

ΧΑΝΙΑ, ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2016



ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΠΡΙΝΤΑΚΗ ΙΩΑΝΝΗ

2009020048

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΒΑΦΕΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ, ΚΑΘ. ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ (Επιβλέπων)

ΣΟΥΠΙΟΣ ΠΑΝΤΕΛΗΣ, ΚΑΘ. ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ (Σχολή Εφαρμοσμένων Επιστημών - Χανιά)

Δρ. ΚΡΗΤΙΚΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, Ε.ΔΙ.Π. ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Έχει γίνει αποδεκτό σήμερα ότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες διαταράσσουν τον κύκλο του άνθρακα στον πλανήτη μας. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια των τελευταίων 250 χρόνων, η παραγωγική καύση ορυκτών καυσίμων (κάρβουνο, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τη θέρμανση, τη βιομηχανία και τις μεταφορές, έχει προκαλέσει ακατάπαυστη αύξηση της ποσότητας του CO₂ που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα. Αυτή είναι η βασική αιτία του φαινομένου του θερμοκηπίου. Διότι παγιδεύει μέρος της θερμότητας του ηλίου, προκαλώντας θέρμανση της επιφανείας της Γης. Πρέπει, λοιπόν, να ληφθούν άμεσα και ριζικά μέτρα για να μειωθεί στη σημερινή ατμόσφαιρα, η συγκέντρωση του CO₂.

Η παρούσα διπλωματική εργασία καλείται να εξετάσει τέσσερα διαφορετικά σενάρια εισαγωγής διοξειδίου του άνθρακα σε ταμειυτήρα στον Πρίνο. Η εξέταση των σεναρίων και η επεξεργασία τους γίνεται βάση της μεθόδου της σεισμικής ανάκλασης. Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Πολυτεχνείου Κρήτης Αντώνη Βαφείδη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε δίνοντας μου την ευκαιρία να δουλέψω την διπλωματική μου εργασία υπό την επίβλεψη και καθοδήγηση του, καθώς και τον Καθηγητή Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης Νικόλαο Χαραλαμπίκη για την ιδέα της διπλωματικής.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω το Δρ. Κρητικάκη Γεώργιο για την πολύτιμη βοήθεια του πάνω στην επεξεργασία και τη διόρθωση της διπλωματικής εργασίας. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή Σουπιό Παντελή για τις πολύτιμες παρατηρήσεις του πάνω στη τελική μορφή της διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση και προσομοίωση της παρακολούθησης εισαγωγής διοξειδίου του άνθρακα σε ταμειυτήρα του Πρίνου. Η μεθοδολογία αυτή προσεγγίστηκε με την χρήση δισδιάστατων (2D) συνθετικών δεδομένων σεισμικής ανάκλασης, μέσω αλγορίθμων (Matlab) που αναπτύχθηκαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Η εισαγωγή του διοξειδίου του άνθρακα στους γεωλογικούς σχηματισμούς των ταμειυτήρων έχει κυρίως, ως αποτέλεσμα τη μεταβολή των παραμέτρων της ταχύτητας των διαμήκων σεισμικών κυμάτων και της πυκνότητάς τους.

Η τομή που σχεδιάστηκε προέκυψε από στοιχεία γεωτρήσεων του Πρίνου, ενώ ο προσδιορισμός των σεισμικών ταχυτήτων και γενικότερα οι παράμετροι του μοντέλου προέκυψαν από τη βιβλιογραφία. Ο ταμειυτήρας του Πρίνου σχηματίζεται από ένα αντίκλινο σε βάθος περίπου στα 2600m και αποτελείται από τέσσερις ψαμμιτικούς ορίζοντες που υπόκεινται των αδιαπέρατων (cap rock) εβαποριτικών στρωμάτων.

Για την πειραματική διαδικασία (προσομοιώσεις) δημιουργήθηκαν τέσσερα διαφορετικά σενάρια εισαγωγής διοξειδίου του άνθρακα στα στρώματα των ψαμμιτών του εν λόγω ταμειυτήρα. Για κάθε σενάριο πραγματοποιήθηκε η δημιουργία και η επεξεργασία των συνθετικών καταγραφών της σεισμικής ανάκλασης. Ειδικότερα, τα βήματα επεξεργασίας που ακολουθήθηκαν είναι: η ταξινόμηση των καταγραφών κοινής πηγής σε καταγραφές Κοινού Ενδιάμεσου Σημείου (CMP sorting), η ανάλυση ταχυτήτων (Velocity Analysis), η διόρθωση Κανονικής Χρονικής Απόκλισης (Normal Moveout NMO), και τέλος η δημιουργία τομών σεισμικής υπέρθεσης (Stacking).

Στις τομές υπέρθεσης των τεσσάρων σεναρίων, μελετήθηκε η θέση του θυσάνου του CO₂ μέσα στα στρώματα του ταμειυτήρα του Πρίνου. Για την καλύτερη μελέτη της διαφοροποίησης των πλατών και των χρόνων άφιξης των ανακλάσεων που προέρχονται από τα στρώματα του ταμειυτήρα, εξετάστηκε το σεισμικό ίχνος των τομών υπέρθεσης στο κέντρο του μοντέλου.

Μεταξύ των σεισμικών ιχνών εντοπίστηκαν διαφορές στα πλάτη των κυμάτων και στους χρόνους άφιξης των ανακλάσεων από τις διεπιφάνειες των στρωμάτων του ταμειυτήρα. Ειδικότερα, οι ανακλάσεις από τα ψαμμιτικά στρώματα όπου εισήχθηκε CO₂ καταγράφονται σε μεγαλύτερους χρόνους σε σχέση με την αρχική κατάσταση όπου περιέχουν μόνο νερό.

Με βάση τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής, προκύπτει ότι μελετώντας τις διαφορές στα πλάτη και στους χρόνους άφιξης των ανακλώμενων σεισμικών κυμάτων είναι δυνατό να εξαχθούν συμπεράσματα για την οριζόντια και κατακόρυφη εξάπλωση του θυσάνου του CO₂ στον ταμειυτήρα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ CO ₂	5
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1.2 ΕΠΙΣΤΡΟΦΗ ΤΟΥ ΆΝΘΡΑΚΑ ΠΙΣΩ ΣΤΟ ΈΔΑΦΟΣ	6
1.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ CO ₂	7
1.4 Η ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ CCS	8
1.5 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ	9
1.6 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΕΡΓΟΥ	12
2ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΡΙΝΟΥ	15
2.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΠΡΙΝΟΥ – ΚΑΒΑΛΑΣ.....	15
2.2 ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ.....	17
2.2.1 Προ- Εβαποριτική Ακολουθία	17
2.2.2 Εβαποριτική Ακολουθία	18
2.2.3 Μετα- Εβαποριτική Ακολουθία	19
2.3 ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΤΟΥ ΠΡΙΝΟΥ	20
2.2.4 Χαρακτηριστικά των Ταμιευτήρων Πρίνου.....	24
3ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ.....	25
3.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΠΟ ΤΙΣ ΟΠΟΙΕΣ ΕΞΑΡΤΑΤΑΙ Η ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΑΙ Η ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ	25
3.2 ΤΥΠΟΙ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ.....	26
3.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	27
3.3.1 Ταξινόμηση Κοινού Ενδιάμεσου Σημείου (CMP sorting).....	28
3.3.2 Ανάλυση Ταχυτήτων (Velocity Analysis)	30
3.3.3 Διόρθωση Κανονικής Χρονικής Απόκλισης (Normal Moveout_ NMO)	32
3.3.4 Σεισμική Υπέρθεση (Stacking)	33
3.4 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ CO ₂ - ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ CO ₂ ΣΤΗΝ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ	34
3.4.1 Επίδραση του CO ₂ στην ταχύτητα και την πυκνότητα των σχηματισμών	36
4ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	38
4.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ	38
4.1.1 Περιορισμοί δημιουργίας Συνθετικών Δεδομένων	38

4.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ	39
4.3 ΣΕΝΑΡΙΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ CO ₂ ΣΤΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΤΟΥ ΠΡΙΝΟΥ	41
4.3.1 Σενάριο 1: Όλα τα στρώματα του Ταμιευτήρα 100% Κορεσμένα σε Νερό	41
4.3.2 Σενάριο 2: Πλήρωση όλου του πρώτου στρώματος (A1) του ταμιευτήρα με 50% CO ₂	45
4.3.3 Σενάριο 3: Πλήρωση τμήματος του ταμιευτήρα A1 με 50% CO ₂	49
4.3.4 Σενάριο 4: Πλήρωση τμήματος όλων των στρωμάτων του ταμιευτήρα με 50% CO ₂	54
5° ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ CO₂

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Έχει γίνει αποδεκτό σήμερα ότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες διαταράσσουν τον κύκλο του άνθρακα στον πλανήτη μας. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια των τελευταίων 250 χρόνων, η παραγωγική καύση ορυκτών καυσίμων (κάρβουνο, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τη θέρμανση, τη βιομηχανία και τις μεταφορές, έχει προκαλέσει ακατάπαυστη αύξηση της ποσότητας του CO₂ που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα (Σχήμα 1.1) ^[1].



Σχήμα 1.1: Οι παγκόσμιες εκπομπές CO₂ που συνδέονται με τις ανθρώπινες δραστηριότητες φθάνουν τους 30 δις. Τόνους (Gt) ανά έτος, που αντιστοιχούν σε 8,1 Gt άνθρακα: 6,5 Gt από καύση ορυκτών καυσίμων και 1,6 Gt από αποδόσωση (αποψίλωση των δασών) και γεωργικές πρακτικές ^[1].

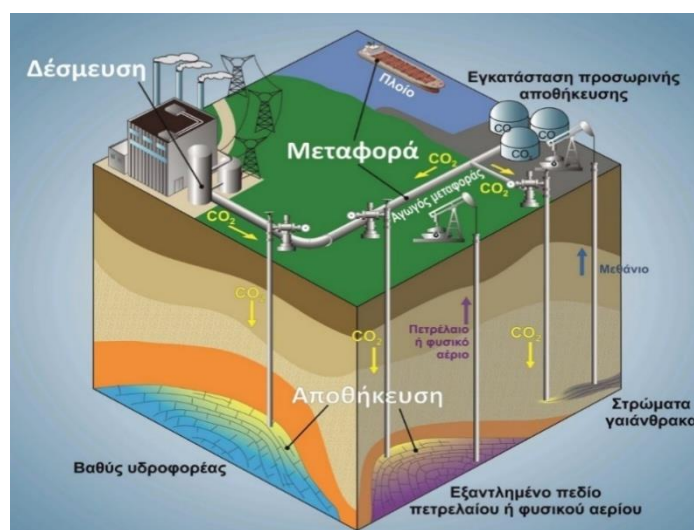
Περίπου το ήμισυ της πλεονάζουσας ανθρωπογενούς ποσότητας απορροφάται εκ νέου από τη βλάστηση και διαλύεται στους ωκεανούς, με αποτέλεσμα τη δημιουργία όξινων φαινομένων, που έχουν αρνητικές επιπτώσεις στο φυτικό και ζωικό βασίλειο. Το υπόλοιπο συγκεντρώνεται στην ατμόσφαιρα και συμβάλλει στην αλλαγή του κλίματος της Γης. Η αύξηση του CO₂ είναι η βασική αιτία του φαινομένου του θερμοκηπίου, διότι παγιδεύει μέρος της θερμότητας του ηλίου, προκαλώντας θέρμανση της επιφανείας της Γης. Πρέπει, λοιπόν, να ληφθούν άμεσα και ριζικά μέτρα για να μειωθεί στη σημερινή ατμόσφαιρα, η συγκέντρωση του CO₂.

1.2 ΕΠΙΣΤΡΟΦΗ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ΠΙΣΩ ΣΤΟ ΈΔΑΦΟΣ

Η επιστροφή του άνθρακα πίσω στο έδαφος συνίσταται στη δημιουργία ενός κλειστού «κύκλου» στο σύστημα παραγωγής ενέργειας, δια του οποίου ο άνθρακας που εξορύσσεται αρχικά από το έδαφος υπό μορφή αερίου, πετρελαίου και κάρβουνου (γαιάνθρακα) θα επιστρέφει πάλι, υπό την μορφή CO₂, στο υπέδαφος. Έχει ενδιαφέρον το γεγονός ότι η αποθήκευση του στο υπέδαφος δεν αποτελεί ανθρώπινη ανακάλυψη, αλλά είναι ένα εξ' ολοκλήρου φυσικό, διαδεδομένο φαινόμενο, που εκδηλώνεται με την παρουσία ταμιευτήρων CO₂, οι οποίοι υφίστανται εδώ και χιλιάδες χρόνια, στο εσωτερικό της Γης. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η σειρά οκτώ φυσικών ταμιευτήρων CO₂ στη νοτιοανατολική Γαλλία που ανακαλύφθηκε κατά τη διάρκεια ερευνών πετρελαίου το 1960 ^[1].

Αυτές και πολλές άλλες φυσικές τοποθεσίες σε ολόκληρο τον κόσμο αποδεικνύουν ότι οι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι ικανοί να αποθηκεύσουν CO₂ με αποτελεσματικό και ασφαλή τρόπο για μεγάλες χρονικές περιόδους.

Η Δέσμευση και Αποθήκευση του CO₂ (CO₂ Capture and Storage, CCS) θα μπορούσε να παίξει καθοριστικό ρόλο και να συμβάλλει στη μείωση του κατά 33% μέχρι το 2050. Η τεχνολογία CCS περιλαμβάνει τη δέσμευση του CO₂ σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που λειτουργούν με κάρβουνο ή φυσικό αέριο και σε βιομηχανικές μονάδες (χαλυβουργεία, τσιμεντοβιομηχανίες, διυλιστήρια κλπ.), τη μεταφορά του με αγωγό ή με πλοίο σε ένα συγκεκριμένο χώρο αποθήκευσης και την έγχυσή του μέσω γεώτρησης σε έναν κατάλληλο γεωλογικό σχηματισμό για μακροχρόνια αποθήκευση (Σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2: Σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, το CO₂ δεσμεύεται με τον διαχωρισμό του από άλλα αέρια. Στη συνέχεια υπόκειται σε συμπίεση και μεταφέρεται με αγωγό ή πλοίο στη θέση γεωλογικής

απόθεσής του: μεγάλου βάθους αλμυρούς υδροφορείς, εξαντλημένα πεδία πετρελαίου και φυσικού αερίου, μη-εξορύξιμα στρώματα γαιάνθρακα (κάρβουνου) [2].

1.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ CO₂

Γενικότερα, οι δύο κύριες επιλογές που θεωρούνται καταλληλότερες για μεγάλης κλίμακας αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα, είναι:

1. τα εξαντλημένα πεδία φυσικού αερίου και πετρελαίου, για τα οποία υπάρχει πλήθος πληροφοριών και μεγάλος όγκος γνώσης εξαιτίας της εκμετάλλευσής τους για την εξόρυξη υδρογονανθράκων.
2. οι μεγάλου βάθους αλμυροί υδροφορείς, που περιέχουν νερό, το οποίο είναι ακατάλληλο για πόση και μάλιστα είναι ακόμη αλμυρότερο και από το θαλασσινό νερό.

Άλλες επιλογές, όπως τα στρώματα γαιάνθρακα και τα βασालτικά πετρώματα, που ακόμη υπόκεινται σε έρευνα, μπορούν να παράσχουν περαιτέρω δυνατότητες αποθήκευσης στο μέλλον.

Το διοξείδιο του άνθρακα εγχύεται μέσω γεωτρήσεων σε υποκείμενα βαθιά φιλοξενούντα πετρώματα με πόρους, μεταξύ των κόκκων ή των διακλάσεων, αντικαθιστώντας ή/και συμπιέζοντας έτσι το ρευστό που ήδη υπάρχει σ' αυτούς τους πόρους, όπως για παράδειγμα το φυσικό αέριο, το νερό ή το πετρέλαιο. Φιλοξενούνται πετρώματα, που έχουν μεγάλο πορώδες και διαπερατότητα, αποτελούν κατάλληλους σχηματισμούς αποθήκευσης (ταμιευτήρες). Αυτά συνήθως απαντώνται σε ιζηματογενείς λεκάνες και προέρχονται από την απόθεση ιζημάτων στο γεωλογικό παρελθόν. Πάνω από τους ταμιευτήρες, απαιτείται η παρουσία λεπτόκοκκων αδιαπέρατων ιζημάτων μέσα σ' αυτές τις ίδιες λεκάνες, τα οποία σχηματίζουν εμπόδια (φράγματα) μεταξύ των περατών σχηματισμών αποθήκευσης και της επιφάνειας. Οι φυσικοί ταμιευτήρες πετρελαίου, φυσικού αερίου, ακόμη και καθαρού διοξειδίου του άνθρακα, αποδεικνύουν την ικανότητά τους να συγκρατούν ρευστά για εκατομμύρια χρόνια.

