	<ul style="list-style-type: none"> <li>Εξαιρετική στα «στεγνά» εδάφη, στα συστήματα καλλιέργειας ανεπαρκή σε νερό και στα εδάφη υψηλής διάβρωσης.</li> <li>Μέτρια καλή στα περισσότερα άλλα συστήματα καλλιέργειας</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Εξαιρετική στα «στεγνά» εδάφη, στα συστήματα καλλιέργειας ανεπαρκή σε νερό και στα εδάφη υψηλής διάβρωσης.</li> <li>Μέτρια καλή στα περισσότερα άλλα συστήματα καλλιέργειας</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Καλή.</li> </ul>

Πίνακας 9.16. Σύγκριση των μεθόδων αναοξυγονώνησης άνθρακα με βάση τα πλεονεκτήματα, τη δυνατότητα εφαρμογής και τη συμβατότητα με συστήματα παραγωγής ενέργειας

Πιθανές Προκλήσεις	Τεχνική Ωριμότητα	Βιομηχανική Αποδοχή
<p><b>Αποθήκευση σε Υδροφόρα Στρώματα</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Κατανόηση του κινδύνου καταστροφικής ή αργής απελευθέρωσης του CO<sub>2</sub>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Κάποια εμπειρία αποθήκευσης σε υδροφόρα στρώματα για χημικά, κ.τ.λ.</li> <li>Λίγη πραγματική εμπειρία για αυτή τη συγκεκριμένη εφαρμογή</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Εμπορική εφαρμογή: το CO<sub>2</sub> έχει εγχυθεί στον σχηματισμό Utsira κάτω από τη βόρεια θάλασσα, από τον Αύγουστο του 1996</li> <li>Αποδοχή υλικών, άλλων εκτός του CO<sub>2</sub></li> <li>Η EOR έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως: το 1998 περισσότερα από 65 πετρελαϊκά πεδία στις ΗΠΑ εγχέονταν με CO<sub>2</sub>.</li> <li>Η βιομηχανία ερευνάει την πιθανότητα χρήσης CO<sub>2</sub> που έχει κατακρατηθεί.</li> </ul>
<p><b>Αποθήκευση σε Ταμειυτήρες Πετρελαίου μέσω EOR</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Συχνά μπορεί να είναι φθηνότερη η απόκτηση του CO<sub>2</sub> από φυσικές πηγές.</li> <li>Η παγκόσμια χωρητικότητα αποθήκευσης μπορεί να είναι περιορισμένη (π.χ. έως 65 Gt.C)</li> <li>Λόγω των σημερινών διαφυγών – διαρροών, οι λειτουργίες στον ταμειυτήρα πρέπει να αποθηκεύουν το CO<sub>2</sub> υπό πίεση.</li> <li>Σήμερα υπάρχουν πολύ λίγοι εξαντλημένοι ταμειυτήρες</li> <li>Κατανόηση του κινδύνου της καταστροφικής ή αργής απελευθέρωσης του CO<sub>2</sub>.</li> <li>Οι μέθοδοι ενισχυμένης ανάκτησης αερίου (EOR) για εκμετάλλευση του «coal – bed» μεθανίου απαιτούν περαιτέρω ανάπτυξη</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Χρησιμοποιείται παρόμοια τεχνολογία με αυτήν της EOR</li> <li>Η έγχυση CO<sub>2</sub> σε «coal – beds» ήδη χρησιμοποιείται για να ενισχύσει την ανάκτηση μεθανίου, αν και η διαδικασία βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης</li> <li>Μεγάλη εμπειρία από την παράκτια εξερεύνηση / παραγωγή είναι εφαρμόσιμη</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Δεν υπάρχει ακόμα εμπορική εφαρμογή που να περιλαμβάνει ένα τέτοιο πεδίο.</li> <li>Καλή αποδοχή.</li> <li>Δεν είχε καλή αποδοχή σε σχέση με τις μεθόδους γεωλογικής αποθήκευσης.</li> <li>Ένα πείραμα πεδίου που πραγματοποιήθηκε στην ακτή της Χαβάης το 2001, θα βοηθήσει στη μείωση μερικών από τις αβεβαιότητες.</li> </ul>
<p><b>Αποθήκευση Ωκεάνια Αποθήκευση</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Μπορεί να έχει αρνητικό αντίκτυπο στο τοπικό θαλάσσιο περιβάλλον.</li> <li>Σημαντικά νομικά και δικαιοδοτικά θέματα πρέπει να ξεπεραστούν.</li> <li>Αρνητική αντιμετώπιση από μη κυβερνητικούς οργανισμούς (NGOs)</li> <li>Ο χρόνος διατήρησης, της τάξης εκατοντάδων χρόνων, είναι μικρότερος από αυτόν της υπεράφιας αποθήκευσης.</li> <li>Έλεγχος και εξακρίβωση της αποθήκευσης του άνθρακα.</li> <li>Ελαχιστοποίηση των διαρροών.</li> <li>Μικρής διάρκειας αποθήκευση.</li> <li>Κίνδυνος για απώλεια των δασών μέσω πυρκαγιάς, παρασίτων ή κοινωνικών παραγόντων.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Η δασονομία είναι ώριμη τεχνικά.</li> <li>Οι ιδιοκτήτες γης και οι αγρότες πρέπει να ενημερωθούν για τα πλεονεκτήματα της αποθήκευσης του άνθρακα στα δάση.</li> <li>Υπηρεσίες ελέγχου και εξακρίβωσης είναι διαθέσιμες, αλλά περαιτέρω ανάπτυξη θα ήταν ωφέλιμη για την αύξηση της ακρίβειας και τη μείωση των δαπανών.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ακόμη συζητείται στη συνεδρίαση COP 6.</li> <li>Θεωρείται η εύκολη, χαμηλού κόστους μέθοδος.</li> <li>Μερικές εταιρίες ήδη αγοράζουν πιστώσεις για άνθρακα από τα δάση.</li> <li>Υπάρχουν ακόμα ανησυχίες για διαρροή και κινδύνους.</li> </ul>
<p><b>Ενίσχυση του Ταμειυτήρα των Δασών</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Πιθανή ανάγκη για περιοδική χρήση συμβατικού οργάνωματος για τη διατήρηση της παραγωγικότητας, εξαιτίας της μερικής απώλειας του CO<sub>2</sub> που έχει εναποτεθεί.</li> <li>Πιθανή επαναφορά σε συμβατικό όργανο λόγω αλλαγής της ιδιοκτησίας γης.</li> <li>Αντίσταση στο να συμπεριληφθούν βιολογικές δεξαμενές για εναπόθεση του άνθρακα.</li> <li>Φτωχά αναπτυγμένη υποδομή για την αγορά του CO<sub>2</sub></li> <li>Καλές βάσεις για υποδομή</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Τα συντηρητικά συστήματα οργάνωματος βρίσκονται υπό ανάπτυξη από τη δεκαετία του 1970.</li> <li>Περίπου 35% υιοθέτηση του συντηρητικού συστήματος έχει επιτευχθεί μέχρι σήμερα στις ΗΠΑ.</li> <li>Η τεχνολογία είναι έτοιμη για γρήγορη υιοθέτηση, πράγμα το οποίο έδωσε πρόσθετα οικονομικά κίνητρα.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Γενικά καλή αποδοχή από τους αγρότες, εξαιτίας των παράλληλων πλεονεκτημάτων.</li> <li>Κάπως μεγαλύτερος οικονομικός κίνδυνος για τους αγρότες.</li> <li>Μπορεί να απαιτεί μέτρια κίνητρα υιοθέτησης, για να επιτευχθεί γρήγορη πρόσθετη υιοθέτηση.</li> </ul>

Πίνακας 9.17. Σύγκριση των μεθόδων εναπόθεσης άνθρακα με βάση τις πιθανές προκλήσεις, την τεχνική ωριμότητα και την βιομηχανική αποδοχή

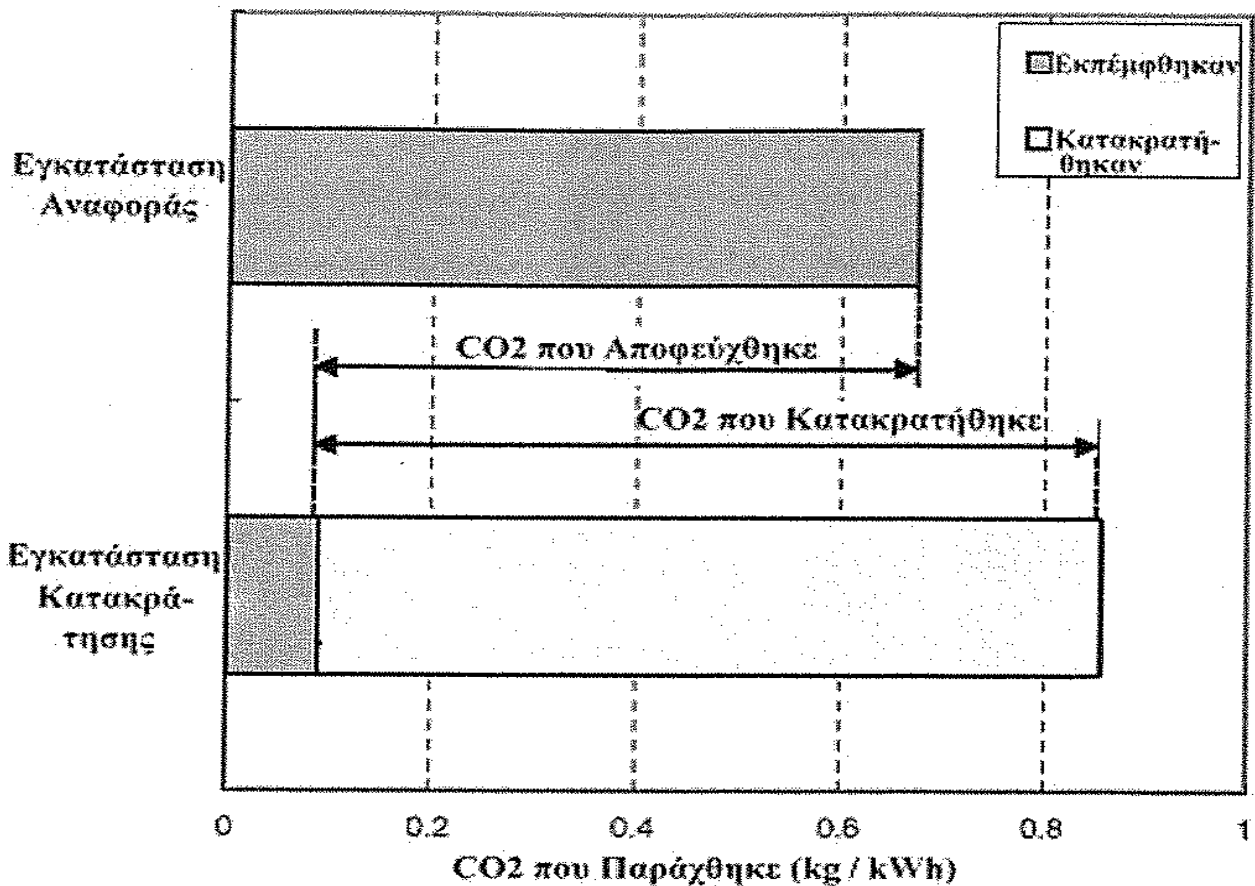
# 10.ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ

Οι δαπάνες κατακράτησης και αποθήκευσης του άνθρακα μπορούν να εξεταστούν από την άποψη τεσσάρων λειτουργιών: διαχωρισμός, συμπίεση, μεταφορά και έγχυση. Αυτές οι δαπάνες εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων της πηγής του CO<sub>2</sub>, της απόστασης μεταφοράς και του τύπου και των χαρακτηριστικών του ταμιευτήρα αποθήκευσης. Σε αυτό το τμήμα, εξετάζονται τα κόστη που συνδέονται με την κατακράτηση από τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας με καύση απολιθωμένων καυσίμων και στη συνέχεια τη μεταφορά και αποθήκευση. Σε αυτήν την περίπτωση, το κόστος της κατακράτησης περιλαμβάνει και τις δαπάνες διαχωρισμού και τις δαπάνες συμπίεσης, επειδή και οι δύο αυτές διαδικασίες σχεδόν πάντα εμφανίζονται στις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας.