Οι δυνητικοί ταμιευτήρες αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα πρέπει να εκπληρώνουν πολλά κριτήρια, εκ των οποίων τα πιο ουσιώδη είναι:

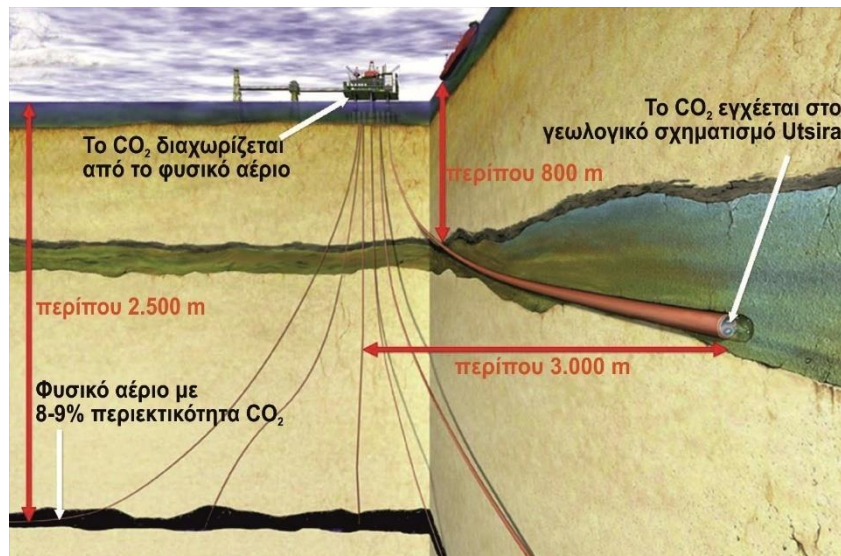
- επαρκές πορώδες, διαπερατότητα και αποθηκευτική ικανότητα
- παρουσία υπερκείμενου αδιαπέρατου πετρώματος
- παρουσία «δομών παγίδευσης»
- βάθος μεγαλύτερο των 800 μέτρων (βάθος υγροποίησης του CO₂)
- απουσία πόσιμου νερού στον ταμιευτήρα αποθήκευσης

1.4 Η ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ CCS

Ο πρώτος στον κόσμο πιλοτικός σταθμός ηλεκτρικής ενέργειας, που καίει ορυκτά καύσιμα (λιγνίτη) χωρίς να εκπέμπει διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) στην ατμόσφαιρα, εγκαταστάθηκε στη Γερμανία το 2009. Η τεράστια εγκατάσταση (100 φορές μεγαλύτερη από τη συμβατική) έξω από την κωμόπολη Spremberg (Σπρέμπεργκ) της πρώην Ανατολικής Γερμανίας είναι ο πρώτος θερμοηλεκτρικός σταθμός με δυνατότητα Δέσμευσης και Αποθήκευσης Διοξειδίου του Άνθρακα (τεχνολογία CCS, Carbon Capture and Storage), αποτελώντας μέρος ενός μεγαλύτερου προγράμματος πιλοτικών σταθμών από την ΕΕ. Το σύστημα δεσμεύει το διοξείδιο (περίπου $10\text{t CO}_2/\text{h}$ κάθε ώρα), καθώς και τα λοιπά αέρια, τα οποία παράγονται από την καύση του λιγνίτη και τα συμπιέζει μέχρι να υγροποιηθούν. Το συμπιεσμένο αέριο μεταφέρεται με βυτιοφόρα στη βόρεια Γερμανία, όπου διοχετεύεται με εισπίεση μέσα σε μια εξαντλημένη πηγή φυσικού αερίου (υπεδαφικός ταμιευτήρας) για μόνιμη αποθήκευση. Ακολουθεί συνεχής παρακολούθηση (monitoring) του αποθηκευμένου υλικού [1].

Το πρώτο βιομηχανικής κλίμακας εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής με χρήση της τεχνολογίας CCS εγκαταστάθηκε το 2014 στο Estevan της πολιτείας Saskatchewan του Καναδά, περίπου 16km από τα σύνορα Καναδά/ΗΠΑ (Βόρεια Ντακότα). Πρόκειται για ανακατασκευή ήδη υφιστάμενης μονάδας ηλεκτροπαραγωγής, ηλικίας 46 ετών, κι όχι για εξ αρχής κατασκευή νέου εργοστασίου. Το κατακρατούμενο διοξείδιο διατίθεται στην εταιρεία Cenovus Energy, που διαχειρίζεται κοιτάσματα πετρελαίου σε απόσταση 50 με 60km , για διοχέτευση στο υπέδαφος προς αύξηση της ανάκτησης πετρελαίου. Μέρος του διοξειδίου αποθηκεύεται σε ένα κοντινό αλατούχο ψαμμιτικό ταμιευτήρα, σε βάθος $3,4\text{km}$ [1].

Από τη δεκαετία του 1990 έχουν εκτελεστεί μεγάλα ερευνητικά προγράμματα Δέσμευσης και Αποθήκευσης Διοξειδίου του Άνθρακα (CCS) σε Ευρώπη, Ηνωμένες Πολιτείες, Καναδά, Αυστραλία και Ιαπωνία. Έχει ήδη αποκτηθεί πολλή γνώση από τα πρώτα παγκόσμια μεγάλης κλίμακας έργα επίδειξης, όπου CO_2 έχει εγχυθεί υπόγεια σε μεγάλο βαθμό για αρκετά χρόνια. Ειδικότερα στο Sleipner της Νορβηγίας αποθηκεύονται περίπου 1 εκατ. $\text{t}/\text{έτος}$ από το 1996 (Σχήμα 1.3). Στο Weyburn του Καναδά περίπου 1,8 εκατ. $\text{t}/\text{έτος}$ από το 2000 και στο In Salah της Αλγερίας περίπου 1 εκατ. $\text{t}/\text{έτος}$ από το 2004 [1].



Σχήμα 1.3: Κατακόρυφη τομή της θέσης Sleipner στη Νορβηγία. Το φυσικό αέριο, που εξορύσσεται από βάθος 2500m, περιέχει αρκετό ποσοστό CO₂ που πρέπει να απομακρυνθεί, ώστε να υπάρχει συμμόρφωση με τα εμπορικά πρότυπα. Αντί της απόρριψης του στην ατμόσφαιρα το δεσμευμένο CO₂ εγχέεται σε βάθος περίπου 1000m μέσα στον αμμόδη υδροφορέα Utsira ^[1]

Εκτός από την τεχνική ανάπτυξη, έχουν καταρτισθεί και νομοθετικά, κανονιστικά, οικονομικά και πολιτικά πλαίσια και έχει αξιολογηθεί η κοινωνική αντίληψη και υποστήριξη. Στην Ευρώπη, ο στόχος ήταν η ανάληψη και εκτέλεση 12 επιδεικτικών έργων μεγάλης κλίμακας στο χρονικό διάστημα μέχρι το 2015, ώστε να καταστεί δυνατή η ευρεία εμπορική ανάπτυξη μέχρι το 2020. Γι' αυτόν τον σκοπό, εκδόθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή τον Ιανουάριο του 2008 το «Πακέτο δράσης για το κλίμα και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας», το οποίο προτείνει μια Οδηγία για τη Γεωλογική αποθήκευση του CO₂ και άλλα μέτρα για την προώθηση της ανάπτυξης και ασφαλούς χρήσης της CCS.

1.5 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

Όλες οι θέσεις αποθήκευσης CO₂ θα πρέπει να παρακολουθούνται για λειτουργικούς, περιβαλλοντικούς, κοινωνικούς, οικονομικούς και το πιο σημαντικό, για λόγους ασφάλειας.

Οι λόγοι για την παρακολούθηση των θέσεων αποθήκευσης είναι πάρα πολλοί, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται και οι ακόλουθοι:

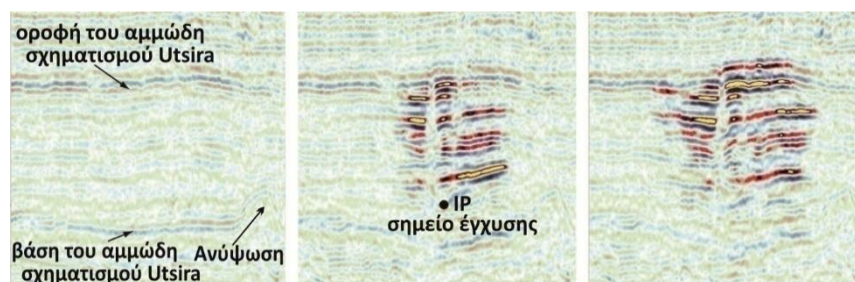
1. *Λειτουργικοί:* έλεγχος και βελτιστοποίηση της διαδικασίας έγχυσης.
2. *Ασφάλειας και περιβαλλοντικοί:* ελαχιστοποίηση ή αποτροπή οποιασδήποτε επίπτωσης στους ανθρώπους, στη άγρια φύση και τα οικοσυστήματα που βρίσκονται κοντά σε μια θέση αποθήκευσης και διασφάλιση του μετριασμού της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής

3. *Κοινωνικοί*: παροχή στο κοινό των αναγκαίων πληροφοριών για την κατανόηση της ασφάλειας της θέσης αποθήκευσης και βοήθεια για την απόκτηση της δημόσιας εμπιστοσύνης.
4. *Οικονομικοί*: οικοδόμηση της εμπιστοσύνης της αγοράς στην τεχνολογία CCS και επαλήθευση των αποθηκευμένων όγκων CO₂, έτσι ώστε αυτοί να πιστωθούν ως εκπομπές που αποφεύγονται σε μελλοντικές φάσεις του Σχεδίου Εμπορίας Εκπομπών της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Η παρακολούθηση μπορεί να εστιασθεί σε ποικίλους στόχους και διαδικασίες σε διαφορετικά τμήματα της θέσης, όπως:

1. Απεικόνιση του θυσάνου* ανίχνευση του CO₂, καθώς αυτό μεταναστεύει από το σημείο έγχυσης. Η διαδικασία αυτή παρέχει βασικά δεδομένα για τον έλεγχο ακρίβειας των μοντέλων που προβλέπουν την μελλοντική κατανομή του CO₂ στη θέση αποθήκευσης. Υπάρχουν διαθέσιμες πολλές ώριμες τεχνικές, κυρίως οι επαναλαμβανόμενες σεισμικές έρευνες, που έχουν εφαρμοσθεί με επιτυχία σε διάφορα επιδεικτικά και πιλοτικά έργα (Σχήμα 1.4).
2. Ο έλεγχος της ακεραιότητας του πετρώματος - καλύμματος είναι απαραίτητος για να αξιολογηθεί εάν το CO₂ είναι απομονωμένο μέσα στον ταμιευτήρα αποθήκευσης και να καταστεί δυνατή η έγκαιρη προειδοποίηση οποιασδήποτε απροσδόκητης μετανάστευσής του CO₂ προς την επιφάνεια. Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικό κατά τη διάρκεια της φάσης της έγχυσης ενός έργου, όταν οι πιέσεις του ταμιευτήρα είναι σημαντικά αλλά προσωρινά αυξημένες.

Το 1996 πριν την έγχυση 2,35 MtCO₂(1999) 4.36 MtCO₂ (2001)



Σχήμα 1.4: Σεισμική απεικόνιση για την παρακολούθηση του θυσάνου του CO₂ στο πιλοτικό έργο στο **Sleipner** πριν από την έγχυση (που ξεκίνησε το 1996) και μετά από 3 με 5 χρόνια αντίστοιχα ^[1].

* θύσανος CO₂: χωρική κατανομή του υπερκρίσιμου CO₂ μέσα στις ενότητες των πετρωμάτων.

3. *Η ακεραιότητα της γεώτρησης.* Πρόκειται για ένα σημαντικό θέμα, καθώς οι βαθιές γεωτρήσεις θα μπορούσαν δυνητικά να παράσχουν μια άμεση δίοδο για μετανάστευση του CO₂ στην επιφάνεια. Οι γεωτρήσεις έγχυσης CO₂, καθώς και οποιεσδήποτε γεωτρήσεις, πρέπει να παρακολουθούνται με προσοχή κατά τη διάρκεια της φάσης έγχυσης και μετά, προκειμένου να αποτραπεί μια ξαφνική διαφυγή του CO₂.
4. *Η παρακολούθηση της μετανάστευσης στα υπερκείμενα πετρώματα.* Εάν η παρακολούθηση στον ταμιευτήρα ή γύρω από το πέτρωμα - κάλυμμα δείχνει μια απροσδόκητη μετανάστευση, τότε η παρακολούθηση των υπερκειμένων θα είναι απαραίτητη. Πολλές από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην απεικόνιση του θυσάνου ή την παρακολούθηση της ακεραιότητας του πετρώματος - καλύμματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσα στα υπερκείμενα.
5. *Παρακολούθηση της διαρροή στην επιφάνεια και ατμοσφαιρική ανίχνευση και μέτρηση.* Προκειμένου να διασφαλισθεί ότι το CO₂ που έχει εγχυθεί δεν έχει μεταναστεύσει στην επιφάνεια, υπάρχει διαθέσιμη μια σειρά γεωχημικών και βιομηχανικών τεχνικών καθώς και τεχνικών τηλεπισκόπησης, για να εντοπίζονται διαρροές και να παρακολουθείται η κατανομή του CO₂ στο έδαφος και η διασπορά του στην ατμόσφαιρα ή το θαλάσσιο περιβάλλον
6. *Η παρακολούθηση της ποσότητας αποθηκευμένου CO₂ για κανονιστικούς και οικονομικούς σκοπούς.* Αν και η ποσότητα του εγχέομένου CO₂ μπορεί εύκολα να μετρηθεί στην κεφαλή της γεώτρησης, η ποσοτικοποίηση στον ταμιευτήρα αποτελεί τεχνικά μια μεγάλη πρόκληση. Εάν συμβεί διαρροή κοντά στην επιφάνεια, τότε οι ποσότητες που απελευθερώνονται θα πρέπει να ποσοτικοποιηθούν για λογιστικούς σκοπούς μέσα στις εθνικές απογραφές των αερίων του θερμοκηπίου και στα μελλοντικά σχήματα επαλήθευσης εκπομπών αερίου θερμοκηπίου (ETS) της Ε.Ε
7. *Η παρακολούθηση των εδαφικών μετακινήσεων και της μικροσεισμικότητας**.* Η αυξημένη πίεση του ταμιευτήρα λόγω της έγχυσης CO₂ θα μπορούσε, σε ειδικές περιπτώσεις, να αυξήσει την πιθανότητα μικροσεισμικότητας και εδαφικών μετακινήσεων μικρής κλίμακας. Υπάρχουν τεχνικές μικροσεισμικής παρακολούθησης και μέθοδοι εξ' αποστάσεως (έρευνες από αεροπλάνα ή δορυφόρους), που μπορούν να μετρήσουν ακόμα και πολύ μικρή εδαφική παραμόρφωση.

** μικροσεισμικότητα: ελαφρά δόνηση ή κραδασμούς στο φλοιό της Γης, που δεν σχετίζεται με σεισμούς και μπορεί να προκληθεί από διάφορα φυσικά ή τεχνικά μέσα.

Έχει ήδη εφαρμοστεί ένα ευρύ φάσμα τεχνικών παρακολούθησης σε υπάρχοντα έργα επίδειξης και έρευνας. Οι άμεσες μετρήσεις περιλαμβάνουν την ανάλυση των ρευστών από βαθιές γεωτρήσεις ή τη μέτρηση των συγκεντρώσεων των αερίων στο έδαφος ή την ατμόσφαιρα. Οι έμμεσες μέθοδοι περιλαμβάνουν γεωφυσικές διασκοπήσεις και παρακολούθηση μεταβολών της πίεσης σε γεωτρήσεις μεταβολών του pH στο υπόγειο νερό.

Κατά το σχεδιασμό της στρατηγικής παρακολούθησης, πρέπει να ληφθούν πολλές αποφάσεις που εξαρτώνται:

A) από τις ειδικές γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες που εμφανίζονται σε κάθε θέση ξεχωριστά, όπως η γεωμετρία και το βάθος του ταμιευτήρα, η αναμενόμενη εξάπλωση του *θυσάνου* του CO₂, οι πιθανές δίοδοι διαρροής, η γεωλογία των υπερκειμένων, ο χρόνος και ρυθμός ροής της έγχυσης καθώς και

B) από τα επιφανειακά χαρακτηριστικά, όπως η τοπογραφία, η πυκνότητα του πληθυσμού, οι υποδομές και τα οικοσυστήματα.

1.6 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΕΡΓΟΥ

Προκειμένου να υπάρξει ασφάλεια και η μέγιστη αποδοτικότητα της αποθήκευσης, πρέπει να επιβληθούν από τις ρυθμιστικές αρχές και να τηρηθούν από τους φορείς εκτέλεσης οι αναγκαίες συνθήκες για τον σχεδιασμό και τη λειτουργία του έργου.

Σύμφωνα με το IPCC^{***}, το εγχεόμενο CO₂ πρέπει να παραμείνει στο υπέδαφος για τουλάχιστον 1000 χρόνια, γεγονός που θα επέτρεπε στις συγκεντρώσεις του ατμοσφαιρικού CO₂ να σταθεροποιηθούν ή να μειώνονται μέσα από τη φυσική ανταλλαγή με τα νερά των ωκεανών, ελαχιστοποιώντας έτσι την άνοδο της θερμοκρασίας της επιφάνειας λόγω της υπερθέρμανσης του πλανήτη.

Οι σχετικοί κρίσιμοι στόχοι είναι:

- Να διασφαλιστεί η παραμονή του CO₂ στον ταμιευτήρα.
- Να διατηρηθεί η ακεραιότητα της γεώτρησης.
- Να διαφυλαχθούν οι φυσικές ιδιότητες του ταμιευτήρα (συμπεριλαμβανομένων του πορώδους, της διαπερατότητας) και της αδιαπέρατης φύσης του πετρώματος- καλύμματος.

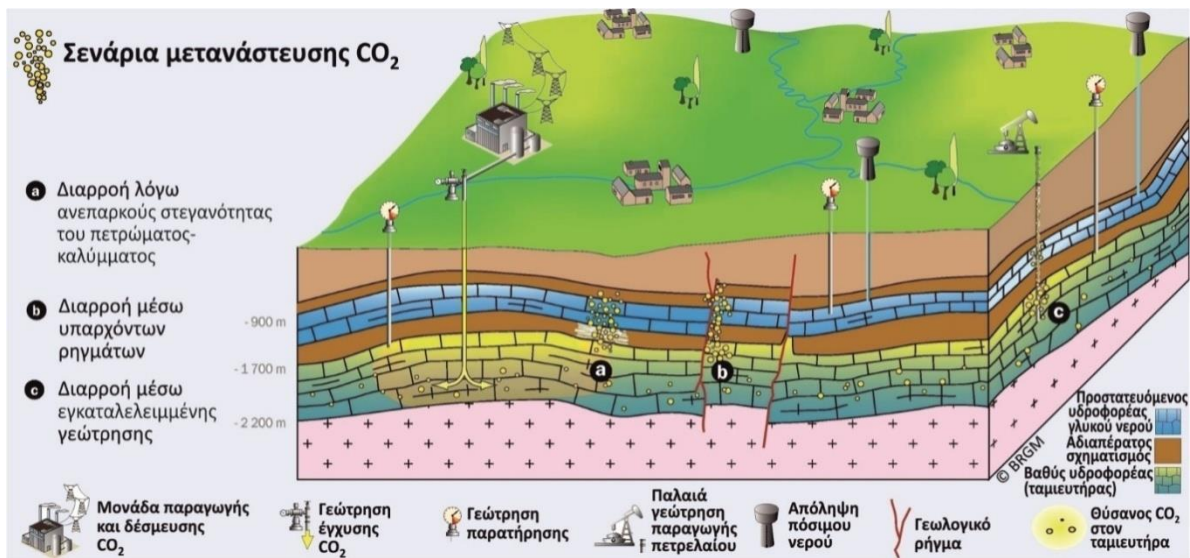
^{***} IPCC: International Panel on Climate Change- Διεθνής Ομάδα για την Κλιματική Αλλαγή. Ιδρύθηκε το 1998 από τον WMO (Παγκόσμιο Οργανισμό Μετεωρολογίας) και το UNEP (Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών για το Περιβάλλον) για την αξιολόγηση, των επιστημονικών, τεχνικών και κοινωνικοοικονομικών πληροφοριών που σχετίζονται με την κατανόηση της κλιματικής αλλαγής, τις πιθανές επιπτώσεις της και τις επιλογές για προσαρμογή και μετριασμό. Στο IPCC και τον AlGore απονεμήθηκε το Νόμπελ Ειρήνης για το 2007.

- Να ληφθεί υπόψη η σύσταση του CO₂, προσέχοντας ιδιαίτερα οποιεσδήποτε προσμίξεις που δεν αφαιρέθηκαν κατά τη διάρκεια της δέσμευσης.

Αυτό είναι σημαντικό, προκειμένου να αποφευχθεί οποιασδήποτε δυσμενής αλληλεπίδραση με τη γεώτρηση, τον ταμιευτήρα, το πέτρωμα - κάλυμμα και σε περίπτωση διαρροής, με κάθε υπερκείμενο υπόγειο νερό.

Κάθε σενάριο διαρροής πρέπει να αναλύεται από ειδικούς και, όπου είναι δυνατόν, να εφαρμόζονται αριθμητικά μοντέλα, για να αξιολογείται η πιθανότητα εμφάνισης και η ενδεχόμενη σοβαρότητα. Ως παράδειγμα, η εξέλιξη της έκτασης του θυσάνου του CO₂ πρέπει να χαρτογραφείται με προσοχή, προκειμένου να ανιχνευθεί οποιαδήποτε σύνδεση με ρηγματωμένη ζώνη. Η ευαισθησία σε μεταβολές των παραμέτρων εισόδου και οι αβεβαιότητες πρέπει να αξιολογούνται προσεκτικά στην εκτίμηση του κινδύνου. Η εκτίμηση πιθανών επιδράσεων του CO₂ στους ανθρώπους και το περιβάλλον πρέπει να αντιμετωπίζεται μέσα από μελέτες εκτίμησης επιπτώσεων, που αποτελεί τη συνήθη πρακτική κάθε διαδικασίας αδειοδότησης μιας βιομηχανικής εγκατάστασης. Σε αυτήν τη διαδικασία θα εξετάζονται και τα κανονικά σενάρια και τα σενάρια διαρροής, ώστε να εκτιμηθεί κάθε πιθανός κίνδυνος που συνδέεται με την εγκατάσταση.

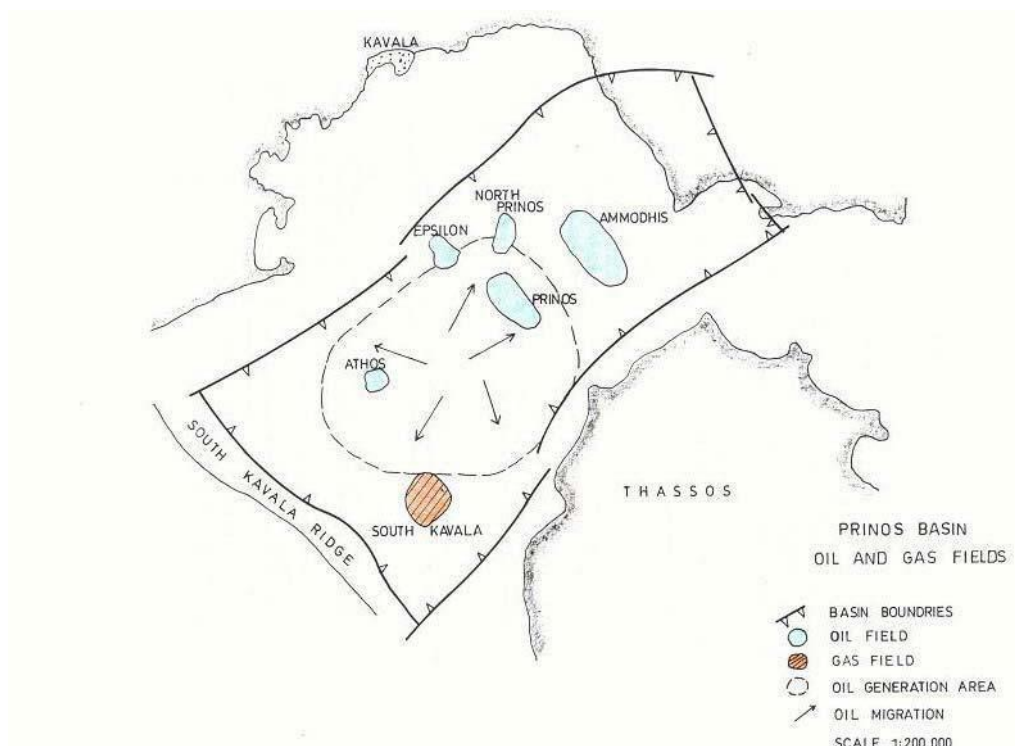
Το πρόγραμμα παρακολούθησης, από τη βραχυπρόθεσμη βάση, πρέπει να καταρτίζεται σύμφωνα με την ανάλυση της εκτίμησης κινδύνου και πρέπει να ελέγχει τις κρίσιμες παραμέτρους που καθορίζονται μέσα στα διάφορα σενάρια. Οι κύριοι στόχοι είναι η απεικόνιση της μετανάστευσης του θυσάνου του CO₂, ο έλεγχος της ακεραιότητας της γεώτρησης και του πετρώματος - καλύμματος, η ανίχνευση οποιασδήποτε διαρροής CO₂, η αξιολόγηση της ποσότητας του υπόγειου νερού και η διασφάλιση ότι καμία ποσότητα CO₂ δεν έχει φτάσει στην επιφάνεια. Το σχέδιο αποκατάστασης και μετριασμού αποτελεί το τελευταίο τμήμα της εκτίμησης ασφάλειας και αποσκοπεί στον ορισμό λεπτομερούς καταλόγου διορθωτικών ενεργειών που πρέπει να αναπτυχθούν σε περίπτωση διαρροής ή μη ομαλής συμπεριφοράς. Το σχέδιο καλύπτει την ακεραιότητα του πετρώματος - καλύμματος και την περίπτωση αστοχίας (βλάβης) της γεώτρησης, κατά τις περιόδους της έγχυσης ή/και μετά την έγχυση, ενώ εξετάζει ακραίες λύσεις αποκατάστασης, όπως της αναστρεψιμότητας (δηλ. ακύρωσης) της αποθήκευσης. Η υπάρχουσα τεχνογνωσία περιλαμβάνει τυπικές τεχνικές πετρελαίου και φυσικού αερίου, όπως ολοκλήρωση των εργασιών επισκευής ή διέγερσης υφιστάμενης παραγωγικής γεώτρησης (workover), μείωση της πίεσης έγχυσης, μερική ή πλήρη απομάκρυνση αερίου, εξαγωγή νερού για μείωση της πίεσης, εξαγωγή αβαθούς αερίου κλπ.



Σχήμα 1.5: Παράδειγμα σεναρίων πιθανών διαρροών ^[1]

2ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΡΙΝΟΥ

2.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΠΡΙΝΟΥ – ΚΑΒΑΛΑΣ



Σχήμα 2.1: Η λεκάνη Πρίνου – Καβάλας (Proedrou P. & Papakonstantinou C.M., 2004)

Η λεκάνη του Πρίνου άρχισε να αναπτύσσεται από το κατώτερο έως το μέσο Μειόκαινο, δηλαδή πριν από 5 έως 10 εκατομμύρια χρόνια, κατά μήκος των γραμμών ανάπτυξης ρηγμάτων στο νοτιότερο όριο της κρυσταλλικής μάζας της Ροδόπης. Οι πρώτες αποθέσεις ήταν ηπειρωτικές, με αφθονία ανθρακικών εμφανίσεων. Έχει μήκος 38 χλμ και πλάτος 20 χλμ, ενώ ο κύριος άξονας έχει κατεύθυνση ΒΑ – ΝΔ.

Στο πρώτο βήμα της ιζηματογένεσης, η λεκάνη βρίσκονταν σε επικοινωνία με τη θάλασσα. Η ράχη της Ν. Καβάλας ανυψώθηκε προοδευτικά και απομόνωσε τη λεκάνη, μετατρέποντας τη σε λιμνοθάλασσα κατά το Μεσσήνιο (τέλη του Μειόκενου). Ένα παρόμοιο ύβωμα στα ΝΑ της Θάσου είχε την ίδια επίδραση στη λεκάνη. Η απομόνωση οδήγησε στην απόθεση εβαποριτικών στρωμάτων (Proedrou, 1986, Proedrou and Sidiropoulos, 1992).

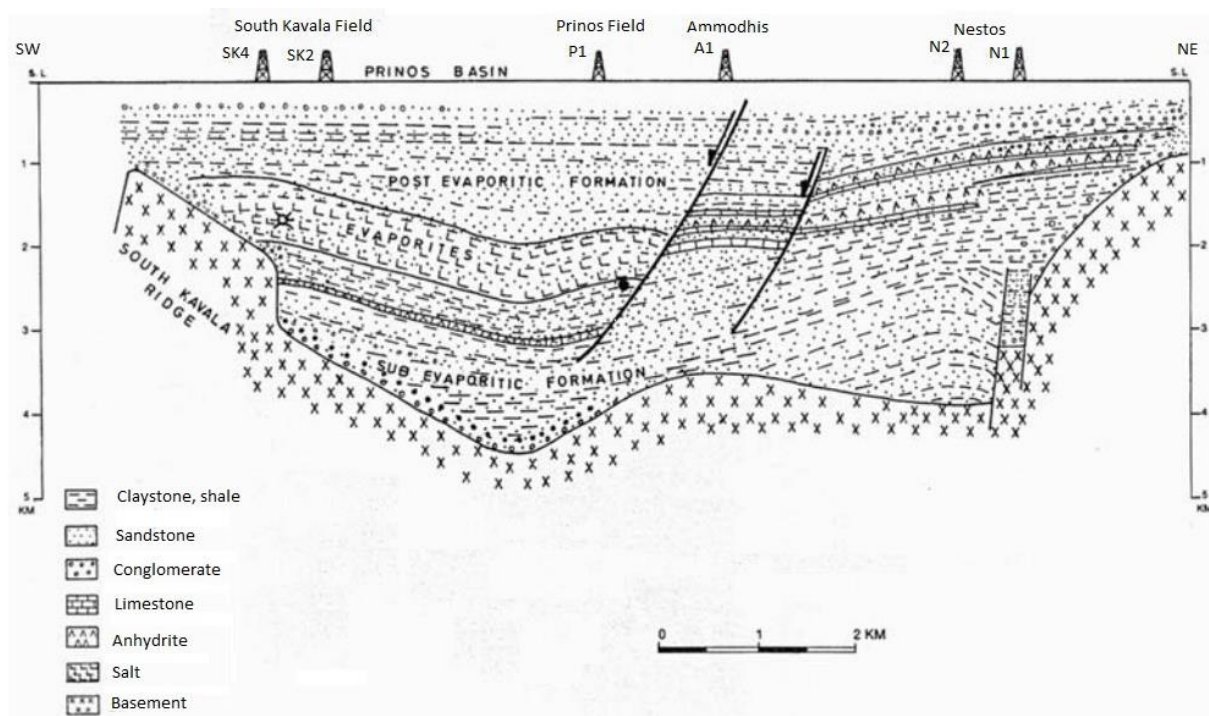
Ο τεκτονισμός της ευρύτερης περιοχής ξεκίνησε στο κατώτερο Παλαιογενές, που σημαίνει πριν από 23,03 έως 65,5 εκατομμύρια έτη. Η λεκάνη Πρίνου – Καβάλας υποδιαιρείται σε δύο μικρότερες λεκάνες, όπου η βορειότερη ονομάζεται υπολεκάνη του Νέστου, ενώ η νοτιότερη υπολεκάνη του Πρίνου, διαχωριζόμενες μεταξύ τους

από ένα τοπογραφικά υψηλό επίπεδο (Proedrou, 1986). Ρήγματα με κατεύθυνση ΒΔ – ΝΑ κατά μήκος του νοτιότερου μετώπου του υβώματος (ύψωμα) αναπτύχθηκαν ομόρροπα με την ιζηματογένεση, μετακινώντας τα ιζήματα νοτιοδυτικά στα βαθύτερα μέρη της λεκάνης του Πρίνου, πράγμα που οδήγησε σε μεγάλους σχηματισμούς ιζημάτων.