## Α) Κόστος Κατακράτησης

Οι τεχνολογίες για διαχωρισμό και συμπίεση του CO<sub>2</sub> από τα αέρια σωλήνα των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας υπάρχουν και είναι εμπορικά διαθέσιμες. Ωστόσο, δεν έχουν βελτιστοποιηθεί για κατακράτηση του CO<sub>2</sub> με σκοπό την αποθήκευση. Η αρχική διαφορά της κατακράτησης του CO<sub>2</sub> για εμπορικές αγορές με την κατακράτηση του CO<sub>2</sub> για αποθήκευση είναι ο ρόλος της ενέργειας. Στην πρώτη περίπτωση, η ενέργεια είναι ένα προϊόν και φροντίζεται μόνο η τιμή του. Στη δεύτερη περίπτωση, η χρήση της ενέργειας παράγει περισσότερες εκπομπές CO<sub>2</sub>, πράγμα το οποίο είναι ακριβώς αυτό που πρέπει να αποφευχθεί. Οι ενεργειακές απώλειες μπορούν να υπολογιστούν ως  $(x-y)/x$ , όπου το  $x$  είναι η παραγωγή σε kW μιας εγκατάστασης παραγωγής ενέργειας αναφοράς χωρίς κατακράτηση και το  $y$  είναι η παραγωγή σε kW της ίδιας εγκατάστασης αλλά με κατακράτηση. Ο υπολογισμός απαιτεί την εισαγωγή ίδιων και ίσης ποσότητας καυσίμων και στις δυο περιπτώσεις. Για παράδειγμα, εάν η παραγωγή της εγκατάστασης μειωθεί κατά 20% λόγω της διαδικασίας κατακράτησης ( $y = 0,8x$ ), η διαδικασία έχει ενεργειακές απώλειες 20%.

Οι ενεργειακές απώλειες μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας τις δαπάνες με βάση το CO<sub>2</sub> που έχει αποφευχθεί. Όπως φαίνεται στο σχήμα 10.1., εξαιτίας της πρόσθετης ενέργειας που απαιτείται για την κατακράτηση του CO<sub>2</sub>, η ποσότητα των εκπομπών του CO<sub>2</sub> που διαφεύγει είναι πάντα λιγότερη από την ποσότητα που κατακρατείται. Επομένως, η κατακράτηση του CO<sub>2</sub> για λόγους αποθήκευσης απαιτεί περισσότερη έμφαση στη μείωση της εισαγόμενης ενέργειας, παρά στις παραδοσιακές εμπορικές διαδικασίες.

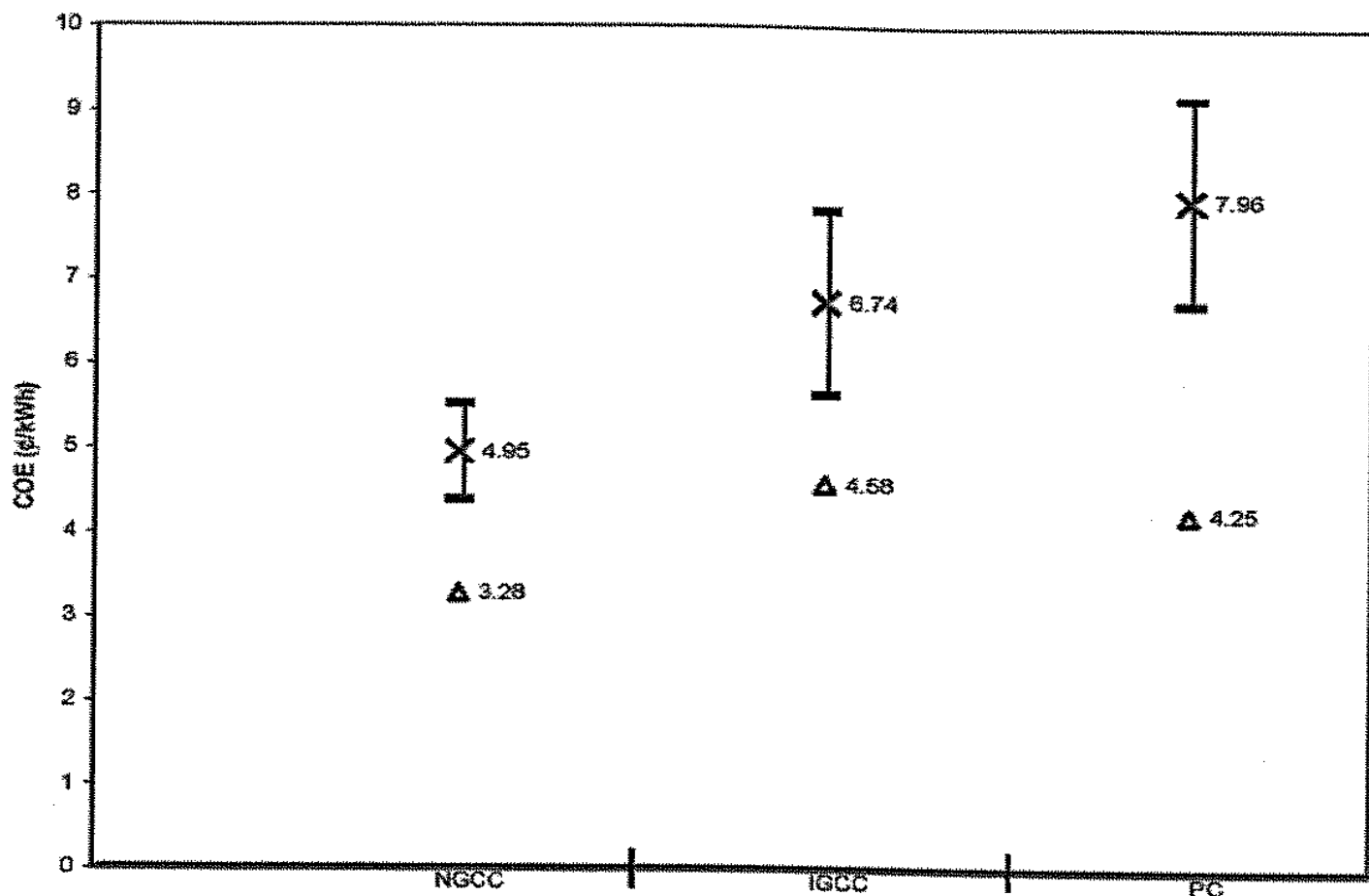


**Σχήμα 10.1.** Γραφική απεικόνιση του CO<sub>2</sub> που αποφεύχθηκε. Οι εκπομπές που αποφεύχθηκαν είναι απλά η διαφορά των πραγματικών εκπομπών ανά kWh των δύο εγκαταστάσεων. Παρατηρείται ότι λόγω των ενεργειακών απωλειών, οι εκπομπές που αποφεύγονται είναι πάντα λιγότερες από το CO<sub>2</sub> που κατακρατείται.

Πηγή: Assessment by Germanwatch, «Carbon Dioxide Capture and Storage as a sequestration strategy», (2002), [www.germanwatch.org/rio/ccs04.htm](http://www.germanwatch.org/rio/ccs04.htm).

Με βάση τα αποτελέσματα σημαντικών διαθέσιμων οικονομικών μελετών που προσαρμόζονται σε μια κοινή οικονομική βάση, το σχήμα 10.2. συνοψίζει το παρόν κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας σε τρεις τύπους εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας με κατακράτηση του CO<sub>2</sub>: συνδυασμένων κύκλων με ενσωματωμένη αεριοποίηση (IGCC), απλού κύκλου καύση κονιοποιημένου άνθρακα (PC) και συνδυασμένων κύκλων φυσικού αερίου (NGCC). Ο μέσος όρος (συν / πλην μια σταθερή απόκλιση) παρουσιάζεται για κάθε εγκατάσταση κατακράτησης, μαζί με ένα χαρακτηριστικό κόστος ηλεκτρική ενέργειας για τις εγκαταστάσεις χωρίς κατακράτηση. Αυτό οδηγεί σε μια αύξηση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας 0,008 – 0,017 € / kWh για μια εγκατάσταση NGCC, 0,008 – 0,025 € / kWh για μια εγκατάσταση IGCC και 0,017 – 0.033 € / kWh για μια εγκατάσταση PC.





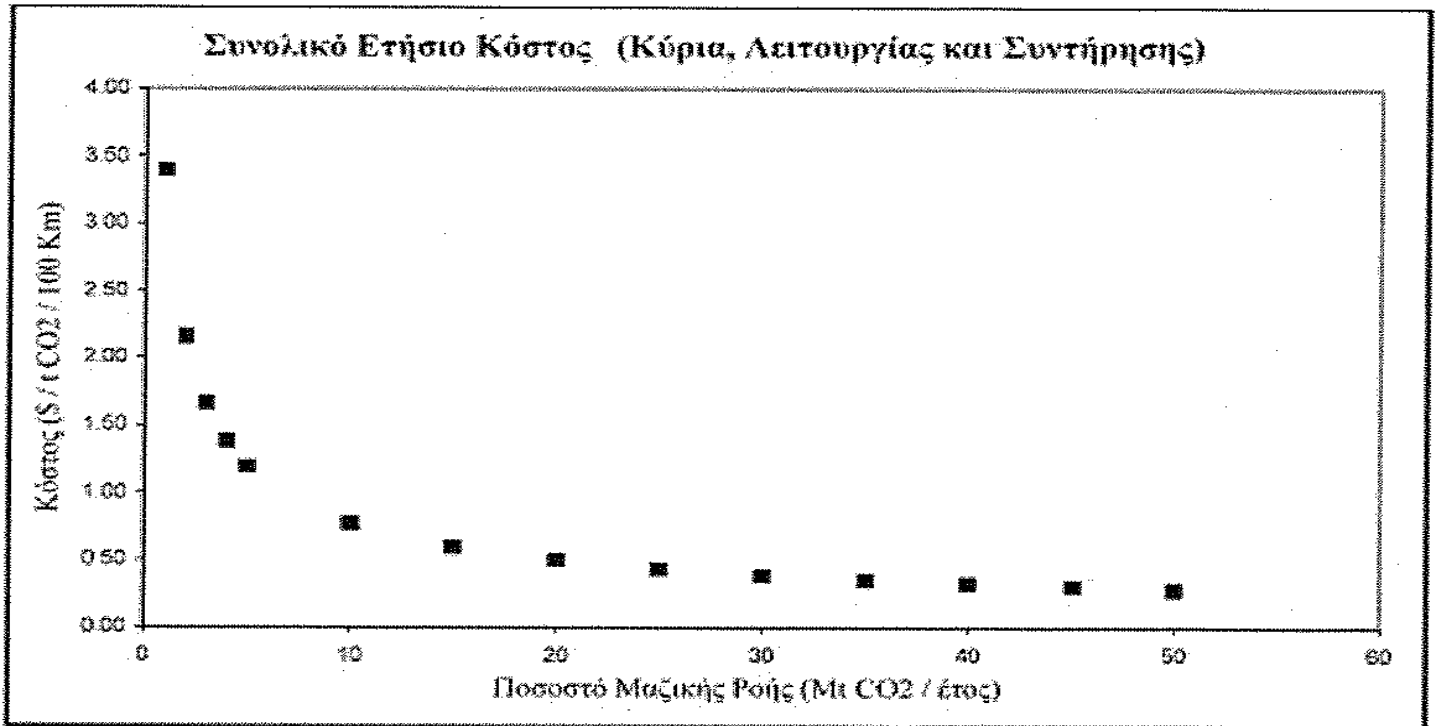
**Σχήμα 10.2.** Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας με κατακράτηση, για διάφορους τύπους εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας (NGCC είναι συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου, IGCC είναι συνδυασμένου κύκλου ενσωματωμένης αεριοποίησης, PC είναι κονιοποιημένου άνθρακα). Τα τρίγωνα αντιπροσωπεύουν εγκαταστάσεις αναφοράς χωρίς κατακράτηση. Το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για τις εγκαταστάσεις κατακράτησης CO<sub>2</sub> παρουσιάζεται ως μέσος όρος και διακύμανση μιας σταθερής απόκλισης.