Η δομή του πεδίου του Πρίνου είναι ουσιαστικά ένα ανάστροφο αντίκλινο. Το μέσο πάχος της τουρβιδιτικής διάταξης είναι 300 μέτρα, σε κατακόρυφο βάθος 2500 μέτρων. Παρόμοια δομή αντικλίνου έχουν οι δομές του Έψιλον και της Καλλιράχης της Θάσου (Σχήμα 2.2).

Η ιζηματογενής ακολουθία της λεκάνης Πρίνου – Καβάλας είναι μια διαβαθμισμένη ακολουθία, που δημιουργήθηκε από ποτάμιες αποθέσεις σε μεγάλο βάθος, όχι μακριά από την ακτή. Η διατήρηση της οργανικής ύλης ευνοήθηκε από τη γρήγορη ιζηματογένεση και τη δημιουργία τουρβιδίτη. Δημιουργήθηκαν συνθήκες ευνοϊκές για τη διατήρηση της θαλάσσιας οργανικής ύλης, εξαιτίας του γρήγορου σχηματισμού του εβαποριτικού περιβάλλοντος κατά την περίοδο του Μεσσήνιου Συμβάντος (Georgakopoulos, 1998).

Συσώρευση υδρογονανθράκων βρίσκεται στο σύστημα των τουρβιδιτών, ενώ το αδιαπέρατο κάλυμμα της κορυφής είναι ένα αργιλικό στρώμα πάχους 10 – 14 μέτρων, που υπόκειται των εβαποριτικών στρωμάτων (Proedrou and Papakonstantinou, 2004).



Σχήμα 2.2: Απλοποιημένη ενότητα της λεκάνης του Πρίνου, παράλληλη προς τον επιμήκη άξονα. Παρατηρείστε τα ρήγματα και τον τρόπο που επιδρούν στις δομές. Τα στρώματα ταμιευτήρες του Πρίνου, βρίσκονται κάτω από την κύρια εβαποριτική σειρά, ενώ στο κοίτασμα της Ν. Καβάλας ο

ταμιευτήρας βρίσκεται εντός της εβαποριτικής ενότητας. Τα βάθη δίνονται σε χιλιόμετρα κάτω από τη στάθμη της θάλασσας (Proedrou and Sidiropoulos, 1992).

2.2 ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ

Η λεκάνη Πρίνου – Καβάλας περιέχει σειρά ιζημάτων πάχους 5800 μέτρων, που κατανέμονται ηλικιακά από το κατώτερο Μειόκαινο έως το Πλειστόκαινο (Σχήμα 2.3). Αυτά τα ιζήματα μπορούν να χωριστούν σε 3 κατηγορίες (Μιχελάκης, 2010).

2.2.1 Προ- Εβαποριτική Ακολουθία

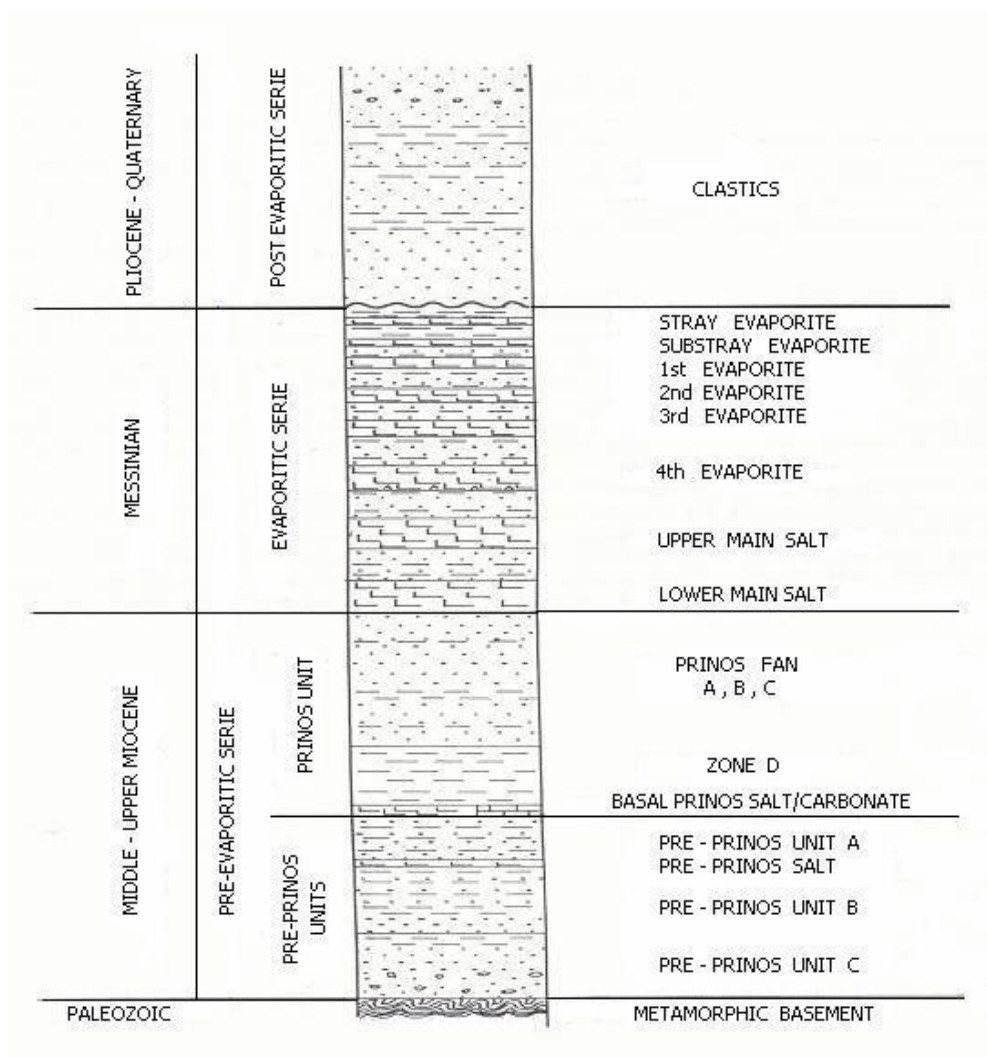
Τα πρώτα ιζήματα αποτέθηκαν πάνω από το μεταμορφωμένο υπόστρωμα (γνεύσιοι και μάρμαρα), που ήταν ηπειρωτικό. Στρώματα αλάτων και ανυδρίτη, εναλλασσόμενα με ψαμμίτες και αργιλικούς σχίστες θαλάσσιας προέλευσης αποτέθηκαν επάνω τους, καθώς και το σύστημα τουρβιδιτών του Πρίνου που ακολούθησε. Αυτή η ακολουθία ονομάζεται προ – εβαποριτική ακολουθία, με ένα μέσο πάχος 2000 μέτρων.

Κάτω από το «κατώτερο κυρίως άλας», μια κλαστική ακολουθία με πάχος περίπου 2100 μέτρων, αποτέθηκε κατά το μέσο Μειόκαινο στην περιοχή. Εντός αυτής της ακολουθίας βρίσκονται οι πετρελαιοφόροι ψαμμίτες.

Οι ψαμμίτες της λεκάνης Πρίνου – Καβάλας είναι κατά κανόνα συμπαγείς και πολυστρωματικοί, ιδιότητες που χαρακτηρίζουν έναν τουρβιδίτη. Τα ψαμμιτικά στρώματα επίσης επιδεικνύουν έντονα βασικές επαφές στους υποκείμενους σχιστόλιθους και γενικότερα έντονα βασικά χαρακτηριστικά, που αποτελούν άλλο ένα κοινό χαρακτηριστικό των τουρβιδιτών.

Ο ταμιευτήρας περιέχει ποσότητες διαστρωματικού σχιστόλιθου, που μαζί με το πάχος των στρωμάτων δηλώνουν διαφορές στη θέση εντός του αποθηκευτικού καναλιού. Η συνολική ενότητα έχει διαιρεθεί υποκειμενικά σε τέσσερα μέρη για χαρτογράφηση ταμιευτήρων. Κάθε ένα από αυτά τα μέρη περιορίζεται από συνεχή στρώματα σχιστόλιθων, που μπορούν να συσχετιστούν στον ταμιευτήρα με κάθε μέρος να παρουσιάζει πλευρικές αλλαγές. Το μέγεθος των κόκκων των ψαμμιτών του ταμιευτήρα διαφοροποιείται από πολύ μικρό έως πάρα πολύ μεγάλο.

Στο κατώτερο μέρος της προ – εβαποριτικής κλαστικής ακολουθίας βρίσκεται ασβεστολιθικό υπόστρωμα, τεφρό έως σκούρο τεφρό, μεγάλης σκληρότητας. Ο ασβεστόλιθος σχετίζεται με άργιλο σε ποσοστό 10% και ψαμμίτη σε ποσοστό 20%.



Σχήμα 2.3: Στρωματογραφική στήλη της υπολεκάνης του Πρίνου (Proedrou and Papakonstantinou, 2004)

2.2.2 Εβαποριτική Ακολουθία

Επτά εβαποριτικά στρώματα, που εναλλάσσονται με κλαστικά και τα οποία αποτέθηκαν κατά το Μεσσήνιο, υπέρκεινται της προ – εβαποριτικής ακολουθίας. Το πάχος των στρωμάτων αλατιού υπερβαίνει τα 350 μέτρα, ενώ η ακολουθία ως σύνολο ονομάζεται εβαποριτική ακολουθία, η οποία έχει μέσο πάχος 800 μέτρα.

Οι εβαπορίτες αποτελούν το δεύτερο δυσκολότερο εμπόδιο προς τη μετανάστευση των υδρογονανθράκων που υπάρχει στις ιζηματογενείς λεκάνες. Οι εβαπορίτες δρουν σαν μία άριστη σφραγίδα, που παγιδεύει αποτελεσματικά τους περισσότερους από τους υδρογονάνθρακες που δημιουργούνται στα προ – εβαποριτικά ιζήματα (Hunt, 1996). Η λεκάνη Πρίνου–Καβάλας πληρώθηκε από μία εβαποριτική και κλαστική ακολουθία, πάχους 800 μέτρων, κατά τη διάρκεια του Μειόκαινου (Pollak, 1979, Proedrou, 1979).

Η εβαποριτική ακολουθία ξεκινάει με τον “stray evaporite” (εβαπορίτης που δεν είναι και τόσο συνεκτικός), δηλαδή ένα υπόστρωμα πάχους 10 μέτρων από ανυδρίτη, λευκό, μαλακό έως μέτριας σκληρότητας, που συνδέεται με ένα στρώμα άμμου κόκκων μεσαίου μεγέθους.

Το «stray evaporite» υπέρκειται ενός αργιλικού στρώματος, χρώματος ανοικτού τεφρού, ενίοτε τεφρού ή σκουρότεφρου, απαλού, άμορφου και εξαιρετικά ασβεστιτικού. Ο υποκείμενος σχηματισμός είναι ο «πρώτος εβαπορίτης», που αποτελείται από διαυγή αλίτη. Κάτωθι του «πρώτου εβαπορίτη» παρατηρείται μία εναλλαγή αργιλικών στρωμάτων, άμμων και εβαποριτών, με συνολικό πάχος περίπου 240 μέτρα.

Εντός αυτής της ακολουθίας ευρίσκεται το δεύτερο, το τρίτο και το τέταρτο εβαποριτικό στρώμα, αποτελούμενα κυρίως από αλίτη και ίχνη ανυδρίτη.

Ένα αργιλικό στρώμα τεφρό, με ελάχιστη άμμο, υπόκειται της ακολουθίας. Ο υποκείμενος σχηματισμός είναι ένα παχύ κι εξαιρετικά ανεπτυγμένο στρώμα αλάτων, που ονομάζεται «Ανώτερο κύριο άλας». Αποτελείται αποκλειστικά από αλίτη, γαλακτώδες λευκό, που σχηματίζει μεγάλους έως πολύ μεγάλους κρυστάλλους.

Ανάμεσα στο «Ανώτερο κύριο άλας» και στο «Κατώτερο κύριο άλας», βρίσκεται μια ακολουθία αποτελούμενη από αργίλους, τεφρούς έως τεφροκάστανους και ημιδιαφανή άμμο, λευκή γαλακτώδη, μεσαίου έως πολύ μεγάλου μεγέθους κόκκων με ίχνη πυρίτη και σπανιότερα ίχνη γλαυκονίτη. Το κατώτερο κύριο άλας, που υπόκειται της παραπάνω ακολουθίας, αποτελεί το πλέον μεγάλο και καλύτερα ανεπτυγμένο στρώμα αλάτων στη λεκάνη Πρίνου – Καβάλας. Το πάχος αυτού του στρώματος μπορεί να φτάσει τα 75 μέτρα σε ορισμένα σημεία. Στη βάση του «Κατώτερου κύριου άλατος» βρίσκεται ένας διαχωριστικός σχιστόλιθος, με πάχος περίπου 10 μέτρα.

Το στρώμα, που βρίσκεται δίπλα στις διαπερατές άμμους, αποτελείται από «υπερσυμπιεσμένη άργιλο» (OPC). Άργιλοι δίπλα σε διαπερατές άμμους μπορεί να περιέχουν ρευστά σε υψηλή πίεση. Ωστόσο οι άμμοι μπορεί να εμφανίζουν μεγαλύτερο πορώδες από τους αργίλους σε συγκρίσιμα βάθη. Αυτοί οι άργιλοι με την ασυνήθιστα υψηλή πίεση στους ταμειυτήρες χαρακτηρίζονται «υπερσυμπιεσμένοι» (Zimmerle, 1995). Η υπερσυμπιεσμένη άργιλος σχηματίζει ένα αργιλικό στρώμα, καστανότεφρο έως σκούρο καστανότεφρο, υγρό, κολλώδες, άμορφο με μικροσκοπικά εγκλείσματα αλίτη, σηματοδοτώντας έτσι την αρχή της προ – εβαποριτικής ακολουθίας.

2.2.3 Μετα- Εβαποριτική Ακολουθία

Η μετά – εβαποριτική ακολουθία, αποτελούμενη κυρίως από άμμους και αργίλους, αποτέθηκε από το Πλειόκαινο – Πλειστόκαινο έως σήμερα. Το μέσο πάχος αυτής της ακολουθίας είναι 1800 μέτρα (Proedrou and Papakonstantinou, 2004).

Από το Πλειόκαινο έως το Πλειστόκαινο προστέθηκε μια κλαστική ακολουθία, αποτελούμενη από άμμους και αργίλους, φθάνοντας ένα μέγιστο πάχος περίπου 2700 μέτρων (Pollak, 1979).

Η άμμος υπερτίθεται ενός διαφορετικού στρώματος άμμου σφαιρικού, που περιέχει ίχνη γλαυκωνίτη και λεπτές ενδιάμεσες στρώσεις αργίλων, χρώματος ανοικτού έως σκούρου τεφρού, ελαφρώς ασβεστιτική με πυριτικά εγκλείσματα.

Στη βάση της μετα-εβαποριτικής ακολουθίας και στην κορυφή των εβαποριτών υπάρχει ένα στρώμα που χρησιμεύει ως δείκτης και ονομάζεται «Brown Marker». Πρόκειται για μία μάργα, ανοικτή έως μέτρια τεφρή, λεπτή, μεγάλης υγρασίας, ασβεστιτική έως πολύ ασβεστιτική, ενίοτε στερεή έως πολύ σκληρή με σειρά σκώρων αργιλικών στρώσεων.

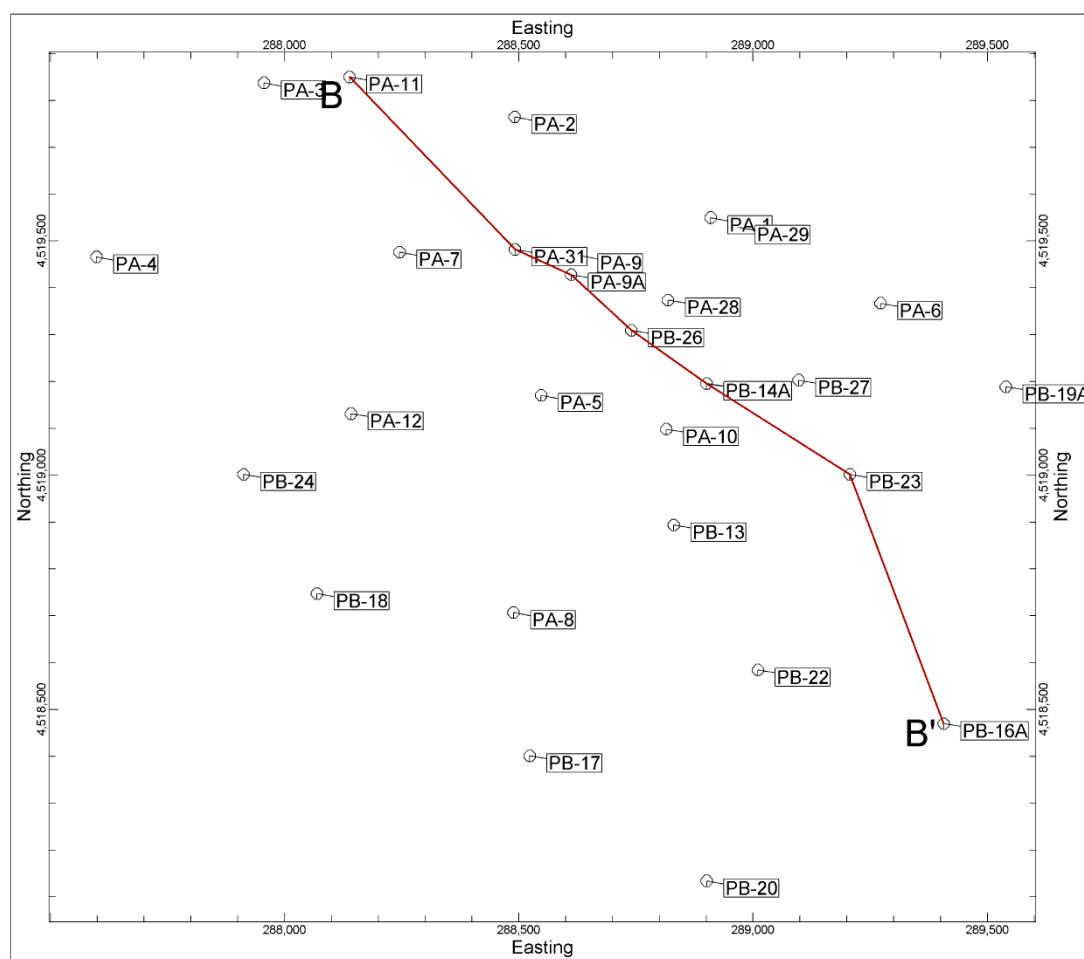
2.3 ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΤΟΥ ΠΡΙΝΟΥ

Οι ταμιευτήρες του Πρίνου αποτελούν το αποτέλεσμα τοπικών διεργασιών εξέλιξης εντός του ανώτερου μέρους, της ανώτερης ενότητας των θαλάσσιων σχιστών που σχηματίστηκαν κατά το ανώτερο Μειόκαινο. Τα τρία ψαμμιτικά στρώματα διαχωρίζονται μεταξύ τους με λεπτά στρώματα σχιστολίθων και διαχωρίζονται μεταξύ τους από δύο μοναδικούς ορίζοντες σχιστολίθων που εμφανίζονται σε μεγάλο μέρος του πεδίου. Αυτά σχηματίζουν 3 διαφορετικά στρώματα ταμιευτήρες, καθένα με ξεχωριστή επιφάνεια πετρελαίου – νερού.

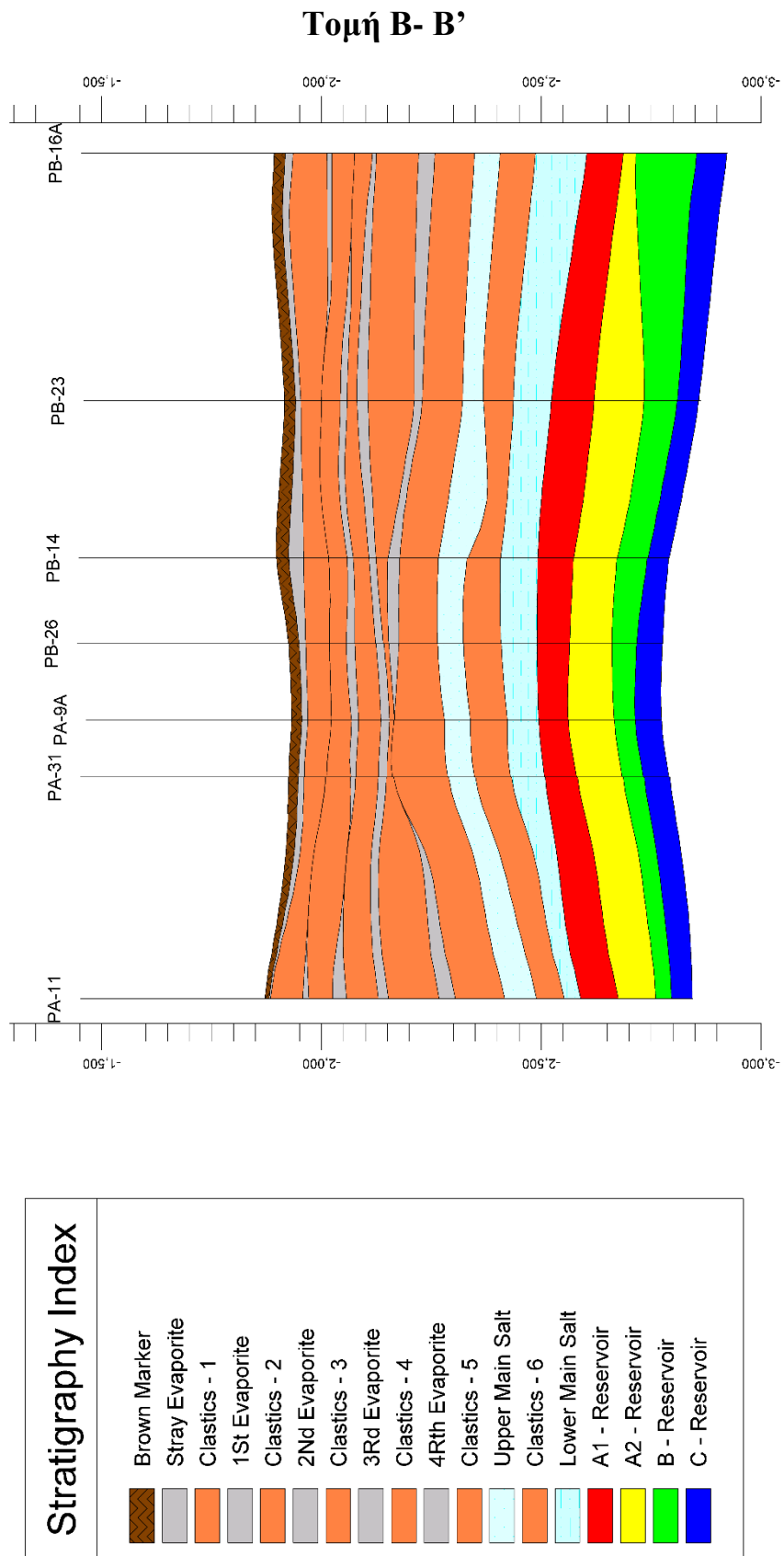
Στον Πίνακα 2.1 παρατίθενται τα βάθη (κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας), στα υψηλότερα μέρη των ταμιευτήρων ενώ στο Σχήμα 2.4 απεικονίζεται η ανώτερη επιφάνεια του ταμιευτήρα Α:

Πίνακας 2.1: Ανώτερη – Κατώτερη Επιφάνεια(μέση τιμή) για τους ταμιευτήρες του Πρίνου (Proedrou and Sidiropoulos, 1992)

	Ανώτερη Επιφάνεια	Κατώτερη Επιφάνεια
Ταμιευτήρας Α	2488.5	2636
Ταμιευτήρας Β	2642	2737
Ταμιευτήρας C	2743	2785



Σχήμα 2.5: Γεωτρήσεις στον ταμιευτήρα του Πρίνου. Αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία της τομής B-B' συνδέονται με κόκκινη γραμμή.



Σχήμα 2.6: Τομή B- B' που έγινε η προσομοίωση της προσθήκης διοξειδίου του άνθρακα

2.2.4 Χαρακτηριστικά των Ταμιευτήρων Πρίνου

Sand A1

Παρουσιάζει την μικρότερη τιμή πορώδους και τον μικρότερο βαθμό κορεσμού σε υδρογονάνθρακες (μεταξύ των παραγωγικών σχηματισμών), 17,0% και 60,6%. Αντίστοιχα ταυτόχρονα, παρουσιάζει και την μικρότερη κινητικότητα υδρογονανθράκων που αποτελεί ένδειξη κακής διαπερατότητας του σχηματισμού. Τέλος παρουσιάζει και την μεγαλύτερη σε διάμετρο ζώνη διείσδυσης. Έτσι εξηγείται η μειωμένη κινητικότητα των υδρογονανθράκων, το μικρό πορώδες και η μεγάλη ζώνη διείσδυσης. Η πυκνότητα του σχηματισμού (ρευστά και matrix πετρώματος) είναι μεταξύ 2,65 και 2,43 g/cc. (Φρόνιμος, 1998)

Sand A2

Παρουσιάζει την μεγαλύτερη τιμή πορώδους (19,5%) και ταυτόχρονα τον μεγαλύτερο βαθμό κορεσμού σε υδρογονάνθρακες (69,65%), μεταξύ των παραγωγικών σχηματισμών. Η κινητικότητα των υδρογονανθράκων είναι καλή (βαθμός κορεσμού σε υδρογονάνθρακες στη ζώνη διείσδυσης 30,7%) και η διάμετρος της ζώνης διείσδυσης η μεγαλύτερη μεταξύ των παραγωγικών ζωνών. Η πυκνότητα μεταξύ 2,33 και 2,42 g/cc. (Φρόνιμος, 1998)

Sand B

Η τιμή του πορώδους είναι 18,0% και ο βαθμός κορεσμού σε υδρογονάνθρακες 62,4% είναι ο μικρότερος μεταξύ των ομογενών παραγωγικών οριζόντων του ταμιευτήρα. Η κινητικότητα των υδρογονανθράκων είναι η χειρότερη μεταξύ των παραγωγικών οριζόντων (ο βαθμός κορεσμού σε υδρογονάνθρακες στην ζώνη διείσδυσης είναι ο μεγαλύτερος με τιμή 36,3%) ενώ η διάμετρος της ζώνης διείσδυσης είναι μέση (30 in). Τα στοιχεία αυτά συγκλίνουν στο ότι ο ορίζοντας αυτός είναι ελαφρά πιο συμπυκνωμένος σε σχέση με τον Sand A2, με την διαφορά να γίνεται πιο αισθητή στη σύγκριση με τον Sand C. Η πυκνότητα κυμαίνεται μεταξύ 2,25 και 2,35 g/cc (Φρόνιμος, 1998).

Sand C

Εμφανίζει την ίδια τιμή πορώδους με τον Sand A2(19,5%) και βαθμό κορεσμού σε υδρογονάνθρακες ελαφρά μικρότερο (66,0% έναντι 69,6%). Το χαρακτηριστικό που διαφοροποιείται έντονα σε σχέση με τους άλλους παραγωγικούς ορίζοντες είναι η πολύ καλή διαπερατότητα και κινητικότητα των υδρογονανθράκων. Ο βαθμός κορεσμού σε υδρογονάνθρακες στην ζώνη διείσδυσης είναι ο μικρότερος (27,1%) ενώ μικρότερη είναι και η διάμετρος της ζώνης διείσδυσης (25 in). Η πυκνότητα μεταξύ 2,28 και 2,31 g/cc (Φρόνιμος, 1998)

3ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ

3.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΠΟ ΤΙΣ ΟΠΟΙΕΣ ΕΞΑΡΤΑΤΑΙ Η ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΑΙ Η ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ

Η διάδοση των ελαστικών κυμάτων μέσα στα στερεά σώματα πραγματοποιείται με ταχύτητες οι οποίες εξαρτώνται από τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Οι μέθοδοι ερμηνείας των σεισμικών καταγραφών στοχεύουν στον καθορισμό ενός μοντέλου ταχυτήτων για το υπέδαφος. Για να έχει σημασία το μοντέλο αυτό, πρέπει να συσχετιστούν οι ταχύτητες διάδοσης των ελαστικών κυμάτων με την κατά περίπτωση λιθολογία και κάποιες φορές με άλλες ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών, όπως είναι η πυκνότητα, το πορώδες, ο βαθμός και ο τρόπος ρηγματώσης, η ηλικία και το βάθος του γεωλογικού σχηματισμού, καθώς και το είδος του ρευστού των πόρων.

Τα ιζηματογενή πετρώματα είναι κοκκώδη υλικά και η πυκνότητά τους (bulk density) εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το πορώδες τους. Σε πετρώματα με χαμηλό πορώδες, συμπεριλαμβανομένων των πυριγενών, των μεταμορφωμένων και των εβαποριτών, οι ταχύτητες εξαρτώνται περισσότερο από τη σύσταση του πετρώματος και υπολογίζονται από τις ταχύτητες διάδοσης αυτών στα κύρια ορυκτά των πετρωμάτων.

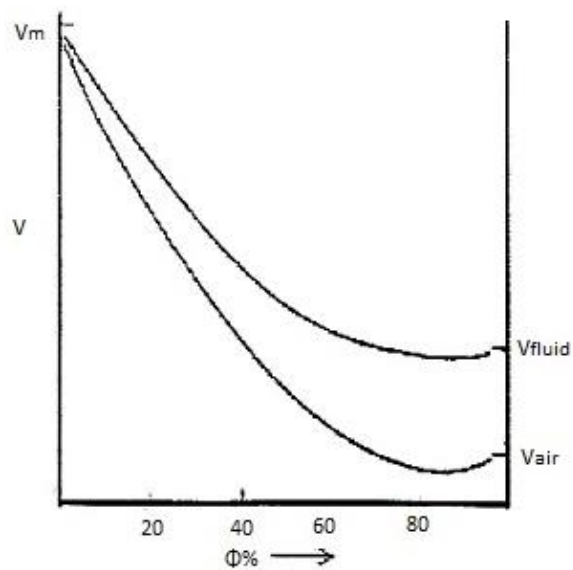
Το βάθος ταφής είναι σημαντική παράμετρος και σε χαμηλού πορώδους πετρώματα, αφού οι μικρορωγμές ελαττώνουν την τιμή της ταχύτητας σε βάθη μικρότερα από 3km. Οπότε προκύπτει ότι (Griffiths and King, 1981):

$$a = \sqrt{3} * b \quad (3.1)$$

όπου a : η αρχική ταχύτητα του κύματος και b : η ταχύτητα για το ίδιο μέσο με παρουσία μικρορωγμών.

Σε πετρώματα υψηλού πορώδους η ταχύτητα (ειδικά για τα κύματα P) και η πυκνότητα εξαρτάται από το ρευστό που υπάρχει στους πόρους του (Σχήμα 3.1). Για πιέσεις μεγαλύτερες των 10kbar (βάθος περίπου 30km) η σχέση ταχύτητας πυκνότητας γίνεται γραμμική, αφού το πορώδες είναι μηδαμινό (Birch, 1961).

Όταν το μέσο ατομικό βάρος του πετρώματος και η πυκνότητα είναι γνωστά, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η ταχύτητα χωρίς λεπτομερή γνώση της ορυκτολογίας του πετρώματος.



Σχήμα 3.1: Εξάρτηση της ταχύτητας των P κυμάτων από το πορώδες σε ακόρεστα (V_{air}) και κορεσμένα (V_{fluid}) πετρώματα. Η ταχύτητα πετρώματος με μηδενικό πορώδες είναι V_m (Griffiths and King, 1981).