Πηγή: *Assessment by Germanwatch, «Carbon Dioxide Capture and Storage as a sequestration strategy», (2002), [www.germanwatch.org/rio/ccs04.htm](http://www.germanwatch.org/rio/ccs04.htm).*

Οι ενεργειακές απώλειες για κάθε μια από αυτές τις διαδικασίες έχουν επίσης υπολογιστεί. Οι ενεργειακές απώλειες για μια εγκατάσταση NGCC είναι περίπου 16%, ενώ για μια εγκατάσταση PC είναι 28%. Κάθε μια από αυτές τις εγκαταστάσεις χρησιμοποιούν τη διαλυτική διαδικασία αμινών. Οι ενεργειακές απώλειες για μια εγκατάσταση PC είναι μεγαλύτερο από αυτό μιας εγκατάστασης NGCC, επειδή ο γαιάνθρακας έχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα από το αέριο, σε άνθρακα. Οι σημαντικότερες ενεργειακές απώλειες συνδέονται με την ενέργεια που απαιτείται για να περάσει το αέριο σωλήνα μέσα από την στήλη απορρόφησης αμινών, τη θερμότητα που απαιτείται για να απορροφηθεί το CO<sub>2</sub> και να αναπαραχθεί η αμίνη και την ενέργεια που απαιτείται για να συμπιεστεί το CO<sub>2</sub>. Οι ενεργειακές απώλειες μιας εγκατάστασης IGCC είναι 14%, σημαντικά λιγότερο από αυτό της εγκατάστασης PC, παρότι χρησιμοποιεί γαιάνθρακα. Αυτό γίνεται επειδή η υψηλή μερική πίεση του CO<sub>2</sub> στο ρεύμα της IGCC επιτρέπει τη χρήση μιας ενεργειακά αποδοτικής διαδικασίας φυσικής απορρόφησης, αντί της χημικής διαδικασίας απορρόφησης. Εντούτοις, μερικά από αυτά τα κέρδη αντισταθμίζονται από την ενεργειακή απώλεια που συνδέεται με την μετατροπή του γαιάνθρακα σε CO<sub>2</sub> και υδρογόνο.

## Β) Κόστος Μεταφοράς

Το σχήμα 10.3. παρουσιάζει το κόστος μεταφοράς του CO<sub>2</sub> σε μεγάλες ποσότητες, μέσω αγωγών. Οι δαπάνες μπορούν να ποικίλουν σημαντικά, επειδή τα κόστη αγωγών εξαρτώνται από την έκταση, την πυκνότητα πληθυσμού, κ.τ.λ. Οι οικονομίες κλίμακας πραγματοποιούνται όταν έχουμε να κάνουμε με πάνω από 10 εκατομμύρια τόνους ανά έτος (ισοδύναμο με περίπου 1500 MW ενέργειας από καύση γαιάνθρακα). Αυτό το κόστος είναι περίπου €0,4 / τόνο / 100 km, ενώ η μεταφορά με φορτηγά κοστίζει €5 / τόνο / 100 km.

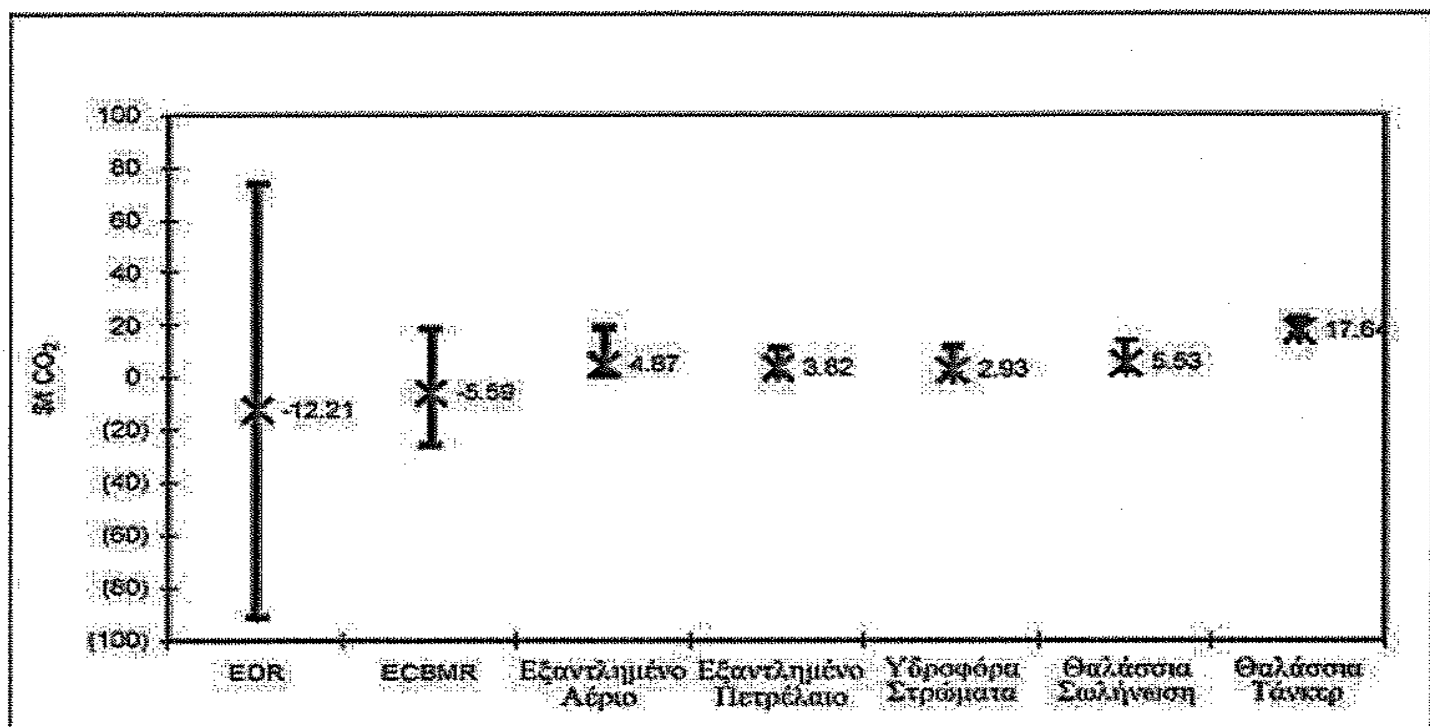


Σχήμα 10.3. Το κόστος μεταφοράς του CO<sub>2</sub> μέσω αγωγών ως ποσοστό μαζικής ροής του CO<sub>2</sub>.

Πηγή: Assessment by Germanwatch, «Carbon Dioxide Capture and Storage as a sequestration strategy», (2002), [www.germanwatch.org/rio/ccs04.htm](http://www.germanwatch.org/rio/ccs04.htm).

## Γ) Κόστος Έγχυσης και Αποθήκευσης

Το σχήμα 10.4. συνοψίζει το κόστος των διάφορων τεχνολογιών αποθήκευσης άνθρακα με βάση το αποφευχθέν αέριο θερμοκηπίου. Τα σημεία στις γραφικές παραστάσεις είναι για μια χαρακτηριστική βασική περίπτωση, ενώ οι μπάρες αντιπροσωπεύουν τις διακυμάνσεις μεταξύ των αντιπροσωπευτικών περιπτώσεων υψηλού και χαμηλού κόστους. Οι διακυμάνσεις απεικονίζουν τις διαφορετικές συνθήκες που υπάρχουν στους διάφορους ταμειυτήρες (βάθος, διαπερατότητα, κ.τ.λ.), την απόσταση μεταξύ πηγής και ταμειυτήρα (εδώ, μια διακύμανση των 0 – 300 km) και τις τιμές των υποπροϊόντων (δηλ., πετρέλαιο και φυσικό αέριο).



**Σχήμα 10.4.** Το εύρος των δαπανών για τις διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης του άνθρακα με βάση το αέριο θερμοκηπίου που έχει αποφευχθεί.

Πηγή: *Assessment by Germanwatch, «Carbon Dioxide Capture and Storage as a sequestration strategy», (2002), [www.germanwatch.org/rio/ccs04.htm](http://www.germanwatch.org/rio/ccs04.htm).*

Αποκλείοντας την πιο ακριβή μέθοδο ωκεάνιας εναπόθεσης με βυτιοφόρα, οι τυπικές δαπάνες για την αποθήκευση του CO<sub>2</sub> (μεταφορά και έγχυση), χωρίς κέρδη από υποπροϊόντα πετρελαίου ή αερίου, είναι της τάξης των €2,5 – 4,6 / τόνο CO<sub>2</sub> (€9,2 - 16,7 / τόνο άνθρακα). Οι γενικές δαπάνες είναι της τάξης των €1,7 - 12,5 / τόνο CO<sub>2</sub> (€5,8 - 45,8 / τόνο άνθρακα). Με κέρδη από υποπροϊόντα πετρελαίου ή αερίου, θα αντισταθμιστούν οι δαπάνες αποθήκευσης. Για παράδειγμα, στη βασική περίπτωση EOR, κάποιος μπορεί να αντέξει οικονομικά να πληρώνει €10,18 / τόνο CO<sub>2</sub>, χωρίς να έχει κέρδος ή ζημία (δηλ. οι δαπάνες είναι ίσες με τα κέρδη από τα υποπροϊόντα).

## Δ) Γενικές Δαπάνες

Οικονομικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκτιμηθεί η τιμή του άνθρακα της αγοράς που απαιτείται για την προσαρμογή των τεχνολογιών κατακράτησης και αποθήκευσης του άνθρακα στη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τιμές του άνθρακα πρέπει να προσδιοριστούν μέσω της κυβερνητικής πολιτικής όπως ένας φόρος. Υποθέτοντας τις δαπάνες και το τεχνολογικό επίπεδο που περιγράφηκε ανωτέρω, οι τιμές του άνθρακα πρέπει να φτάσουν τα €83,3 / τόνο άνθρακα ώστε να αρχίσουν οι τεχνολογίες κατακράτησης και αποθήκευσης του άνθρακα να υιοθετούνται από τη βιομηχανία σε σημαντική κλίμακα (> 5% διείσδυση στην αγορά). Δεδομένου ότι η τιμή άνθρακα αυξάνεται, οι τεχνολογίες κατακράτησης και αποθήκευσης άνθρακα θα προσαρμοστούν γρηγορότερα και θα επιτύχουν μεγαλύτερη διείσδυση στην αγορά.

Οι τεχνολογίες κατακράτησης και αποθήκευσης του άνθρακα μπορούν να υιοθετηθούν με τιμές άνθρακα πολύ λιγότερο από €83,3 / τόνο άνθρακα. Αυτοί οι στόχοι της ευκαιρίας είτε θα έχουν πολύ φθηνό κόστος κατακράτησης (από πηγές που

δεν παράγουν ενέργεια, όπως οι επεξεργασίες φυσικού αερίου, η παραγωγή αμμωνίας, κ.τ.λ.), είτε θα είναι σε θέση να έχουν κέρδη από τα υποπροϊόντα (π.χ., EOR). Όλα τα εμπορικής κλίμακας προγράμματα αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> σε λειτουργία (Sleipner, Weyburn) είτε προγραμματισμένα (Snovit από την Statoil στη Βόρεια Θάλασσα και In Salah από την BP στην Αλγερία) μπορούν να ταξινομηθούν ως στόχοι της ευκαιρίας. Τέλος, νέες τεχνολογίες μπορούν να μειώσουν τις δαπάνες που συνδέονται με την κατακράτηση και αποθήκευση του άνθρακα.

Στον πίνακα 10.1. παρουσιάζονται οι συνολικές δαπάνες των μεθόδων κατακράτησης και εναπόθεσης του CO<sub>2</sub>.