3.2 ΤΥΠΟΙ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ

Τύποι από τους οποίους έχουν προκύψει οι ταχύτητες των διαμήκων «P» και εγκάρσιων «S» κυμάτων, καθώς και οι πυκνότητες των στρωμάτων, του σχηματισμού:

Για διαμήκη (V_p) κύματα (Βαφείδης, 2011) :

$$\frac{1}{\alpha_{\text{σχηματισμού}}} = \phi \frac{1}{\alpha_{\text{νερού}}} + (1 - \phi) \frac{1}{\alpha_{\text{ψαμμίτη}}} \quad (3.2)$$

$\alpha_{\text{σχηματισμού}}$ = ταχύτητα σχηματισμού διαμήκων κυμάτων

ϕ = πορώδες σχηματισμού

$\alpha_{\text{νερού}}$ = ταχύτητα νερού (1500 m/s)

$\alpha_{\text{ψαμμίτη}}$ = ταχύτητα στο σχηματισμό (matrix) του ψαμμίτη (6300 m/s)

Για εγκάρσια (V_s) κύματα [Castagna et al., 1985]:

$$V_s = 0,86 V_p - 1,17 \quad (3.3)$$

Για τον προσδιορισμό της πυκνότητας χρησιμοποιήθηκε ο τύπος (Βαφείδης, 2011):

$$\rho_b = \phi \rho_{\text{νερού}} + (1 - \phi) \rho_{\text{ψαμμίτη}} \quad (3.4)$$

ρ_b = πυκνότητα σχηματισμού
 ϕ = πορώδες σχηματισμού
 $\rho_{\text{νερού}}$ = πυκνότητα νερού (1 g/cm³)
 $\rho_{\text{ψαμμίτη}}$ = πυκνότητα ψαμμίτη (2,65 g/cm³)

Για το CO₂:

Όταν οι ταμιευτήρες έχουν βαθμό κορεσμού σε νερό S_w και σε CO₂ (1 - S_w), τότε για τον υπολογισμό της V_p αλλά και της πυκνότητας χρησιμοποιούνται οι σχέσεις (Βαφείδης, 2011):

Για διαμήκη (V_p) κύματα (Βαφείδης, 2011):

$$\frac{1}{V_{\text{σχηματισμού}}} = (1 - \phi) \frac{1}{V_{\text{ψαμμίτη}}} + \phi \left(\frac{S_w}{V_{\text{νερού}}} + \frac{1 - S_w}{V_{\text{CO}_2}} \right) \quad (3.5)$$

S_w = βαθμός κορεσμού σχηματισμού
 $V_{\text{σχηματισμού}}$ = ταχύτητα σχηματισμού διαμήκων κυμάτων
 ϕ = πορώδες σχηματισμού
 $V_{\text{νερού}}$ = ταχύτητα νερού (1500 m/s)
 $V_{\text{ψαμμίτη}}$ = ταχύτητα στο ψαμμίτη (6300 m/s)
 V_{CO_2} = ταχύτητα διοξειδίου του άνθρακα (441,82 m/s) (Annetts et al., 2012)

Προσδιορισμός πυκνότητας σχηματισμού (Βαφείδης, 2011):

$$\rho_{b, \text{CO}_2} = \rho_b + \phi \rho_{\text{CO}_2} - \phi \rho_{\text{ψαμμίτη}} \quad (3.6)$$

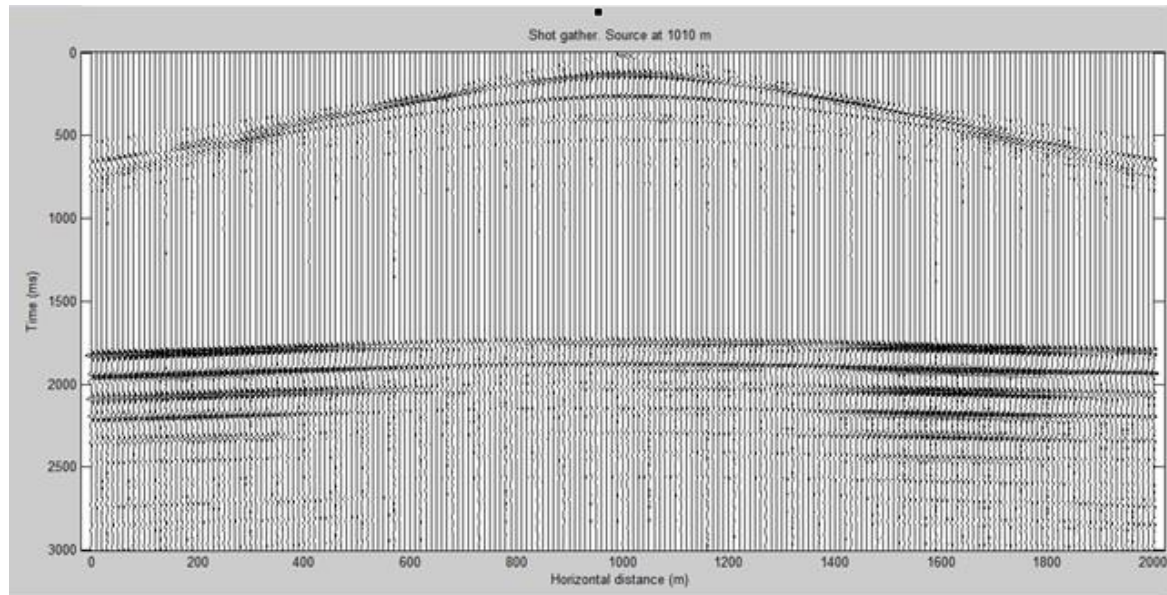
ρ_b = πυκνότητα σχηματισμού
 ϕ = πορώδες σχηματισμού
 ρ_{CO_2} = πυκνότητα διοξειδίου του άνθρακα (0,731 g/cm³)
 $\rho_{\text{ψαμμίτη}}$ = πυκνότητα ψαμμίτη (2,65 g/cm³)

3.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Εφόσον εκτελέστηκε η διαδικασία της προσομοίωσης, τα αποτελέσματα, δηλαδή τα συνθετικά δεδομένα όπως αποθηκεύονται υπό μορφή καταγραφών κοινής πηγής (Σχήμα 3.2), υπέστησαν επεξεργασία που περιγράφεται από τα ακόλουθα βήματα :

1. Ταξινόμηση δεδομένων σε καταγραφές Κοινού Ενδιάμεσου Σημείου (CMP sorting)
2. Ανάλυση ταχυτήτων (Velocity Analysis)

3. Διόρθωση Κανονικής Χρονικής Απόκλισης (Normal Moveout Correction - NMO)
4. Σεισμική Υπέρθεση (Stacking)



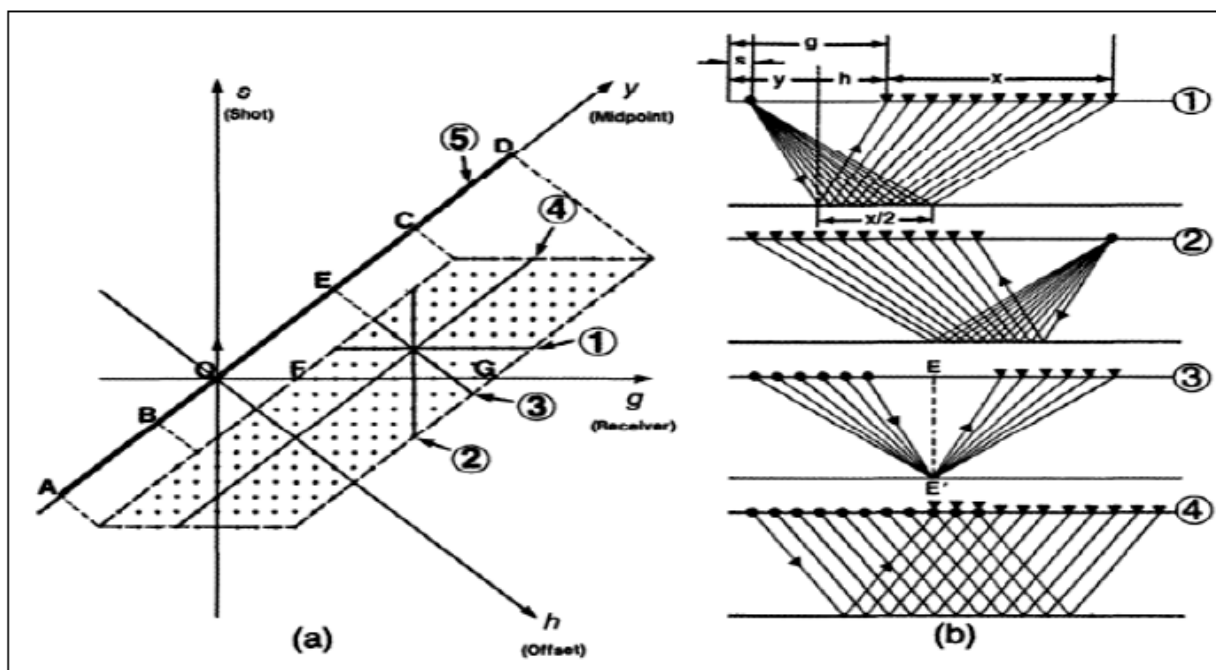
Σχήμα 3.2: Καταγραφή κοινής πηγής. Η θέση της πηγής βρίσκεται στα 1010 m.

3.3.1 Ταξινόμηση Κοινού Ενδιάμεσου Σημείου (CMP sorting)

Στο πρώτο στάδιο της επεξεργασίας, τα δεδομένα μετασχηματίζονται από καταγραφές κοινής πηγής σε κοινού ενδιάμεσου σημείου (Common Mid-Point). Η διαλογή αυτή απαιτεί πληροφορίες για τη γεωμετρία του πειράματος. Για οριζόντιους ανακλαστήρες, χωρίς πλευρικές διακυμάνσεις στην ταχύτητα, οι όροι κοινό ενδιάμεσο σημείο (Common Mid Point - **CMP**) και κοινό σημείο βάθους (Common Depth Point - **CDP**) έχουν την ίδια έννοια.

Η λήψη σεισμικών δεδομένων με πολλαπλή (multifold) κάλυψη πραγματοποιείται με τη χρήση της διάταξης κοινής πηγής (s, g). Η διάταξη κοινής πηγής απαρτίζεται από σεισμικά ίχνη που προέρχονται από την πηγή και την καταγραφή των δονήσεων από πολλούς δέκτες. Στο Σχήμα **3.3.b1** παρατίθεται σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας καταγραφής. Η επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων συνήθως εκτελείται σε καταγραφές κοινού ενδιάμεσου σημείου (CMP gathers) (y, h).

Η απαιτούμενη μετατροπή των συντεταγμένων επιτυγχάνεται μέσω της ταξινόμησης των καταγραφών κοινής πηγής σε καταγραφές κοινού ενδιάμεσου σημείου. Τα σεισμικά ίχνη από διαφορετικές καταγραφές κοινής πηγής με κοινό ενδιάμεσο σημείο ομαδοποιούνται σχηματίζοντας καταγραφή κοινού ενδιάμεσου σημείου.



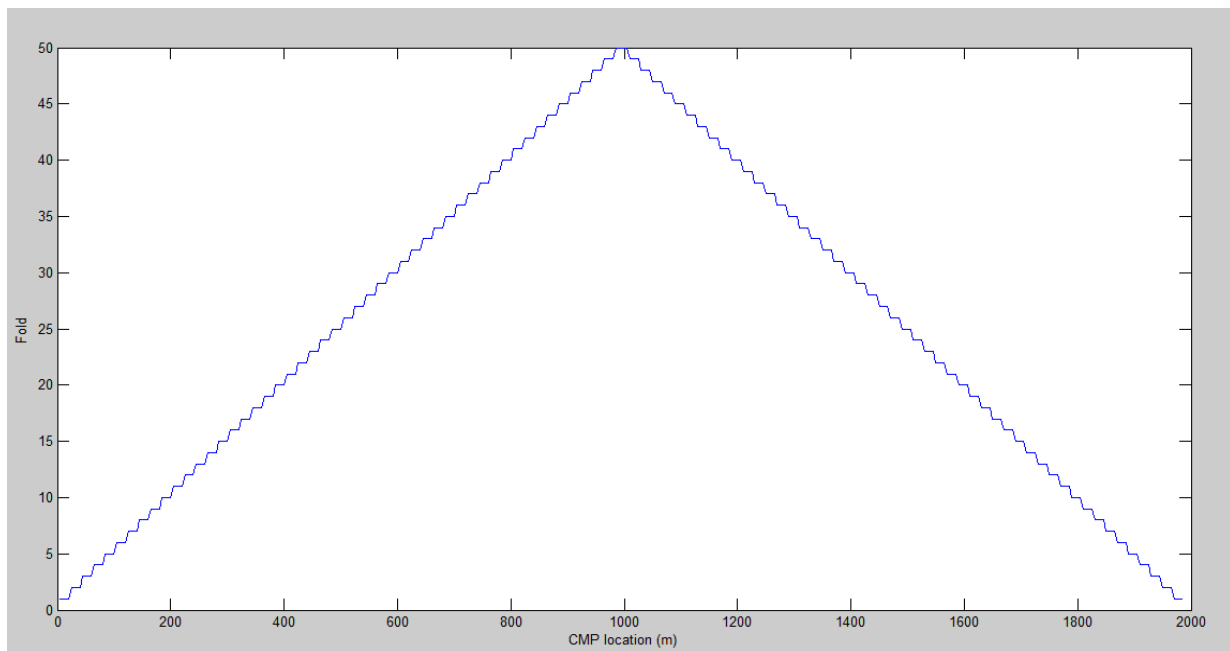
Σχήμα 3.3:(a) Διατάξεις δεδομένων σεισμικής ανάκλασης όπου κάθε σεισμικό ίχνος (κουκίδα) απεικονίζεται σε δύο συστήματα: θέσης πηγής (s) – γεωφώνου (g) και κοινού ενδιάμεσου σημείου (g)– απόστασης πηγής γεωφώνου (h). (b) Σχηματική παράσταση : (1) καταγραφή κοινής πηγής, (2) καταγραφή Κοινού δέκτη, (3) καταγραφή Κοινού ενδιάμεσου σημείου και (4) καταγραφή του κοινής απόστασης πηγής γεωφώνου. (Yilmaz,1987).

Ο αριθμός των σεισμικών ιχνών, που ανήκουν στην ίδια διάταξη «κοινού ενδιάμεσου σημείου (CMP)», εκφράζει την υπεδαφική κάλυψη (Fold), η οποία είναι μία από τις κυριότερες παραμέτρους στη σεισμική ανάκλαση. Εκφράζει το πόσες φορές δειγματοληπτείται ο ανακλαστήρας. Κυμαίνεται από 100 -200 φορές για τη μέθοδο της σεισμικής ανάκλασης στη θάλασσα και μπορεί να ενισχύσει το σήμα από 10 μέχρι και 14 φορές ^[3]. Η μέγιστη υπεδαφική κάλυψη μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\text{Fold} = \min\{\text{Αριθμός Πηγών}, (\text{NC}/2) \times (\Delta x / \Delta s)\} \quad (3.7)$$

Η σχέση 3.7 χρησιμοποιείται και αντίστροφα για τον υπολογισμό της ισαπόστασης των πηγών με δεδομένη την υπεδαφική κάλυψη, αφού εξαρτάται από τον αριθμό των καναλιών (NC) του καταγραφικού (σεισμογράφος), την ισαπόσταση των δεκτών (Δx) και την ισαπόσταση των πηγών (Δs).

Για το συγκεκριμένο πείραμα όπου χρησιμοποιήθηκαν 50 πηγές, 201 κανάλια, $\Delta x = 10\text{ m}$ και $\Delta s = 40\text{ m}$ προκύπτει από τη σχέση 3.7 ότι η μέγιστη υπεδαφική κάλυψη (fold) ισούται με 25, Ωστόσο, λόγω του ότι οι δέκτες στο πείραμα παρέμειναν σταθεροί για όλες τις θέσεις των πηγών, η μέγιστη υπεδαφική κάλυψη επιτεύχθηκε στο κέντρο του μοντέλου και ισούται με 50 (βλ. Σχήμα 3.4). Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζεται η μεταβολή της υπεδαφικής κάλυψης κατά μήκος της γραμμής μελέτης (ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στις συντεταγμένες των κοινών ενδιάμεσων σημείων – CMP locations).



Σχήμα 3.4: Μεταβολή της υπεδαφικής κάλυψης (fold) κατά μήκος της γραμμής μελέτης (ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στις συντεταγμένες των κοινών ενδιάμεσων σημείων – CMP locations)

3.3.2 Ανάλυση Ταχυτήτων (Velocity Analysis)

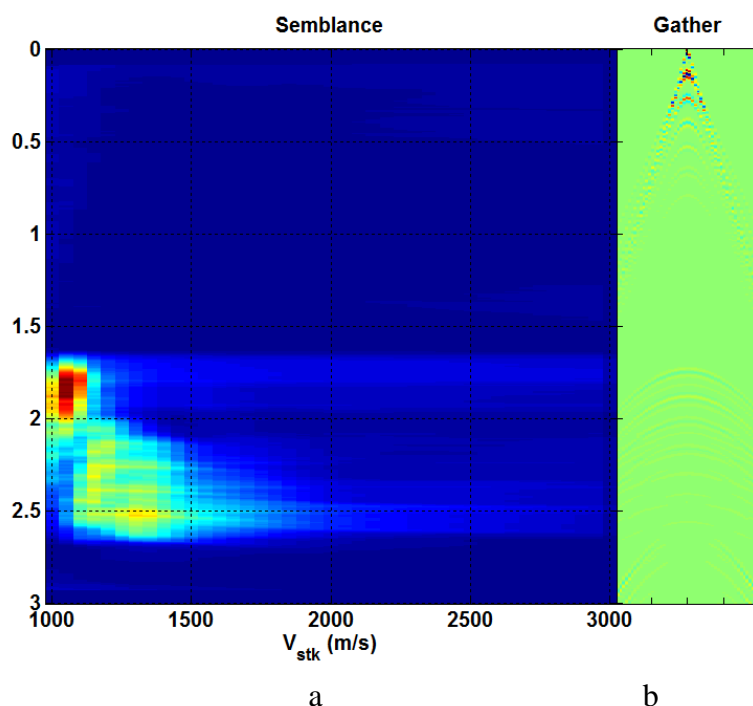
Η διαδικασία της ανάλυσης ταχύτητας έχει στόχο τον προσδιορισμό της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας (V_n). Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας παρέχονται τα πρώτα στοιχεία για την περιοχή που ερευνάται και τυχόν αλλαγές στην τιμή της ταχύτητας είναι δυνατόν να υποδηλώνουν στρωματογραφικές ή ακόμα και λιθολογικές μεταβολές.