Περιπτώσεις	Αποθήκευση		Χρησιμοποίηση		ΕΟΡ		Βιομηχανικός	
	Υψηλές 35%	Χαμηλές 15%	Υψηλές 35%	Χαμηλές 15%	Υψηλές 35%	Χαμηλές 15%	Υψηλές 35%	Χαμηλές 15%
Κόστος Διάθεσης (€/τόνο που κατακρατήθηκε)	€12,50	€4,20	-€29,20	-€29,20	-€10,00	-€10,00	€12,50	€4,20
Κόστος Ηλεκτρισμού σε €/ kWh								
Χωρίς Κατακράτηση	Με Κατακράτηση	Με Κατακράτηση	Με Κατακράτηση	Με Κατακράτηση	Με Κατακράτηση	Με Κατακράτηση	Με Κατακράτηση	Με Κατακράτηση
Βασικό Κόστος Παραγωγής	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
Κόστος Κατακράτησης	0	1,125	1,125	0,71	1,125	0,71	0,57	0,36
Υποσύνολο (ανά ακαθάριστη kWh)	3,8	4,925	4,925	4,51	4,925	4,51	4,37	4,16
Καθαρή Ενέργεια (MW)	500	325	325	425	325	425	325	425
Υποσύνολο (ανά καθαρή kWh)	3,8	7,625	7,625	5,342	7,625	5,342	6,767	4,925
T&D κ.τ.λ.	1,667	1,667	1,667	1,667	1,667	1,667	1,667	1,667
Συνολικό Κόστος Παράδοσης	5,467	9,292	9,292	7,009	9,292	7,009	8,434	6,592
Εκπεμπόμενο CO <sub>2</sub> (kg/s)	115	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
Εκπεμπόμενο CO <sub>2</sub> (kg/kWh)	0,828	0,127	0,127	0,097	0,127	0,097	0,127	0,097
Κόστος Κατακράτησης (€/τόνο που αποφεύχθηκε)	€54,2	€20,8	€54,2	€20,8	€54,2	€20,8	€41,7	€15
Κόστος Διάθεσης (€/τόνο που αποφεύχθηκε)	€21,7	€5	-€50	-€35	-€16,7	-€11,7	€21,7	€5
Συνολικό Κόστος (€/τόνο που αποφεύχθηκε)	€75,8	€25,8	€4,2	-€14,2	€37,5	€8,3	€63,3	€20
Αντίκτυπος (εκατομύρια τόνοι)	1700	1500	20	20	50	50	80	80

**Πίνακας 10.1.** Συνολικές δαπάνες των μεθόδων κατακράτησης και αναπόθεσης του CO<sub>2</sub>. Πηγή: Assessment by Germanwatch, «Carbon Dioxide Capture and Storage as a sequestration strategy», (2002), [www.germanwatch.org/rto/ccs04.htm](http://www.germanwatch.org/rto/ccs04.htm).

# 11. ΣΥΝΟΨΗ

Εναπόθεση του άνθρακα, μπορεί να οριστεί ως η σύλληψη και ασφαλής αποθήκευση του άνθρακα, ο οποίος σε άλλη περίπτωση θα εκπεμπόταν ή θα παρέμενε στην ατμόσφαιρα. Η ιδέα είναι α) να εμποδιστούν οι εκπομπές του άνθρακα που παράγονται από ανθρώπινες δραστηριότητες να φθάσουν την ατμόσφαιρα κατακρατώντας, απομονώνοντας και αποθηκεύοντάς τις, ή β) να εναποτεθεί ο άνθρακας από την ατμόσφαιρα με ποικίλους τρόπους και να αποθηκευτεί. Η εναπόθεση του άνθρακα είναι πολύ σημαντική διότι μειώνει τις ανθρακικές εκπομπές από τα απολιθωμένα καύσιμα και ανταγωνίζεται την τεράστια αύξηση των εκπομπών του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα (το οποίο είναι ένα από τα σημαντικότερα αέρια θερμοκηπίου).

Έξι επιστημονικοί / τεχνικοί «τομείς εστίασης» σχετικά με την εναπόθεση του άνθρακα προσδιορίστηκαν και αναλύθηκαν σε αυτήν την εργασία:

1. Διαχωρισμός και κατακράτηση του CO<sub>2</sub>
2. Ωκεάνια εναπόθεση
3. Εναπόθεση άνθρακα σε χερσαία οικοσυστήματα (έδαφος και βλάστηση)
4. Εναπόθεση του CO<sub>2</sub> σε γεωλογικούς σχηματισμούς
5. Προηγμένες βιολογικές διαδικασίες για εναπόθεση
6. Προηγμένες χημικές προσεγγίσεις για εναπόθεση

## A) Διαχωρισμός και Κατακράτηση του CO<sub>2</sub>

Οι πιο ελκυστικές τρέχουσες μέθοδοι για διαχωρισμό και κατακράτηση του CO<sub>2</sub> περιλαμβάνουν:

- Χημική και φυσική απορρόφηση
- Φυσική και χημική προσρόφηση
- Απόσταξη χαμηλής θερμοκρασίας
- Μεμβράνες διαχωρισμού αερίου

Το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να αφαιρεθεί από τα ρεύματα αερίου με *φυσική ή χημική απορρόφηση*. Οι διαδικασίες φυσικής απορρόφησης υπακούουν στον νόμο Henry (δηλαδή, εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και την πίεση, με την απορρόφηση να πραγματοποιείται σε υψηλές πιέσεις και χαμηλές θερμοκρασίες). Τυπικά, αυτές οι διαδικασίες συμβαίνουν όταν η συγκέντρωση (δηλαδή, μερική πίεση του CO<sub>2</sub>) είναι υψηλή (>525 kPa). Η κατακράτηση 0,1 έως 6% CO<sub>2</sub> από τα φρεάτια παραγωγής φυσικού αερίου μέσω χημικής απορρόφησης χρησιμοποιώντας αμίνες («amines»), μπορεί να επεκταθεί ικανοποιητικά σε μακρινά πεδία. Αυτήν την περίοδο, αυτή η προσέγγιση αποτελεί την πιο διαδεδομένη εμπορική τεχνολογία κατακράτησης. Εντούτοις, σε άλλες εμπορικές εφαρμογές, οι τυπικοί διαλύτες για τη φυσική απορρόφηση του CO<sub>2</sub> περιλαμβάνουν ενώσεις με βάση τη γλυκόλη (π.χ. ο διμαιθυλικός αιθέρας της γλυκόλης πολυαιθυλενίου) και την κρύα μεθανόλη. Η χημική απορρόφηση προτιμάται για χαμηλές, στο να συγκρατηθούν, μερικές πιέσεις του CO<sub>2</sub>.

Ο εκλεκτικός διαχωρισμός του CO<sub>2</sub> μπορεί να επιτευχθεί μέσω *φυσικής προσρόφησης* του αερίου σε στερεά μεγάλης επιφάνειας, στα οποία η μεγάλη περιοχή επιφάνειας προκύπτει από τη δημιουργία πολύ λεπτού πορώδους επιφάνειας, μέσω μεθόδων ενεργοποίησης επιφάνειας χρησιμοποιώντας για παράδειγμα ατμό, οξυγόνο, ή

CO<sub>2</sub>. Μερικά φυσικά εμφανιζόμενα υλικά (π.χ. «zeolites») έχουν μεγάλες περιοχές επιφάνειας και προσροφούν αποτελεσματικά μερικά αέρια. Οι ικανότητες και οι κινητικές της προσρόφησης εξαρτώνται από πολυάριθμους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων του μεγέθους των πόρων των προσροφητικών, του όγκου των πόρων, την περιοχή επιφάνειας και της συγγένειας του προσροφόμενου αερίου με το προσροφητικό. Η φυσική και χημική προσρόφηση είναι ενεργοβόρα και δαπανηρή, εντούτοις, είναι εμπορικά εφαρμόσιμη και ισχύει για τον διαχωρισμό και την κατακράτηση του CO<sub>2</sub> από μερικές σχετικά μεγάλες πηγές.

Η απόσταξη χαμηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται ευρέως εμπορικά για τη ρευστοποίηση και τον καθαρισμό του CO<sub>2</sub> από τις πηγές υψηλής καθαρότητας (χαρακτηριστικά ένα ρεύμα με >90% CO<sub>2</sub>). Στην απόσταξη χαμηλής θερμοκρασίας, ένα υγρό με χαμηλό σημείο βρασμού καθαρίζεται με εξάτμιση και στη συνέχεια με συμπύκνωση. Ωστόσο, τέτοιες διαδικασίες δε χρησιμοποιούνται για τον διαχωρισμό του CO<sub>2</sub> από σημαντικά φτωχότερα σε CO<sub>2</sub> ρεύματα. Η εφαρμογή της απόσταξης για τον καθαρισμό των φτωχών ρευμάτων του CO<sub>2</sub> απαιτεί χαμηλής θερμοκρασίας ψύξη (<0°C) και στερεά που επεξεργάζονται κάτω από το τριπλό σημείο του CO<sub>2</sub> (-57°C). Μια κατοχυρωμένη με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας διαδικασία διαχωρισμού του CO<sub>2</sub> από το φυσικό αέριο που παρέχει υγρό CO<sub>2</sub>, είναι ένα παράδειγμα μιας τέτοιας χαμηλής θερμοκρασίας διαδικασίας (Valencia and Denton 1985; Victory and Valencia 1987). Τα ρεύματα που περιέχουν νερό και άλλα ίχνη υποπροϊόντων της καύσης, όπως NO<sub>x</sub> και SO<sub>x</sub>, και τα οποία πρέπει να αφαιρεθούν προτού εισαχθεί το ρεύμα στη διαδικασία χαμηλής θερμοκρασίας, σε συνδυασμό με την ενεργοβόρα ψύξη χαμηλής θερμοκρασίας, τείνουν να καταστήσουν την απόσταξη λιγότερο οικονομική από άλλες διαδρομές. Η εφαρμογή της απόσταξης χαμηλής θερμοκρασίας, επομένως, αναμένεται να περιοριστεί σε πηγές τροφοδοσίας υψηλής πίεσης και υψηλών συγκεντρώσεων CO<sub>2</sub> (π.χ. αέριο φρεατίων).

Οι μεμβράνες διαχωρισμού αερίου είναι πολλών διαφορετικών τύπων, αν και η αποτελεσματικότητα μόνο μερικών εξ αυτών στον διαχωρισμό και την κατακράτηση του CO<sub>2</sub> έχει καταδειχθεί, η δυνατότητά τους αντιμετωπίζεται γενικά ως πολύ καλή. Οι μηχανισμοί διάχυσης στις μεμβράνες είναι πολυάριθμοι και διαφέρουν πολύ ανάλογα με τον χρησιμοποιούμενο τύπο μεμβράνης. Γενικά, ο διαχωρισμός του αερίου επιτυγχάνεται μέσω κάποιας αλληλεπίδρασης μεταξύ της μεμβράνης και του αερίου που διαχωρίζεται. Παραδείγματος χάριν, οι πολυμερείς μεμβράνες μεταφέρουν τα αέρια με έναν μηχανισμό διάλυσης – διάχυσης (δηλ, το αέριο διαλύεται στη μεμβράνη και μεταφέρεται μέσω αυτής με μια διαδικασία διάχυσης). Οι πολυμερείς μεμβράνες αν και αποτελεσματικές, επιτυγχάνουν τυπικά χαμηλή ροή μεταφοράς αερίου και υπόκεινται στην υποβάθμιση. Εντούτοις, οι πολυμερείς μεμβράνες είναι ανέξοδες και μπορούν να επιτύχουν υψηλές αναλογίες περιοχής μεμβράνης και όγκου ενότητας.

Το προϊόν της λειτουργίας του διαχωρισμού και της κατακράτησης θα είναι το CO<sub>2</sub>. Εντούτοις, οι ιδιότητες του CO<sub>2</sub>, όπως η συγκέντρωση, οι ακαθαρσίες, η πίεση και η θερμοκρασία θα διαφέρουν για τους διαφορετικούς συνδυασμούς πηγών και μεθόδων διαχωρισμού και κατακράτησης που υιοθετούνται. Οι διαδικασίες απορρόφησης, για παράδειγμα, μπορούν να χειριστούν ώστε να παράγουν ρεύματα CO<sub>2</sub> πολύ υψηλής καθαρότητας, τα οποία θα βρίσκονται γενικά στις πιέσεις της πηγής. Για εκείνες τις μεθόδους που θα εναποθέσουν τον άνθρακα ως CO<sub>2</sub>, εννοείται ότι το CO<sub>2</sub> θα επεξεργαστεί ώστε να αποκτήσει την καθαρότητα και την πίεση που απαιτούνται για τη μεταφορά και την εναπόθεση. Το παραγόμενο CO<sub>2</sub> μπορεί να έχει καθαρότητα από 90 έως 99%, σε θερμοκρασίες που φτάνουν έως μερικούς εκατοντάδες °C και σε πιέσεις από ατμοσφαιρικές έως και περισσότερο από 3,5 MPa. Διαφορετι-



κές μορφές άνθρακα (εκτός από το CO<sub>2</sub>) μπορεί επίσης να απαιτηθούν για μερικές από τις μεθόδους εναπόθεσης.

## B) Ωκεάνια Εναπόθεση

Υπάρχουν κυρίως δύο μέθοδοι ωκεάνιας εναπόθεσης:

- Η άμεση έγχυση ενός σχετικά καθαρού ρεύματος CO<sub>2</sub>, το οποίο έχει παραχθεί, για παράδειγμα, σε εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας ή από μια βιομηχανική διαδικασία.
- Η ενίσχυση της φυσική διάλυσης άνθρακα στον ωκεανό από την ατμόσφαιρα, για παράδειγμα, μέσω «λίπανσης σιδήρου» (iron fertilization).