Αν το υπέδαφος αποτελείται από n οριζόντια στρώματα με πάχος d_j , τμηματικές ταχύτητες α_j , $j=1, \dots, n$ και αντίστοιχα διπλούς χρόνους διαδρομής t_j , $j=1, \dots, n$ (τύπος 3.9) τότε η μέση τετραγωνική ταχύτητα (V_n) προσδιορίζεται από τη σχέση (Βαφειδής, 1993):

$$V_n = \left[\frac{\sum_{j=1}^n a_j^2 t_j}{\sum_{j=1}^n t_j} \right]^{1/2} \quad (3.8)$$

$$\text{και} \quad t_j = 2 \frac{d_j}{a_j} \quad (3.9)$$

Για τον υπολογισμό της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας χρησιμοποιείται ο χάρτης συνάφειας. Ο χάρτης συνάφειας προκύπτει μετασχηματίζοντας τα δεδομένα κοινού ενδιαμέσου σημείου από τον χώρο offset -διπλού χρόνου σε χώρο μέσης τετραγωνικής ταχύτητας -διπλού κατακόρυφου χρόνου. Αυτός ο μετασχηματισμός προκύπτει με επαναλαμβανόμενη NMO διόρθωση των δεδομένων κοινού ενδιαμέσου σημείου, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένο εύρος σεισμικών ταχυτήτων (μία σεισμική ταχύτητα κάθε φορά) και υπέρθεση των διορθωμένων τιμών δεδομένων για να προκύψει κάθε φορά μια τιμή της συνάφειας για κάθε ζεύγος (t_0, V_n) . Η απεικόνιση των τιμών αυτών της συνάφειας, συναρτήσει της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας και του διπλού κατακόρυφου χρόνου, ονομάζεται χάρτης συνάφειας (Σχήμα 3.5)^[4].



Σχήμα 3.5: Ανάλυση ταχυτήτων για το CMP στη θέση 400 m όπου φαίνονται α) το διάγραμμα της συνάφειας, β) η καταγραφή CMP μετά τη διόρθωση NMO με τις ταχύτητες που έχουν επιλεγεί στο παράθυρο

Στην παρούσα διπλωματική, τμηματικές ταχύτητες (V_{int}) θεωρήθηκαν οι ταχύτητες που προσδιορίστηκαν βάση των σχέσεων 3.2 και 3.5. Στην προκειμένη περίπτωση δεν πραγματοποιήθηκε ανάλυση ταχυτήτων από τους χάρτες συνάφειας. Αντίθετα, οι μέση τετραγωνική ταχύτητα του μοντέλου προέκυψε από την Εξίσωση 3.8 χρησιμοποιώντας τις τμηματικές ταχύτητες και τα πάχη των στρωμάτων σε κάθε θέση του μοντέλου.

Η ανάλυση της ταχύτητας (velocity analysis) είναι η βάση για τη διόρθωση της Κανονικής Χρονικής Απόκλισης. Οι υπολογισθείσες ταχύτητες χρησιμοποιούνται στην εν λόγω διόρθωση για να ευθυγραμμιστούν οι ανακλάσεις των καταγραφών κοινού ενδιαμέσου σημείου.

3.3.3 Διόρθωση Κανονικής Χρονικής Απόκλισης (Normal Moveout NMO)

Πριν την υπέρθεση των σεισμικών ιχνών της διάταξης κοινού ενδιαμέσου σημείου, είναι απαραίτητη η εφαρμογή της διόρθωσης Κανονικής Χρονικής Απόκλισης (NMO). Η διόρθωση NMO εκφράζει τη διαφορά χρόνου μιας καταγραφής ανακλώμενου κύματος, που προκύπτει όταν η πηγή και το γεώφωνο βρίσκονται στην ίδια θέση (μηδενικής απόστασης πηγής γεωφώνου) σε σχέση με την ίδια ανάκλαση που προκύπτει όταν πηγή και γεώφωνο απέχουν κάποια απόσταση μεταξύ τους (offset). Η ταχύτητα, με την οποία διορθώνεται αυτή η απόκλιση του χρόνου, ονομάζεται Ταχύτητα Κανονικής Χρονικής Απόκλισης (Normal Moveout Velocity), η οποία για οριζόντιους ανακλαστήρες συμπίπτει με τη μέση τετραγωνική ταχύτητα V_{RMS} .

Η διόρθωση αυτή εφαρμόζεται στους χρόνους διαδρομής των ανακλώμενων κυμάτων και σκοπός της είναι, η αναγωγή των αρχικών χρόνων διαδρομής σε αντίστοιχους χρόνους κυμάτων που διαδίδονται στην κατακόρυφη διεύθυνση. Η διαδικασία αυτή θεωρεί ότι η πηγή και ο δέκτης συμπίπτουν και βρίσκονται στη θέση του κοινού ενδιαμέσου σημείου της διάταξης (Μπραουδάκη, 2004).

Η κανονική χρονική απόκλιση (NMO correction) υπολογίζεται από τη σχέση (Παγιαλάκης, 2014):

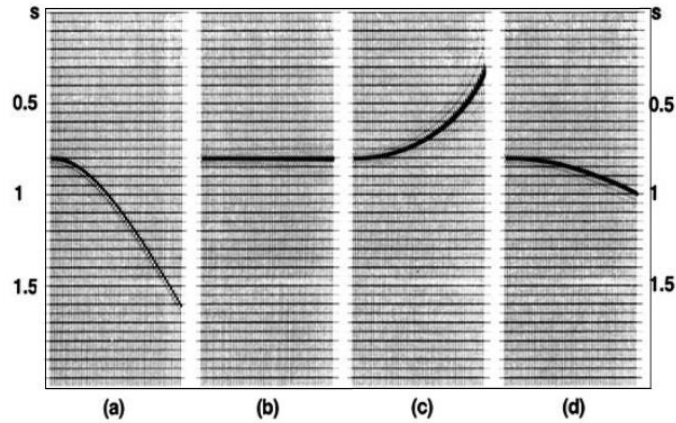
$$\Delta T_{NMO} = t(x) - t(0) = t(0) \left\{ \left[1 + \left(\frac{x}{V_{NMO} \cdot t(0)} \right)^2 \right]^{1/2} - 1 \right\} \quad (3.10)$$

Όπου $T(x)$: ο διπλός χρόνος διαδρομής και αναφέρεται σε γεώφωνο που απέχει από την πηγή απόσταση x

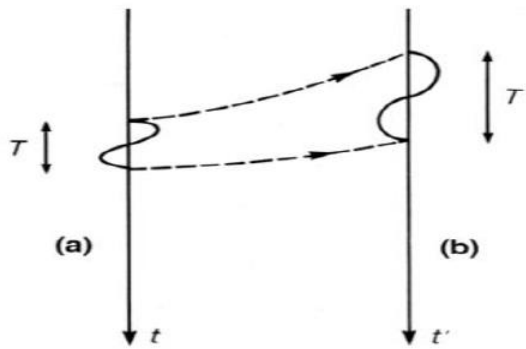
V_{NMO} : η ταχύτητα NMO, η οποία υπολογίζεται από την ανάλυση ταχύτητας και

$t(0)$: ο διπλός κατακόρυφος χρόνος (two-way-time)

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι η κανονική χρονική απόκλιση αυξάνεται ανάλογα με την απόσταση πηγής-γεωφώνου (offset), ενώ μειώνεται με τον διπλό χρόνο κατακόρυφης ακτίνας $t(0)$ και την αύξηση των τιμών της ταχύτητας (V_{NMO}). Είναι σημαντικό στην ίδια εξίσωση να χρησιμοποιηθεί η σωστή ταχύτητα του μέσου (Σχήμα 3.6.b). Αν η χρησιμοποιούμενη ταχύτητα είναι μεγαλύτερη από την πραγματική, η διόρθωση είναι μικρότερη της πραγματικής (under correction) (Σχήμα 3.6.d), ενώ αν η ταχύτητα είναι μικρότερη από την πραγματική ταχύτητα του μέσου, η διόρθωση είναι μεγαλύτερη της πραγματικής (over correction). (Σχήμα 3.6.c)



Σχήμα 3.6: α) Σχηματική παράσταση καταγραφής κοινού ενδιαμέσου σημείου πριν από τη διόρθωση NMO και μετά τη διόρθωση NMO β) με τη σωστή ταχύτητα NMO, γ) με μεγαλύτερη ταχύτητα NMO, δ) με μικρότερη ταχύτητα NMO ^[5].



Σχήμα 3.7: Σχηματική παράσταση κυματομορφής ανάκλασης σε χρόνο t , πριν την διόρθωση NMO και σε χρόνο μετά από διόρθωση NMO, όπου παρατηρείται αύξηση της περιόδου της κυματομορφής ^[5].

3.3.4 Σεισμική Υπέρθεση (Stacking)

Σεισμική υπέρθεση (stacking) ονομάζεται η άθροιση των σειсмоγραμμάτων που έχουν κοινό ενδιαμέσο σημείο (common mid-point, CMP) μεταξύ σεισμικής πηγής και γεωφώνου. Κατά τη διαδικασία αυτή συλλέγονται τα σειсмоγράμματα κοινού ενδιαμέσου σημείου (CMP sorting), εφαρμόζεται σ' αυτά η δυναμική διόρθωση (NMO) και στη συνέχεια αθροίζονται (CMP stacking).

Μετά τη δυναμική διόρθωση και την άθροιση (stacking) των σεισμικών ιχνών, παρατηρείται τόσο ενίσχυση των πλατών των ανακλώμενων κυμάτων, όσο και μείωση του όγκου των δεδομένων κατά το ποσό της υπεδαφικής κάλυψης. Τα σεισμικά ίχνη κοινού ενδιαμέσου σημείου αθροιζόμενα δημιουργούν τη σεισμική τομή υπέρθεσης.

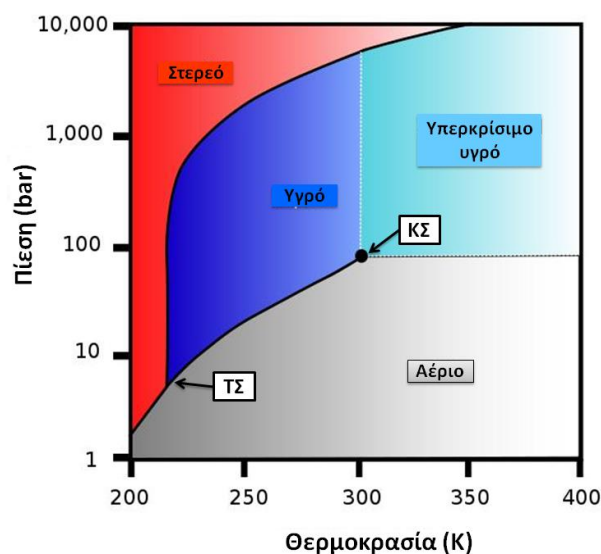
Οι κυριότεροι στόχοι της υπέρθεσης είναι:

- Η αύξηση του σήματος σε σχέση με τον τυχαίο θόρυβο, που υπάρχει ήδη στα σήματα.
- Η βελτίωση του αρχικού σήματος σε σχέση με τις πολλαπλές ανακλάσεις, οι οποίες εξασθενούν με τη διαδικασία αυτή.
- Η μείωση του όγκου των σεισμικών δεδομένων, καθότι είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τις θαλάσσιες διατάξεις.
- Επιτρέπει την εμφάνιση των ιχνών σε μια μορφή, που μοιάζει με αυτή της μηδενικής απόστασης πηγής-γεωφώνου (normal incidence section).

Όταν η διαστρωμάτωση είναι οριζόντια και επίπεδη, η τομή υπέρθεσης μοιάζει με τη γεωλογική τομή. Για πολύπλοκες, όμως, γεωλογικές δομές, η τομή υπέρθεσης μπορεί να φαίνεται διαφορετική από τη γεωλογική. Το πρόβλημα εντοπίζεται στο ότι, ενώ η ανακλώμενη ακτίνα είναι κάθετη στον ανακλαστήρα, η ίδια ακτίνα στην τομή υπέρθεσης σχεδιάζεται κάτω από το κοινό ενδιαμέσο σημείο. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται εφαρμόζοντας σεισμική χωροθέτηση (migration).

3.4 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ CO₂- ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ CO₂ ΣΤΗΝ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ

Σε θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος το διοξείδιο του άνθρακα είναι αέριο. Η φυσική κατάσταση του CO₂ αλλάζει ανάλογα με τις συνθήκες κάτω από τις οποίες βρίσκεται. Σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι στερεό και εάν θερμανθεί κάτω από πίεση 5,1 bar θα μεταπέσει απευθείας σε αέρια κατάσταση. Σε θερμοκρασίες ανάμεσα αυτής του τριπλού σημείου (-56,5°C) και της κρίσιμης θερμοκρασίας (31,1 °C), μπορεί να μετατραπεί από αέριο σε υγρό εάν συμπιεστεί στην κατάλληλη πίεση (αφαιρώντας την παραγόμενη θερμική ενέργεια). Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 31,1 °C, και εάν η πίεση ξεπερνάει τα 73,6 bar, το CO₂ βρίσκεται σε υπερκρίσιμη κατάσταση όπου συμπεριφέρεται σαν αέριο. Κάτω από πολύ υψηλές πιέσεις και χαμηλές θερμοκρασίες, η πυκνότητα του αερίου είναι πολύ μεγάλη και μπορεί να ξεπεράσει αυτή του νερού σε υγρή μορφή. Το κρίσιμο σημείο έχει ιδιαίτερη σημασία για τις τεχνικές γεωλογικής αποθήκευσης.



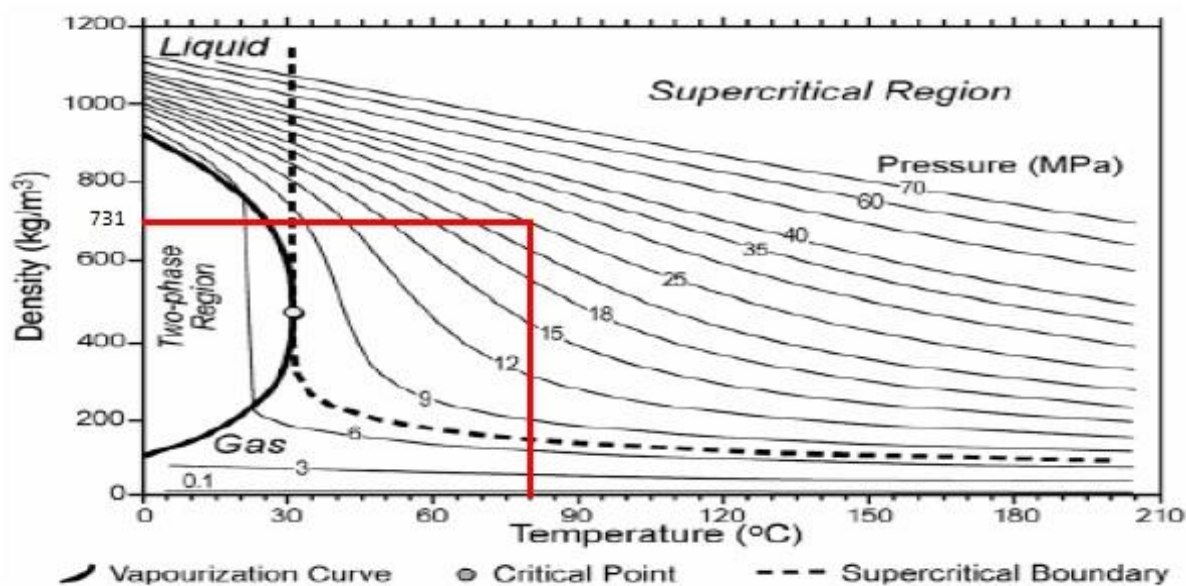
Σχήμα 3.8: Διάγραμμα Φάσεων Διοξειδίου του Άνθρακα που δείχνει το τριπλό σημείο (ΤΣ) και το κρίσιμο σημείο (ΚΣ)(Wikipedia [6])

Στην συνέχεια ακολουθεί πίνακας που περιγράφει κάποιες από τις φυσικές ιδιότητες του CO₂ (Πίνακας 3.1) και διάγραμμα (Σχήμα 3.9) όπου απεικονίζεται η μεταβολή της πυκνότητας του CO₂ συναρτήσει της θερμοκρασίας και της πίεσης του.