Η άμεση έγχυση του CO<sub>2</sub> στον ωκεανό απαιτεί, αρχίζοντας από ένα αρκετά συγκεντρωμένο ρεύμα CO<sub>2</sub>, τη μεταφορά του στις θέσεις του ωκεανού όπου θα εναποτεθεί αποτελεσματικά για εκατοντάδες χρόνια, εάν όχι περισσότερα. Για να επιτευχθεί αυτό, το CO<sub>2</sub> θα είναι πιθανότατα εγχυμένο ως υγρό, σε βάθη μεγαλύτερα από 1.000 m (Herzog 1998). Ένας περιορισμός αυτής της προσέγγισης είναι ότι είναι καταλληλότερη για μεγάλες, στάσιμες πηγές του CO<sub>2</sub>, με πρόσβαση στις περιοχές εναπόθεσης μεγάλου βάθους, οι οποίες αποτελούν περίπου το 15-20% των ανθρωπογενών εκπομπών του CO<sub>2</sub>. Η αποτελεσματικότητα της άμεσης έγχυσης εξαρτάται από το ακριβές βάθος και το σημείο έγχυσης. Γενικά, όσο βαθύτερα εγχέεται το CO<sub>2</sub>, τόσο αποτελεσματικότερα εναποτίθεται, άλλα η βαθύτερη έγχυση απαιτεί περισσότερο προηγμένες τεχνολογίες και μπορεί να αυξήσει το κόστος. Η καλύτερη στρατηγική είναι να ελευθερωθεί το CO<sub>2</sub> σε βάθη μεταξύ 1,000 και 2,000 m. Η πιο σημαντική περιβαλλοντική επίδραση της άμεσης έγχυσης αναμένεται να σχετίζεται με τη μείωση του pH, ως αποτέλεσμα της αντίδρασης του CO<sub>2</sub> με το νερό της θάλασσας.

Η λίπανση των ωκεανών με συστατικά όπως ο σίδηρος και άλλα, όπως το άζωτο και ο φώσφορος, είναι μια στρατηγική που ενισχύει τη μείωση ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> και έτσι επιταχύνει τη βιολογική αντλία. Η μικρής κλίμακας ωκεάνια λίπανση είναι εφικτή και από μηχανικής και από οικονομικής άποψης. Η τεχνολογία για τη λίπανση επιφανειακών υδάτων είναι αρκετά απλή και περιλαμβάνει την απελευθέρωση θρεπτικών συστατικών, όπως ο σίδηρος, ο φώσφορος ή το άζωτο, από πλατφόρμες όπως βάρκες ή αεροπλάνα. Η αποτελεσματικότητα της ωκεάνιας λίπανσης, ως στρατηγική εναπόθεσης του CO<sub>2</sub>, είναι πολύ ευαίσθητη σχετικά με το ποσοστό του ωκεανού που αναμειγνύεται μεταξύ των επιφανειακών στρωμάτων και των βαθύτερων. Αν άνθρακας στα βαθύτερα στρώματα μεταφερθεί στην επιφάνεια μέσω της ανάμιξης, τότε θα μπορούσε να επιστρέψει στην ατμόσφαιρα μέσω εξαέρωσης, αντί να θαφτεί στα ιζήματα. Η πιο σημαντική περιβαλλοντική επίδραση αναμένεται να σχετίζεται με τον ευτροφισμό που προκαλεί μείωση οξυγόνου, η οποία θα μπορούσε να σκοτώσει είδη που το έχουν ανάγκη.

Γενικά, επειδή ο ωκεανός είναι ήδη μια τεράστια αποθήκη άνθρακα του πλανήτη, δεν είναι παράλογο να θεωρηθεί η άμεση έγχυση CO<sub>2</sub> ή η ενίσχυση της σταθεροποίησης του CO<sub>2</sub> μέσω λίπανσης, ως πιθανές επιλογές για εναπόθεση άνθρακα. Υπάρχουν τεχνολογίες για άμεση και σε βάθος έγχυση CO<sub>2</sub> και για λίπανση των ωκεανών με θρεπτικές ουσίες. Εντούτοις, υπάρχει έλλειψη ικανοποιητικής γνώσης των συνεπειών της ωκεάνιας εναπόθεσης στη βιόσφαιρα και στον φυσικό βιογεωχημικό κύκλο. Τέτοια γνώση είναι σημαντική για την υπεύθυνη χρήση των ωκεανών, ως επιλογή για εναπόθεση άνθρακα. Μακροχρόνιες μελέτες χρειάζονται, για την εκτίμηση του αντίκτυπου της ωκεάνιας εναπόθεσης στα οικοσυστήματα και στον παγκόσμιο

βιογεωχημικό κύκλο (Σχήμα 4.6). Ο ωκεανός παίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της βιόσφαιρας, έτσι οποιαδήποτε αλλαγή στη λειτουργία του ωκεάνιου οικοσυστήματος πρέπει να αντιμετωπιστεί με ιδιαίτερη προσοχή.

Η κοινή γνώμη για την ωκεάνια εναπόθεση, αναμφισβήτητα, θα είναι ένα ζήτημα για την ευρύτερη αποδοχή της. Πολύς κόσμος, καθώς επίσης και οικολογικές οργανώσεις θεωρούν ότι οι ωκεανοί πρέπει να παραμείνουν όσο το δυνατό περισσότερο άθικτοι. Η βιομηχανία αλιείας είναι επίσης επιφυλακτική, λόγω των πιθανών οικονομικών συνεπειών που θα προέλθουν από τις δραστηριότητες της ωκεάνιας εναπόθεσης. Τα νομικά ζητήματα θα είναι σίγουρα περίπλοκα. Με εξαίρεση τις παράκτιες οικονομικές ζώνες, ο ωκεανός είναι διεθνής περιοχή και προστατεύεται από διεθνείς συνθήκες και συμφωνίες, όπως το Marpol και το Law of the Sea. Τελικά, και η επιστημονική κατανόηση και η δημόσια αποδοχή θα καθορίσουν αν η ωκεάνια εναπόθεση του άνθρακα είναι μια βιώσιμη επιλογή.

### Γ) Εναπόθεση Άνθρακα σε Χερσαία Οικοσυστήματα

Αύξηση της αποθήκευσης του άνθρακα στη βλάστηση και στο έδαφος θα μπορούσε να προσφέρει σημαντικά συνοδευτικά οφέλη: βελτιωμένο έδαφος και ποιότητα νερού, μειωμένη θρεπτική απώλεια, μειωμένη διάβρωση εδάφους, καλύτεροι βιότοποι άγριας φύσης και περισσότερα προϊόντα βιομάζας. Η αποκατάσταση βιότοπων για την εναπόθεση μεγαλύτερων ποσοτήτων άνθρακα θα βοηθήσει επίσης στη διατήρηση της άγριας φύσης. Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο θα αυξηθούν τα αποθέματα άνθρακα στα γεωργικά εδάφη είναι κρίσιμη για την αύξηση της παραγωγής τροφίμων. Τέλος, η δημιουργία συνθηκών για μεγαλύτερη φυτική παραγωγή και η συσσώρευση του εδαφικού άνθρακα για αύξηση της εναπόθεσης άνθρακα, θα έχουν το δευτερεύον όφελος της αποκατάστασης των υποβαθμισμένων παγκόσμιων οικοσυστημάτων.

Οι αυξήσεις στην εναπόθεση του εδαφολογικού άνθρακα από μόνες τους, μπορούν να προσφέρουν σημαντικά οφέλη, καθυστερώντας την ανάγκη για περισσότερο σύνθετες τεχνικές λύσεις. Οι Edmonds et al (1996, 1997) εκτίμησαν ότι, μόνο για τον άνθρακα γεωργικών εδαφών, θα χρειαζόταν χρόνος 35 ετών (ενδεχομένως σώζοντας τουλάχιστον €83,3 εκατομμύρια), πριν οι σημαντικές ρυθμίσεις στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα παραγωγής να πετύχουν τον στόχο των 550 ppmv ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub>. Κατά συνέπεια, μέχρι το επόμενο τέταρτο του αιώνα, άλλες μέθοδοι διαχείρισης του άνθρακα θα μπορούσαν να αξιολογηθούν και να εφαρμοστούν.

Το σύστημα, για την εναπόθεση άνθρακα, έχει τρεις στόχους (σχήμα 5.3.): αύξηση του ποσού του άνθρακα στα υπόγεια συστήματα (έδαφος ή ίζημα), αύξηση του άνθρακα στην υπέργεια βιομάζα, και/ή διαχείριση του εδάφους με έμφαση στην εναπόθεση άνθρακα. Μια απλή παρουσίαση του τρόπου με τον οποίο ποσοτικοποιείται η πιθανή εναπόθεση άνθρακα (PCS) είναι :

$$PCS = \hat{a} (a_i AGC_i + b_i BGC_i) + c_i LA_i \quad (1)$$

Όπου:

$a_i$  = η πιθανή αύξηση του υπέργειου άνθρακα στο  $i^{th}$  οικοσύστημα

$b_i$  = η πιθανή αύξηση του υπόγειου άνθρακα στο  $i^{th}$  οικοσύστημα

$c_i$  = η πιθανή αλλαγή του εδάφους, λόγω της διαχείρισης για εναπόθεση άνθρακα στο  $i^{th}$  οικοσύστημα

$AGC_i$  = υπέργειος άνθρακας, βιομάζα του  $i^{th}$  οικοσυστήματος στο συγκεκριμένο έτος

BGC<sub>i</sub> = υπόγειος άνθρακας, ρίζες βιομάζας και εδαφολογικός άνθρακας (οργανικός και ανόργανος) του *i*<sup>th</sup> οικοσυστήματος στο συγκεκριμένο έτος

LA = περιοχή εδάφους του κάθε οικοσυστήματος στο συγκεκριμένο έτος.

Υπάρχουν τέσσερις τρόπους αύξησης του *υπόγειου άνθρακα*:

- Αύξηση του βάθους του εδαφολογικού άνθρακα
- Αύξηση της πυκνότητας του άνθρακα (οργανικού ή/και ανόργανου) στο έδαφος.
- Αύξηση της μάζας ή/και του βάθους των ριζών
- Μείωση του ποσοστού αποσύνθεσης του εδαφολογικού άνθρακα

Υπάρχουν επίσης τέσσερις τρόποι να αυξηθεί η εναπόθεση άνθρακα στο *υπέργειο σύστημα* (σχήμα 5.3.):

- Αύξηση του ποσοστού συσσώρευσης της υπέργειας βιομάζας
- Αύξηση της πυκνότητας της συνολικής βιομάζας ανά περιοχή ή/και την πυκνότητα του άνθρακα στην υπέργεια βιομάζα
- Αύξηση της μακροζωίας της βιομάζας του άνθρακα (μείωση του ποσοστού αποσύνθεσης)
- Αύξηση της ευεργετικής χρήσης της βιομάζας άνθρακα στα μακρόβια προϊόντα

Οι στρατηγικές οι οποίες πρέπει να ακολουθηθούν για την επίτευξη των στόχων του συστήματος εναπόθεσης είναι:

- *Εδαφολογικές βελτιώσεις*, για να υποστηριχθεί πρώτιστα ο στόχος για αύξηση του υπόγειου άνθρακα.
- *Διαχείριση καλλιεργειών και εδάφους*, για να επηρεαστούν οι στόχοι της υπέργειας βιομάζας, του υπόγειου άνθρακα και της βελτιστοποίησης της περιοχής εδάφους.
- *Επιλογή ειδών, βιοτεχνολογία και μοριακή γενετική*, που θα βοηθούσαν άμεσα και τα υπέργεια και τα υπόγεια συστήματα και έμμεσα τη χρήση εδάφους, για παράδειγμα, αύξηση γεωργικής παραγωγής στο ελεύθερο έδαφος για την εναπόθεση άνθρακα.
- *Η δυναμική οικοσυστήματος* εστίασε σε όλη τη συμπεριφορά του οικοσυστήματος, για να βελτιστοποιήσει την απόδοση της εναπόθεσης άνθρακα, καθώς επίσης και να αξιολογήσει την πιθανή αρνητική ανατροφοδότηση σε άλλα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του οικοσυστήματος.

Οι διάφορες στρατηγικές για τις *εδαφολογικές βελτιώσεις* περιλαμβάνουν:

- Άρδευση και διατήρηση ύδατος
- Λίπανση και θρεπτική απόκτηση
- Ενισχυμένη παραγωγή και διατήρηση του εδαφολογικού άνθρακα
- Έλεγχος διάβρωσης
- Εδαφολογικές τροποποιήσεις ή δημιουργία νέου εδάφους

Οι διάφορες στρατηγικές για τη *διαχείριση των καλλιεργειών και του εδάφους* περιλαμβάνουν:

- Αναδάσωση του καλλιεργημένου εδάφους και των λιβαδιών.
- Διαχείριση οργώματος, αμειψισπορά, διαχείριση υπολειμμάτων.

- Δασική διαχείριση (μειώνοντας την κοπή των δέντρων, βελτιώνοντας τον έλεγχο των αποθεμάτων και εφαρμόζοντας πυροπροστασία).
- Σειριακή διαχείριση εδάφους.
- Βελτιωμένα συστήματα καλλιέργειας και ακριβής καλλιέργεια, επικεντρωμένη στην εδαφολογική διαχείριση.
- Διαχείριση ελέγχου παρασίτων και ασθενειών και ελέγχου εισβολής ειδών.
- Μείωση αστικοποίησης και μετατροπής των δασικών εκτάσεων για γεωργική χρήση.

Οι βασικές στρατηγικές για την επιλογή ειδών, τη βιοτεχνολογία και τη μοριακή γενετική περιλαμβάνουν:

- Αύξηση μόνιμης βιομάζας.
- Μεγιστοποίηση της περιεκτικότητας σε «lignin», για μακροζωία της ξυλώδους βιομάζας.
- Αύξηση ανθεκτικότητας στα παράσιτα και στις ασθένειες.
- Βελτίωση της απόδοσης της φωτοσύνθεσης.
- Επέκταση της περιόδου ανάπτυξης των φυτών.
- Αύξηση της αναλογίας βλαστός : ρίζα.
- Αύξηση της κατανομής άνθρακα στα υπόγεια συστατικά των λιγότερο αποσυντεθημένων ενώσεων άνθρακα (π.χ., lignin, phenolics)
- Σχεδιασμός νέων φυτών με βελτιωμένη αποδοτικότητα ύδατος, θρεπτική χρήση, ανοχή άλατος και ανοχή pH

Η στρατηγική – δυναμική οικοσυστήματος – βασίζεται σε τέσσερις κύριες ανάγκες:

- Εξισορρόπηση της αποσύνθεσης της βιομάζας και του εδαφολογικού οργανικού υλικού, ως πηγή απώλειας άνθρακα στην ατμόσφαιρα, ενάντια στην αποσύνθεση ως πηγή θρεπτικών ουσιών, ουσιαστικών για την ανάπτυξη των φυτών.
- Εξισορρόπηση της βέλτιστης φυτικής παραγωγής, με την επιθυμία για μακροπρόθεσμη και προβλέψιμη / σταθερή παραγωγικότητα.
- Σχεδιασμός στρατηγικών οι οποίες είναι συμβατές με άλλες ανθρώπινες απαιτήσεις για το έδαφος και τους φυσικούς πόρους.
- Καθορισμός της πιθανής ανατροφοδότησης από ενέργειες εναπόθεσης άνθρακα.

## Δ) Εναπόθεση Του CO<sub>2</sub> Σε Γεωλογικούς Σχηματισμούς

Τρεις βασικοί τύποι γεωλογικών σχηματισμών έχουν τη δυνατότητα για εναπόθεση μεγάλων ποσοτήτων CO<sub>2</sub>:

- Ενεργοί και εξαντλημένοι ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου
- Υδάτινοι σχηματισμοί μεγάλου βάθους, συμπεριλαμβανομένων και των αλατούχων σχηματισμών
- Κοιτάσματα άνθρακα μεγάλου βάθους και «coal – bed» σχηματισμοί μεθανίου

Εκτιμήσεις της ικανότητας της εναπόθεσης για καθέναν από αυτούς τους τύπους γεωλογικών μετασχηματισμών, έχουν δοθεί στον πίνακα 6.1.

Οι ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι στόχοι με πολλές δυνατότητες για εναπόθεση του CO<sub>2</sub>, για πολλούς λόγους. Πρώτον, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο βρίσκονται μέσα σε δομικές ή στρατογραφικές παγίδες και το πετρέλαιο και φυσικό αέριο που είχε αρχικά συσσωρευτεί σε αυτές τις παγίδες, δε δραπέτευσε μετέπειτα. Κατά συνέπεια, αυτοί οι ταμιευτήρες πρέπει επίσης να περιέχουν CO<sub>2</sub>, εφόσον δε δημιουργήθηκαν διαβάσεις που οδηγούν στην επιφάνεια ή σε παρακείμενους σχηματισμούς, από τις μεγάλες πιέσεις του ταμιευτήρα ή από διαρροές γύρω από τα φρεάτια. Δεύτερον, η γεωλογική δομή και οι φυσικές ιδιότητες των περισσότερων πεδίων πετρελαίου και φυσικού αερίου έχουν μελετηθεί εκτενώς. Ενώ πρόσθετη μελέτη μπορεί να χρειαστεί – ιδιαίτερα της ακεραιότητας και της έκτασης του πετρώματος - , τα διαθέσιμα στοιχεία θα χαμηλώσουν το κόστος εκπλήρωσης των προγραμμάτων εναπόθεσης του CO<sub>2</sub>. Τέλος, πολύπλοκα υπολογιστικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί από τη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, για να προβλεφθεί η συμπεριφορά και η παγίδευση του CO<sub>2</sub> για EOR. Αυτά τα μοντέλα λαμβάνουν υπόψη τη ροή του πετρελαίου, του φυσικού αερίου και της άλμης σε τρεις διαστάσεις, τη συμπεριφορά των φάσεων, τη διαλυτότητα του CO<sub>2</sub> στο πετρέλαιο και την άλμη και τη μεγάλη ποικιλία των ιδιοτήτων των ταμιευτήρων. Αυτές οι διαδικασίες είναι υπεύθυνες για την υδροδυναμική παγίδευση και την παγίδευση διαλυτότητας του CO<sub>2</sub>. Η πρώτη και περισσότερο βιώσιμη επιλογή για εναπόθεση του CO<sub>2</sub> είναι η στήριξη στην τεράστια εμπειρία της βιομηχανίας για την ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου και φυσικού αερίου (EOR). Η EOR έχει το πλεονέκτημα της εναπόθεσης του CO<sub>2</sub>, ενώ παράλληλα αυξάνει την παραγωγή των ενεργών πετρελαιοπηγών.

Οι υδάτινοι σχηματισμοί είναι οι πιο κοινές δεξαμενές ρευστών στο υπέδαφος και τέτοιοι σχηματισμοί μεγάλου όγκου είναι διαθέσιμοι σχεδόν οπουδήποτε. Για την εναπόθεση, σχηματισμοί μεγάλου βάθους (>200 ft) που δε βρίσκονται υπό χρήση είναι οι λογικότεροι στόχοι. Τα κύρια ζητήματα για τη διάθεση του CO<sub>2</sub> στα υδροφόρα στρώματα, αφορούν: α) το ποσοστό διάθεσης του CO<sub>2</sub>, β) τη διαθέσιμη ικανότητα αποθήκευσης, γ) την παρουσία ενός πετρώματος χαμηλής διαπερατότητας και πιθανή διαρροή του CO<sub>2</sub>, δ) τον προσδιορισμό και χαρακτηρισμό των κατάλληλων δομών υδροφόρων σχηματισμών και πετρωμάτων, ε) την αβεβαιότητα, λόγω της ελλιπούς γνώσης των συνθηκών και διαδικασιών στο υπέδαφος και στ) την αντίσταση στη διάβρωση των υλικών που χρησιμοποιούνται στα φρεάτια διάχυσης και τις σχετικές εγκαταστάσεις. Δύο βασικά ζητήματα διακρίνουν την εναπόθεση του CO<sub>2</sub> στα υδροφόρα στρώματα, από την εναπόθεση στους ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου. Πρώτον, οι ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου εμφανίζονται επειδή υπάρχει μια δομική ή στρατογραφική παγίδα. Αυτή η ίδια παγίδα είναι πιθανό να διατηρήσει το CO<sub>2</sub>. Η αναγνώριση τέτοιων αποτελεσματικών παγίδων μπορεί να είναι δυσκολότερη στους υδάτινους σχηματισμούς και μπορεί να απαιτεί νέες προσεγγίσεις για την καθιέρωση της ακεραιότητας και της έκτασης ενός πετρώματος. Δεύτερον, η έγχυση του CO<sub>2</sub> σε έναν υδάτινο σχηματισμό είναι απίθανο να συνοδευτεί από την αφαίρεση ύδατος από τον σχηματισμό. (Στην περίπτωση EOR, το πετρέλαιο αποσύρεται ταυτόχρονα, ενώ το CO<sub>2</sub> εγχέεται). Επομένως, η έγχυση θα οδηγήσει σε αύξηση της πίεσης του σχηματισμού, σε μια μεγάλη περιοχή. Το εάν ή μέχρι ποιο σημείο η πίεση μεγάλης κλίμακας θα έχει επιπτώσεις στην ακεραιότητα του πετρώματος, ή θα προκαλέσει παραμόρφωση της επιφάνειας του εδάφους και σεισμογένεση, πρέπει να κατανοηθεί καλύτερα, ώστε να σχεδιαστεί μια ασφαλής και αποτελεσματική εναπόθεση. Ένα τελικό ζήτημα σχετικά με την εναπόθεση στους υδάτινους σχηματισμούς είναι το αποδεκτό ποσοστό διαρροής από τον σχηματισμό στα υπερκείμενα στρώματα. Η διαρροή του CO<sub>2</sub> μπορεί να μην είναι επικίνδυνη για την ασφάλεια και μπορεί, σε μερικές περιπτώσεις, να είναι επιθυμητή, εάν αυξάνει τη δυνατότητα για ενισχυμέ-

νη διαλυτότητα ή ορυκτή παγίδευση. Η αξιολόγηση των ποσοστών αποδεκτής διαρροής πρέπει να είναι μέρος μιας μακροπρόθεσμης στρατηγικής για την εναπόθεση του CO<sub>2</sub> σε υδάτινους σχηματισμούς.

Οι *σχηματισμοί άνθρακα* παρέχουν μια ευκαιρία να διαχωριστεί το CO<sub>2</sub> και ταυτόχρονα να αυξηθεί η παραγωγή του φυσικού αερίου. Η παραγωγή μεθανίου από τα κοιτάσματα άνθρακα μεγάλου βάθους, μπορεί να ενισχυθεί με την έγχυση CO<sub>2</sub> στους σχηματισμούς άνθρακα, όπου η προσρόφηση του CO<sub>2</sub> προκαλεί την εκρόφηση του μεθανίου. Αυτή η διαδικασία έχει τη δυνατότητα να εναποθέσει μεγάλους όγκους του CO<sub>2</sub>, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνει την αποδοτικότητα και το κέρδος των εμπορικών διαδικασιών του φυσικού αερίου. Αντίθετα από τους ταμειυτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου, το μεθάνιο στα κοιτάσματα γαιάνθρακα διατηρείται μέσω προσρόφησης, παρά μέσω παγίδευσης κάτω από μια στεγανή υπερκείμενη παγίδα. Επομένως, η φύση των υπερκείμενων και παρακείμενων στρωμάτων γίνεται ένα σημαντικό ζήτημα για τη διατήρηση του CO<sub>2</sub> μέσα στους ταμειυτήρες «coal – bed» έως ότου προσροφηθεί και τη διατήρηση του μετατοπισμένου μεθανίου μέχρι να μπορεί να αποσυρθεί.

## **Ε) Προηγμένες Βιολογικές Διαδικασίες**

Οι ερευνητικές προσπάθειες που οδηγούν σε συνεχή εναπόθεση γιγατόνων άνθρακα από την ατμόσφαιρα ετησίως, είναι πρωταρχικές επιλογές εναπόθεσης.

Η μεγάλης κλίμακας ευκαιρίες βιολογικής εναπόθεσης θα απαιτήσουν σημαντικό χρόνο και πόρους, ώστε να επιτευχθεί τεχνολογική εξέλιξη σε περίπου 25 χρόνια (σχήμα 7.4.). Οι βραχυπρόθεσμες μέθοδοι (πριν το 2005) έχουν χαμηλό τεχνικό ρίσκο και αρχικά θα έχουν περιορισμένα αποτελέσματα εναπόθεσης άνθρακα, αλλά με το χρόνο μπορούν να γίνουν όλο και περισσότερο μεγάλες δεξαμενές. Οι μεσοπρόθεσμες μέθοδοι χρησιμοποιούν περισσότερο προηγμένες στρατηγικές που περιλαμβάνουν σημαντικά υψηλότερο τεχνικό κίνδυνο, αλλά μπορούν να επιτρέψουν υψηλότερη ικανότητα εναπόθεσης άνθρακα, με λιγότερους πόρους. Οι μακροπρόθεσμες μέθοδοι χαρακτηρίζονται ως υψηλού κινδύνου, αλλά μπορούν να προσφέρουν αξιοπρόσεκτη δυνατότητα για εναπόθεση άνθρακα.

Ο πίνακας 7.1. ταξινομεί τις στρατηγικές των προηγμένων βιολογικών διαδικασιών, από την άποψη της τεχνικής δυνατότητας πραγματοποίησης, των χρονικών ορίων και των πιθανών αποτελεσμάτων. Η ταξινόμηση πιθανώς θα διέφερε εάν άλλοι σχετικοί παράγοντες, όπως τα οικονομικά, η δημόσια πολιτική και οι κίνδυνοι (υγεία και περιβάλλον), εξετάζονταν επίσης. Μερικές ταξινομήσεις είναι υποκειμενικές, λόγω του λάθος καθορισμένου πεδίου μερικών μεθόδων. Για παράδειγμα, η γενετική μηχανική της συγκομιδής των φυτών για την αντίσταση στην ασθένεια και τα παράσιτα, ασκείται σήμερα εμπορικά και ως εκ τούτου αυτό το επίπεδο εφαρμοσμένης μηχανικής κρίνεται να είναι ιδιαίτερα εφικτό. Από την άλλη μεριά, ο γενετικός χειρισμός των χαρακτηριστικών ανάπτυξης και διάρκειας των κωνοφόρων, ο οποίος στοχεύεται, είναι πιθανό να αποδειχθεί δύσκολος και γι' αυτό κρίνεται λιγότερο εφικτός.

## **ΣΤ) Προηγμένες Χημικές Προσεγγίσεις**

Αξίζει να αναφερθούν τρεις προσεγγίσεις για εναπόθεση άνθρακα, χρησιμοποιώντας προηγμένες χημικές τεχνολογίες:

1. Ανάπτυξη ασφαλών υποπροϊόντων για διάθεση. Αυτή η οδός μπορεί να προσφέρει τη δυνατότητα να εναποτεθούν μεγάλες ποσότητες (γίγατόνοι) ανθρωπογενούς άνθρακα.
2. Παραγωγή εμπορικών προϊόντων. Αυτό το θέμα πιθανώς αντιπροσωπεύει μια μικρότερη δυνατότητα (εκατομμύρια τόνων), αλλά μπορεί να οδηγήσει σε παράλληλα οφέλη που αφορούν την πρόληψη της ρύπανσης.
3. Διεύθυνση των μελετών που μπορούν να δώσουν τη δυνατότητα στις υπό ανάπτυξη τεχνολογίες άλλων περιοχών εστίασης, να εκπληρώσουν τον στόχο τους.

Με βάση την εμπειρία στις προηγμένες χημικές έννοιες και αναγνωρίζοντας τις ανάγκες που προσδιορίζονται σε άλλες περιοχές εστίασης, προτεραιότητα πρέπει να δοθεί στην κατάκτηση της χημικής γνώσης που απαιτείται για:

- Απορρόφηση / προσρόφηση του CO<sub>2</sub> σε «seams» άνθρακα
- Δημιουργία ανθρακικού άλατος μαγνησίου, όπως φαίνεται στην αντίδραση ανθρακικού άλατος στον πίνακα 8.1. Το προϊόν είναι αδρανές και ασφαλές
- Κατανόηση και εκμετάλλευση των CO<sub>2</sub> «clathrates», υλικά σε μορφή πάγου τα οποία παράγονται από μίγματα ύδατος και CO<sub>2</sub>, κάτω από κατάλληλες συνθήκες.
- Διαμόρφωση και διάθεση των υδάτινων διαλυμάτων των ανθρακικών αλάτων και των ιόντων διανθρακικών αλάτων (τα οποία είναι και τα πιο σημαντικά), στον ωκεανό ή σε άλλους κατάλληλους υδάτινους σχηματισμούς
- Ανάπτυξη εμπορικών προϊόντων τα οποία παράγονται από CO<sub>2</sub>, CO (από προηγμένα προγράμματα ενέργειας) ή άνθρακα που δημιουργείται μέσω απανθράκωσης

Ο πίνακας 8.2. παρέχει περισσότερες πληροφορίες για αυτές τις προσεγγίσεις.

## **Z) Σύγκριση των Μεθόδων Εναπόθεσης του CO<sub>2</sub>**

Στο κεφάλαιο 9 παρουσιάστηκαν οι πίνακες 9.2.-9.8. οι οποίοι περιέχουν τα πλεονεκτήματα, τις πιθανές προκλήσεις, τη δυνατότητα εφαρμογής, την τεχνική ωριμότητα, τη διαθεσιμότητα στοιχείων, τη βιομηχανική αποδοχή και τη συμβατότητα με συστήματα παραγωγής ενέργειας, για τις κύριες μεθόδους εναπόθεσης του CO<sub>2</sub>.

### Τεχνολογία Γεωλογικής Αποθήκευσης

Στον πίνακα 9.9. συγκρίνονται οι επιλογές γεωλογικής αποθήκευσης βάσει της σχετικής χωρητικότητας, του σχετικού κόστους, της ακεραιότητας αποθήκευσης και της τεχνικής εφικτότητας.

Οι εξαντλημένοι ταμιευτήρες πετρελαίου και αερίου εμφανίζονται να είναι η πιο ελπιδοφόρος επιλογή γεωλογικής αποθήκευσης, τουλάχιστον βραχυπρόθεσμα (Herzog et al. 1993). Έχουν ήδη δείξει τη δυνατότητά τους να περιέχουν συμπιεσμένα ρευστά για μεγάλες χρονικές περιόδους. Εντούτοις, οι περισσότεροι δε βρίσκονται κοντά στις αρχικές πηγές παραγωγής του CO<sub>2</sub>, έτσι ένα νέο δίκτυο σωληνώσεων CO<sub>2</sub> θα χρειαζόταν για τη σύνδεση των σταθμών παραγωγής ενέργειας με τις κατάλληλες τοποθεσίες αποθήκευσης. Κυρίως εξαιτίας των διαφορών στην απαραίτητη σωλήνωση, οι δαπάνες τις αποθήκευσης θα είναι πολύ συγκεκριμένες ανά τοποθεσία.



Οι ενεργοί ταμειυτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν. Για παράδειγμα, το CO<sub>2</sub> χρησιμοποιείται συχνά στην ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου (OTA 1978, Lake 1989). Η ποσότητα του CO<sub>2</sub> η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου και σχετικές εφαρμογές είναι μικρή σε σχέση με τις συνολικές εκπομπές του CO<sub>2</sub> και το CO<sub>2</sub> μπορεί αυτήν την περίοδο να παρασχεθεί από φυσικές πηγές με περίπου το 1/3 του κόστους που φαίνεται να έχει το CO<sub>2</sub> αν κατακρατηθεί από εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας (Herzog et al. 1993). Ως εκ τούτου δεν υπάρχει κανένα άμεσο κίνητρο για χρήση του CO<sub>2</sub> των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας για αυτόν τον λόγο. Εν τούτοις, εάν εξεταστούν οι πιστώσεις για τις εκπομπές του CO<sub>2</sub> που αποφεύχθηκαν, η τιμή του CO<sub>2</sub> των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας μειώνεται και αυτή η επιλογή γίνεται πολύ ελκυστική. Ενώ υπάρχει η βασική τεχνολογία για ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου, πρόσθετη έρευνα απαιτείται για τροποποίηση των διαδικασιών ενισχυμένης ανάκτησης πετρελαίου για βελτιστοποίηση της αποθήκευσης CO<sub>2</sub>.

Το CO<sub>2</sub> μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να ενισχύσει την *ανάκτηση «coal - bed» μεθανίου* (Gunter et al. 1997). Χρησιμοποιώντας αυτήν την τεχνολογία, οι εγκαταλελειμμένες και αντιοικονομικές «ραφές» άνθρακα γίνονται πιθανές περιοχές αποθήκευσης. Αντίθετα από την ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου, όπου διαρροή του CO<sub>2</sub> εμφανίζεται τελικά, το CO<sub>2</sub> που εγχέεται απορροφάται στην επιφάνεια του άνθρακα και έτσι παραμένει εναποτεθειμένο.

Οι *θόλοι με άλμη και τα σπήλαια* έχουν θεωρητικά μια μεγάλη ικανότητα αποθήκευσης και έχουν χρησιμοποιηθεί για παρεμφερείς σκοπούς αποθήκευσης πετρελαίου, συμπιεσμένου αερίου και φυσικού αερίου (Tek 1989), αλλά οι σχετικές δαπάνες είναι ένα σημαντικό εμπόδιο. Χωρίς μια σημαντική ανακάλυψη, οι δαπάνες ανασκαφής των σπηλαίων είναι πολύ υψηλές για να είναι πρακτικές. Οι θόλοι με άλμη μπορούν να ανασκαφούν με λιγότερο κόστος από τη λύση των μεταλλείων. Ωστόσο, και στις δυο περιπτώσεις μεγάλες ποσότητες πετρωμάτων ή άλμης θα έπρεπε να ανασκαφούν, να διαχειριστούν και είτε να χρησιμοποιηθούν είτε να διατεθούν με τρόπο περιβαλλοντικά αποδεκτό.

Τα *υδροφόρα στρώματα μεγάλου βάθους* μπορούν να είναι η καλύτερη μακροπρόθεσμη επιλογή αποθήκευσης στο υπέδαφος. Η χωρική αντιστοιχία μεταξύ των τοποθεσιών αποθήκευσης και των πηγών του CO<sub>2</sub> είναι κάπως καλύτερη για τα υδροφόρα στρώματα μεγάλου βάθους από ότι για τους ταμειυτήρες πετρελαίου και αερίου και για αυτό δεν υπάρχει ανάγκη για μεγάλο δίκτυο σωληνώσεων. Εντούτοις, δεν υπάρχει μεγάλη εμπειρία, ούτε πολλές πληροφορίες για αυτούς τους σχηματισμούς, γεγονός το οποίο οδηγεί σε τεχνική αβεβαιότητα. Τα ζητήματα της ασφάλειας που συνδέονται με τη διαρροή είναι επίσης μια σημαντική ανησυχία (Holloway 1997).

Οι δαπάνες για γεωλογική αποθήκευση του CO<sub>2</sub> μπορεί να ποικίλουν από €0,8 – 6,7 ανά τόνο CO<sub>2</sub> ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες. Οι δαπάνες αποθήκευσης μέσω σωληνώσεων έχουν υπολογιστεί σε €0,8 – 2,5 ανά τόνο CO<sub>2</sub> ανά 100km (Hendriks 1994). Το εύρος των δαπανών για την εναπόθεση (συμπεριλαμβανομένης της μεταφοράς) είναι €4,2 – 12,5 ανά τόνο CO<sub>2</sub>.

### Τεχνολογία Ωκεάνιας Αποθήκευσης

Ο ωκεανός αντιπροσωπεύει τη μεγαλύτερη πιθανή δεξαμενή για το ανθρωπογενές CO<sub>2</sub> (πλαίσιο 9.1.). Στον πίνακα 9.10. συγκρίνονται οι επιλογές ωκεάνιας απο-

θήκευσης βάσει της ανάπτυξης που απαιτείται, του κόστους, των περιβαλλοντικών επιδράσεων και της διαρροής στην ατμόσφαιρα.

Η αποδοτικότητα της εναπόθεσης εξαρτάται από το πόσο καιρό θα παραμείνει το CO<sub>2</sub> στον ωκεανό. Όπως φαίνεται, μέσω της χρήσης παγκόσμιων προτύπων κυκλοφορίας, η αποδοτικότητα της εναπόθεσης είναι σαφώς ανάλογη με την περιοχή (Bacastow and Dewey 1996). Εάν το CO<sub>2</sub> που εγχέεται ενσωματωθεί στη γενική ωκεάνια κυκλοφορία των υδάτων μεγάλου βάθους, αναμένεται χρόνος παραμονής περίπου 1000 ετών.

Οι δαπάνες και η εφικτότητα είναι παράγοντες της απόστασης και του βάθους μεταξύ της κατακράτησης και της έγχυσης του CO<sub>2</sub>. Οι μικρότερες αποστάσεις ευνοούν τη μεταφορά με σωληνώσεις, με συμπιεσμένο CO<sub>2</sub> ως υπερκρίσιμο (πυκνή φάση) υγρό, ενώ οι μεγαλύτερες αποστάσεις ευνοούν τη μεταφορά με φορτηγά πλοία με το CO<sub>2</sub> ως «κατεψυγμένο» υγρό (Golomb 1997). Στην περίπτωση του ξηρού πάγου, σημαντικές πρόσθετες δαπάνες θα υπάρχουν για τη στερεοποίηση του CO<sub>2</sub>. Η τεχνολογία συμβατικών σωληνώσεων δεν έχει εφαρμοστεί σε βάθη πέρα των 1000 μέτρων, όπως θα απαιτούσε μια βαθιά λίμνη, αν και οι λόγοι μάλλον οφείλονται στις τρέχουσες ανάγκες της βιομηχανίας πετρελαίου και αερίου και όχι σε οποιονδήποτε περιορισμό της ωκεάνιας μηχανικής. Ελάχιστη εμπειρία υπάρχει για την τεχνολογία των σωλήνων που ρυμουλκούνται από κινούμενα σκάφη, από την έρευνα OTEC και το αρχικό σχέδιο του προγράμματος στην Ιαπωνία (Ozaki et al. 1995, Ozaki 1997). Το πυκνό ρεύμα βαρύτητας θα απαιτούσε μια κατάλληλη τοποθεσία με κατάλληλη κλίση και σχεδιασμό μιας συσκευής ανάμιξης για τη συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> (Adams et al 1995, Kajishima et al 1995), προκειμένου να παραχθεί μια ικανοποιητική πλευστότητα. Επομένως, η έγχυση ως όγκος σταγονιδίων από έναν σωλήνα στο βυθό είναι η μόνη επιλογή που είναι εφικτή με την υπάρχουσα αποδεδειγμένη τεχνολογία, αλλά ακόμη και αυτή η επιλογή έχει αβεβαιότητες οι οποίες συνδέονται με τη φυσική / χημική συμπεριφορά του CO<sub>2</sub> καθώς αναμιγνύεται με το θαλασσίνο νερό. Οι δαπάνες για την ωκεάνια εναπόθεση του CO<sub>2</sub> (συμπεριλαμβανομένης της μεταφοράς) είναι κατ' εκτίμηση τόσο χαμηλές όσο €0,8 - 5 ανά τόνο CO<sub>2</sub> (Freund and Ormerod 1997), αλλά βάσει των Herzog et al (1995) μια τιμή των €4,2 - 12,5 ανά τόνο CO<sub>2</sub> είναι μια πιο ρεαλιστική εκτίμηση.

Οι περιβαλλοντικές επιδράσεις μπορεί να είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που καθορίζει την αποδοχή της ωκεάνιας αποθήκευσης, δεδομένου ότι η στρατηγική βασίζεται στο γεγονός ότι οι επιδράσεις στον ωκεανό θα είναι σημαντικά λιγότερες από τις επιδράσεις της συνεχούς εκπομπής στην ατμόσφαιρα που αποφεύχθηκαν. Διάφορες αναφορές έχουν προσδιορίσει τις πιθανές επιδράσεις (Magnesen and Wahl 1993, Kollek 1993, Auerbach et al. 1996), με σημαντικότερη αυτή της μείωσης του pH ως αποτέλεσμα της αντίδρασης του CO<sub>2</sub> με το θαλασσίνο νερό. Το ανθρακικό άλας που διαλύεται στο θαλασσίνο νερό και στα ιζήματα σε μικρά βάθη θα παράσχει μια προφύλαξη, αλλά ανάλογα με τη μέθοδο απελευθέρωσης, το pH αναμένεται να ποικίλει από τόσο χαμηλά όσο 4 πολύ κοντά στο σημείο έγχυσης, μέχρι την περιβαλλοντική του τιμή των 8. Επιδράσεις θα εμφανίζονταν κυρίως στους θαλάσσιους οργανισμούς που δεν κολυμπάνε (π.χ. ζωοπλαγκτόν και βακτηρίδια) και κατοικούν σε βάθη περίπου 1000 μέτρων ή μεγαλύτερα και το μέγεθός τους θα εξαρτηθεί και από το επίπεδο αλλαγής του pH και από τη διάρκεια της έκθεσης (Auerbach 1996). Εντούτοις, τα διαθέσιμα στοιχεία δείχνουν ότι η θνησιμότητα που συνδέεται με την αλλαγή του pH μπορεί να αποφευχθεί πλήρως εάν η έγχυση σχεδιαστεί κατάλληλα, ώστε να διασκορπίζει το CO<sub>2</sub> καθώς διαλύεται (Caulfield 1996).

## Η) Γενικές Δαπάνες

Οι τιμές του άνθρακα πρέπει να φτάσουν τα €83,3 / τόνο άνθρακα ώστε να αρχίσουν οι τεχνολογίες κατακράτησης και αποθήκευσης του άνθρακα να υιοθετούνται από τη βιομηχανία σε σημαντική κλίμακα (> 5% διείσδυση στην αγορά). Οι τεχνολογίες κατακράτησης και αποθήκευσης του άνθρακα μπορούν να υιοθετηθούν με τιμές άνθρακα πολύ λιγότερο από €83,3 / τόνο άνθρακα. Αυτοί οι στόχοι της ευκαιρίας είτε θα έχουν πολύ φθηνό κόστος κατακράτησης (από πηγές που δεν παράγουν ενέργεια, όπως οι επεξεργασίες φυσικού αερίου, η παραγωγή αμμωνίας, κ.τ.λ.), είτε θα είναι σε θέση να έχουν κέρδη από τα υποπροϊόντα (π.χ., EOR). Στον πίνακα 10.1. παρουσιάζονται οι συνολικές δαπάνες των μεθόδων κατακράτησης και εναπόθεσης του CO<sub>2</sub>.

## 12. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτήν την εργασία εξετάστηκε η κατακράτηση και εναπόθεση του άνθρακα, καθώς και η σύγκριση των διάφορων μεθόδων με τις οποίες επιτυγχάνεται.

Για να χαρακτηριστεί ένα σύστημα εναπόθεσης του άνθρακα ως βιώσιμο, θα πρέπει να έχει ανταγωνιστικό κόστος, ήπιες περιβαλλοντικές επιδράσεις, να είναι ασφαλές και να αποθηκεύει τον άνθρακα για σχετικά μεγάλη χρονική διάρκεια.

Για να βελτιστοποιηθούν οι μέθοδοι εναπόθεσης του άνθρακα, θα πρέπει:

- Να κατανοηθεί καλύτερα η συμπεριφορά του CO<sub>2</sub> που εναποτίθεται, μέσω εργαστηριακών μελετών, μικρής κλίμακας πειραμάτων και μοντελοποίησης του κοντινού πεδίου.
- Να εκτελεστούν εργαστηριακά πειράματα για τη μέτρηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.
- Να βελτιωθεί το τοπικό / παγκόσμιο μοντέλο, ώστε να ποσοτικοποιηθούν τα οφέλη και να προσδιοριστούν οι κατάλληλες περιοχές για εναπόθεση.
- Να πραγματοποιηθούν πιλοτικά προγράμματα για συλλογή δεδομένων.
- Να ενσωματωθούν τα αποτελέσματα των προηγούμενων προσπαθειών σε συγκεκριμένα προγράμματα εναπόθεσης, τα οποία βελτιστοποιούν τις εναλλαγές μεταξύ κόστους, περιβαλλοντικών επιπτώσεων και αποτελεσματικότητας.
- Να εξασφαλιστεί η μακροπρόθεσμη σταθερότητα του CO<sub>2</sub> που έχει εναποτεθεί.
- Να μειωθούν οι οικονομικές και ενεργειακές απαιτήσεις για την εναπόθεση του CO<sub>2</sub>.
- Να αποδεχτεί η κοινή γνώμη την εναπόθεση του CO<sub>2</sub>.
- Να συγκεντρωθούν δεδομένα κόστους και απόδοσης από ένα ολοκληρωμένο, μεγάλης κλίμακας πρόγραμμα εναπόθεσης του CO<sub>2</sub>.
- Να αναπτυχθούν μέθοδοι για αύξηση της αποτελεσματικότητας της εναπόθεσης.
- Να αναπτυχθούν τεχνολογίες για μετρίασμό ή έλεγχο των διαρροών του CO<sub>2</sub> (όπου αυτές είναι πιθανό να προκύψουν).
- Να αναπτυχθούν κριτήρια διαλογής για την επιλογή των κατάλληλων μεθόδων σε συνεργασία με τη βιομηχανία, την επιστημονική κοινότητα, το κοινό και τις ρυθμιστικές αντιπροσωπείες.

Γενικά, οι συνέπειες της εναπόθεσης στο περιβάλλον δεν είναι πλήρως κατανοητές, ούτε άμεσα ορατές, διότι η εναπόθεση του άνθρακα βρίσκεται σε ένα πρώιμο στάδιο ανάπτυξης, χωρίς διαθέσιμα ικανοποιητικά στοιχεία. Μακροχρόνιες μελέτες και μεγάλης κλίμακας προγράμματα πρέπει να γίνουν, ώστε να αποκτηθούν τα απαραίτητα στοιχεία για την εκτίμηση του αντίκτυπου της εναπόθεσης στο περιβάλλον. Το θέμα του περιβάλλοντος είναι μείζονος σημασίας για την ευρύτερη αποδοχή της εναπόθεσης από την κοινή γνώμη και πρέπει να αντιμετωπιστεί με ιδιαίτερη προσοχή και υπευθυνότητα. Το κοινό και διάφορες οικολογικές οργανώσεις αντιμετωπίζουν αρνητικά κάθε προσπάθεια παρεμβολής ή μετατροπής των οικοσυστημάτων και ιδιαίτερα των ωκεανών. Νομικά ζητήματα πρέπει να διευθετηθούν. Εκτός από την επιστημονική εφικτότητα και αποδοτικότητα, σημαντικό παράγοντα ο οποίος θα καθορίσει τελικά τη βιωσιμότητα της εναπόθεσης αποτελεί η δημόσια αποδοχή.

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι κάθε περίπτωση εναπόθεσης είναι μοναδική και πρέπει να εξεταστεί ξεχωριστά, καθώς έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, ανάλογα με το οικοσύστημα, την απόσταση από την πηγή, τις περιβαλλοντικές ανάγκες κάθε περιοχής, τα νομικά ζητήματα, τη μέθοδο εναπόθεσης που ακολουθείται, κ.τ.λ.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy, «Carbon Sequestration, State of the Science»  
*A working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D, (1999)*
- [2] Howard Herzog & Dan Golomb, «Carbon Capture and Storage from Fossil Fuel Use», Massachusetts Institute of Technology Laboratory for Energy and the Environment, (2004)
- [3] Howard Herzog, Elizabeth Drake, Eric Adams, «CO<sub>2</sub> Capture, Reuse, and Storage Technologies for Mitigating Global Climate Change», Energy Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, (1997)
- [4] Bert R. Bock (TVA), Richard G. Rhudy (EPRI), and David E. Nichols (TVA), «Economic Evaluation of CO<sub>2</sub> Sequestration Technologies, Semi – Annual Technology Progress Report», (2001)
- [5] D.O. Hall and J.I. House «Trees and Biomass Energy: Carbon Storage and / or Fossil Fuel Substitution?», Division of Life Sciences, King's College London, Campden Hill Rd, (1994)
- [6] Joel N. Swisher, «Forestry and Biomass Energy Projects: Bottom – up Comparisons of CO<sub>2</sub> Storage and Costs», UNEP Collaborating Center, Rise National Laboratory, (1994)
- [7] Assessment by Germanwatch, «Carbon Dioxide Capture and Storage as a sequestration strategy», (2002), [www.germanwatch.org/rio/ccs04.htm](http://www.germanwatch.org/rio/ccs04.htm).
- [8] Δανάη Διακουλάκη, Αν. Καθηγήτρια ΕΜΠ, μέλος ΔΣ ΕΚΠΙΑΑ, «Περιβαλλοντικά Σήματα-Σχέδιο Έκθεσης Δεικτών Αειφορίας», Εθνικό Κέντρο Περιβάλλοντος & Αειφόρου Ανάπτυξης, Ελλάδα 2003
- [9] Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας & Δημοσίων Έργων, «Εθνικό Σχέδιο Κατανομής Δικαιωμάτων Εκπομπών για την Περίοδο 2005-2007», Δεκέμβριος 2004