Πίνακας 3.1: Φυσικές ιδιότητες του CO₂ (Kirk-Othmer, 1985, NIST, 2003)****

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	
Κρίσιμη θερμοκρασία	31.1°C
Κρίσιμη πίεσης	73.9 bar
Κρίσιμη πυκνότητα	467 kg / m ³
Θερμοκρασία τριπλού σημείου	-56.5 °C
Πίεση τριπλού σημείου	5.18 bar
Σημείο βρασμού(1.013 bar)	-78.5 °C
ΑΕΡΙΑ ΦΑΣΗ	
Πυκνότητα (Κ.Σ.)*	1.976 kg / m ³
ΥΓΡΗ ΦΑΣΗ	
Πυκνότητα (σε -20 °C και 19.7 bar)	1032 kg/ m ³
ΣΤΕΡΕΑ ΦΑΣΗ	
Πυκνότητα στο σημείο πήξης	1562 kg/ m ³

****: ΚΣ (ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ) (0°C 1.013 bar.)



Σχήμα 3.9 : Η πυκνότητα του CO₂ σε συνάρτηση με τη πίεση και τη θερμοκρασία (Bachu, 2003)

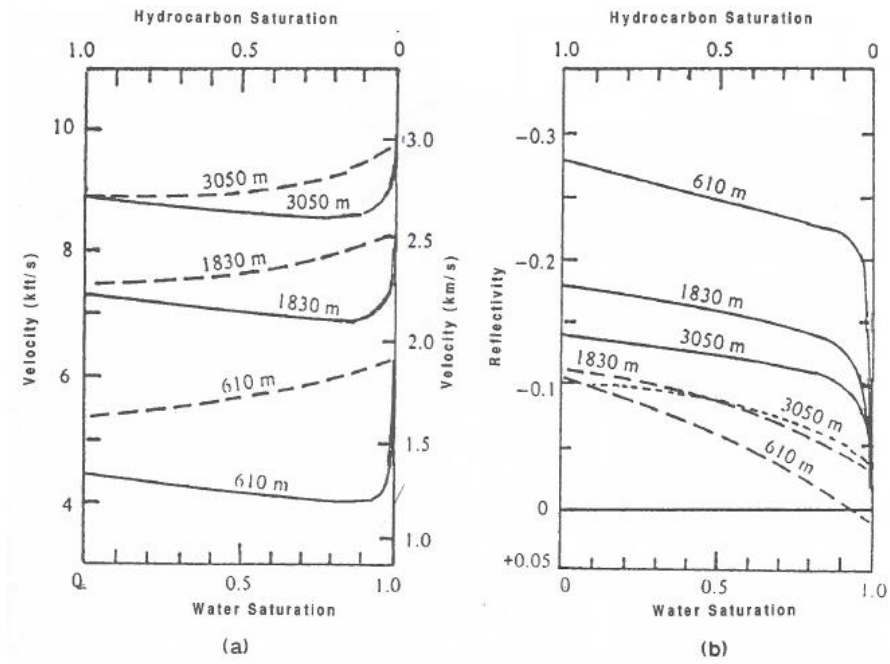
3.4.1 Επίδραση του CO₂ στην ταχύτητα και την πυκνότητα των σχηματισμών

Στη δημιουργία του μοντέλου υπάρχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Πίεση σχηματισμού : 25 MPa (Annetts, et al., 2012)
2. Πυκνότητα CO₂: 731 Kg/ m³ (Σχήμα 3.9)
3. Θερμοκρασία Σχηματισμού: 170F ή 80° C (Φρόνιμος, 1998)

Η πίεση και η θερμοκρασία του σχηματισμού είναι γνωστή από τη βιβλιογραφία εφόσον έχει διεξαχθεί πείραμα στις ίδιες συνθήκες. Άρα, με βάση το διάγραμμα του Σχήματος 3.9 προσδιορίζεται η πυκνότητα του διοξειδίου στα 731 kg/ m³.

Για τον προσδιορισμό της ταχύτητας ενός ταμιευτήρα κορεσμένο με νερό και CO₂ χρησιμοποιήθηκε η παραδοχή ότι το CO₂ επιδρά κατ' αντίστοιχα με το φυσικό αέριο. Ο συντελεστής μείωσης της ταχύτητας των P-κυμάτων για βαθμό κορεσμού σε CO₂ (ή φυσικό αέριο) ίσο με 50% και για τις συνθήκες που επικρατούν στον ταμιευτήρα του Πρίνου (καμπύλη βάθους 1830m – Σχήμα 3.10) εκτιμήθηκε στο 0.9019 ή αλλιώς μείωση κατά 10% περίπου σε σχέση με την ταχύτητα των P-κυμάτων για 100% κορεσμό σε νερό.



Σχήμα 3.10 : Μεταβολή της ταχύτητας (a) του συντελεστή ανάκλασης (b) των P κυμάτων για ταμειντήρες αερίου/πετρελαίου που υπόκεινται σχιστολιθικών σχηματισμών συναρτήσει του κορεσμού σε υδρογονάνθρακες (1-water saturation). Οι συνεχείς καμπύλες αντιστοιχούν σε φυσικό αέριο και η διακεκομμένες σε πετρέλαιο (Sheriffand Geldart, 1995)

4ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για να λύσει αριθμητικά τη διαφορική εξίσωση διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Αρχικά δημιουργείται το υπό μελέτη μοντέλο ταχυτήτων, το οποίο στη συνέχεια χωρίζεται σε κελιά. Η μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών ανήκει στις μεθόδους πλέγματος, άρα για την εφαρμογή της θα πρέπει ο χώρος όπου θα γίνουν οι υπολογισμοί να καλυφθεί από έναν κανάβο (grid) στον χώρο και κάθε συνεχής συνάρτηση να αναπαρίσταται από τις τιμές της στα διάφορα σημεία του κανάβου.

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές αριθμητικές μεθόδους στην προσομοίωση της σεισμικής κίνησης. Το γεγονός οφείλεται στο ότι είναι εύκολα εφαρμόσιμη σε πολύπλοκα προβλήματα με σχετικά μεγάλη ακρίβεια και είναι αρκετά αποδοτική υπολογιστικά. (Σκαρλατούδης, 2009)

4.1.1 Περιορισμοί δημιουργίας Συνθετικών Δεδομένων

Για τη δημιουργία και για την αποφυγή προβλημάτων ευστάθειας του μοντέλου πρέπει να πληρούνται οι κατάλληλοι περιορισμοί (Παγιαλάκης, 2014)
Ειδικότερα:

1. Για την ευστάθεια θα πρέπει να επαληθεύεται το εξής κριτήριο:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \times V_{p_{max}} \leq \frac{2}{3} \quad (4.1)$$

Όπου $V_{p_{max}}$: η μέγιστη ταχύτητα των P- κυμάτων.

Δt : η διακριτοποίηση στο χώρο του χρόνου (t) και Δx : η διακριτοποίηση στο χώρο του χώρου (x-z).

2. Για την αριθμητική διασπορά (μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης με την συχνότητα) θα πρέπει να επαληθευτεί το εξής κριτήριο:

$$\frac{\lambda_{min}}{\Delta x} > 5 \quad (4.2)$$

Όπου $\lambda_{min} = \frac{V_{s_{min}}}{f_{max}}$

$V_{s_{min}}$: η ελάχιστη ταχύτητα των S- κυμάτων

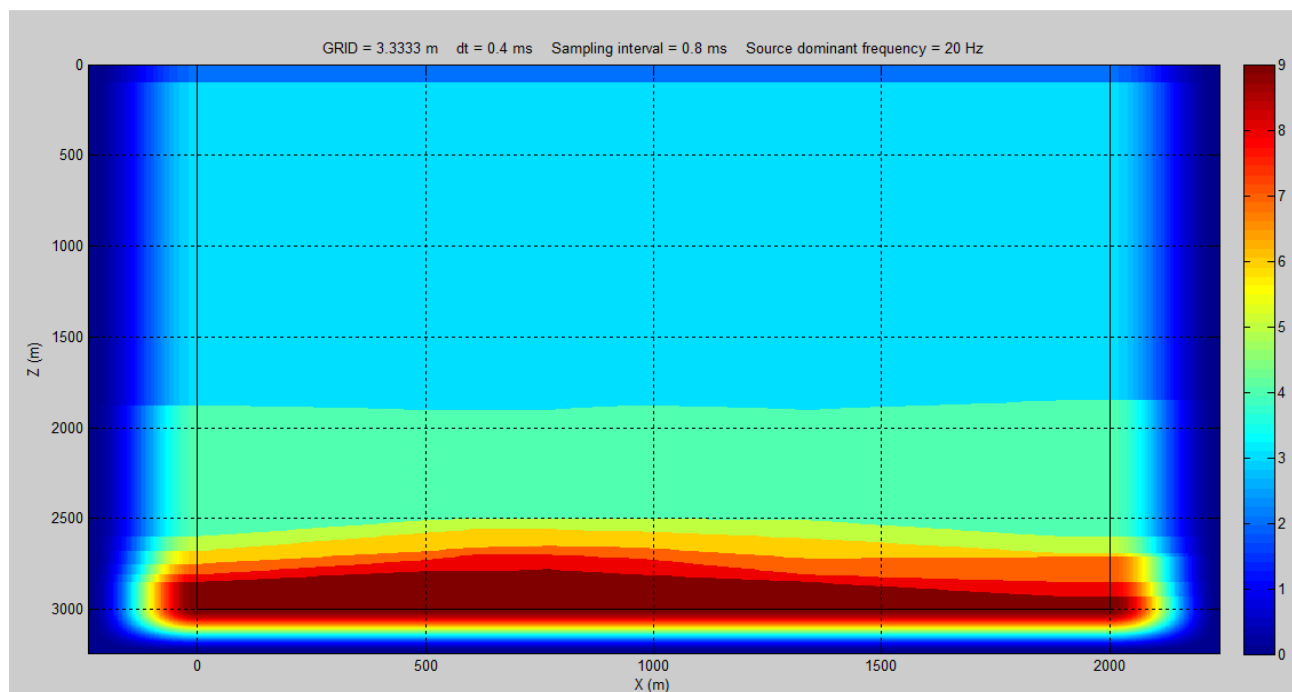
f_{max} : κεντρική συχνότητα διάδοσης σεισμικών κυμάτων.

4.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

Βάση της γεωλογικής τομής (Σχήμα 2.6) υπολογίστηκαν τα πάχη των στρωμάτων καθώς και τις διαστάσεις του μοντέλου. Οπότε, το μοντέλο σχεδιάστηκε με διαστάσεις 2000m μήκος και 3000m βάθος. Επιπλέον, κατά το σχεδιασμό του μοντέλου ταχύτητων για την δημιουργία των συνθετικών δεδομένων ανάκλασης τα στρώματα μεταξύ του Brown Marker μέχρι και τον ταμιευτήρα A1 ενοποιήθηκαν σε ένα στρώμα. Ακόμα, έχει οριστεί σε κάθε στρώμα που έχει σχεδιαστεί, η πυκνότητα του, καθώς και οι ταχύτητες των διαμήκων και εγκάρσιων κυμάτων. Ο υπολογισμός τους έγινε βάση του πορώδους που είχαν προσδιοριστεί από τη διπλωματική εργασία του Φρόνιμου (1998).

Για τη δημιουργία του μοντέλου προσομοίωσης της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στην Matlab πρέπει αρχικά να οριστεί ξεχωριστά η γεωμετρία κάθε στρώμα. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου προέκυψαν από τη γεωλογική τομή B-B' (Σχήμα 2.6) (Παναγόπουλος Γ., προσωπική επικοινωνία). Οι αποστάσεις και οι θέσεις των στρωμάτων προσδιορίστηκαν βάσει των αποστάσεων των γεωτρήσεων (Σχήμα 2.5). Το μοντέλο αποτελείται κατά κύριο λόγο από οκτώ στρώματα των οποίων οι ταχύτητες, οι πυκνότητες και τα πορώδη φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

Σε κάθε γεωλογικό σχηματισμό θα πρέπει να προσδιοριστεί η ταχύτητα των διαμήκων και εγκάρσιων κυμάτων, καθώς και η πυκνότητα κάθε στρώματος. Ο προσδιορισμός της ταχύτητων γίνεται από την πυκνότητα των στρωμάτων και από το πορώδες των σχηματισμών (Φρόνιμος, 1998).



Σχήμα 4.1: Μοντελοποίηση της τομής B-B' που δημιουργήθηκε στη Matlab. Τα διαφορετικά χρώματα αντιστοιχούν στον αριθμό του κάθε στρώματος.

Πίνακας 4.1: Ταχύτητες στρωμάτων στην τομή BB'

	Στρώματα	Ταχ. Vp (m/s) 100% H ₂ O	Ταχ. Vp (m/s) 50% CO ₂	Ταχύτητες εγκαρσίων κυμάτων Vs (m/s)	Πυκν. (g/cm ³) 100% H ₂ O	Πυκν. (g/cm ³) 50% CO ₂	Πορώδες στρωμάτων (%)
1°	Θάλασσα	1500	1500	0.01	1	1	-
2°	Άμμος Άργιλοι	2200	2200	1060	2.3	2.3	-
3°	Εβαπορίτες	4750	4750	3100	2.6	2.6	-
4°	Ταμ. Α1	4140	3734	2300	2.4	2.139	17
5°	Ταμ. Α2	3850	3472.44	2100	2.34	2.1	19.5
6°	Ταμ. Β	3990	3598.71	2240	2.31	2.123	18
7°	Ταμ. C	3830	3454.40	2100	2.28	2.1	19.5
8°	Εβαπορίτες Πάτωμα	4750	4750	2900	2.7	2.7	-

Η προσομοίωση της παρακολούθησης εισαγωγής CO₂ στα στρώματα του ταμιευτήρα του Πρίνου πραγματοποιήθηκε σε 4 διαφορετικά σενάρια. Στο πρώτο σενάριο οι ταμιευτήρες θεωρήθηκαν πλήρως κορεσμένοι σε νερό. Το σενάριο αυτό αντιστοιχεί στην αρχική φάση του ταμιευτήρα πριν την εισαγωγή CO₂. Στο δεύτερο σενάριο, ολόκληρο το ψαμμιτικό στρώμα Α1 του ταμιευτήρα θεωρείται ότι είναι πληρωμένο με 50% CO₂ και 50% με νερό. Στο τρίτο σενάριο, ένα μέρος του Α1 πληρώνεται με 50 % CO₂ και αντίστοιχα, στο τέταρτο σενάριο, ένα μέρος και των τεσσάρων ψαμμιτικών στρωμάτων (Α1, Α2, Β και C) πληρώνεται με 50 % CO₂.

Οι ταχύτητες λοιπόν, καθώς και η πυκνότητα, έχουν αλλάξει μόνο για τους ταμιευτήρες, εφόσον η εισαγωγή του διοξειδίου έγινε μόνο σε αυτούς. Συγκρίνοντας, λοιπόν, τη ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων (Vp), παρατηρείται ότι μειώνεται περίπου γύρω στο 10 % βάση του διαγράμματος από το Σχήμα 3.10. Η πυκνότητα αντίστοιχα μειώνεται περίπου στο 10 % με βάση των υπολογισμό τους, από την Εξίσωση 3.6. Η ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων (Vs) παραμένει σταθερή, εφόσον δεν επηρεάζεται από τα ρευστά (Πίνακας 4.1).

Με βάση τις ταχύτητες των σχηματισμών και τις σχέσεις 4.1 και 4.2, προέκυψαν οι παράμετροι του πλέγματος, το χρονικό βήμα $\Delta t = 0.4$ ms, ενώ οι διαστάσεις του κάθε κελιού GRID = $\Delta x = \Delta z = 3.3333$ m. Η ελάχιστη εγκάρσια ταχύτητα των στρωμάτων 0,01m/s (λόγω της θαλάσσης), η συχνότητα της πηγής 20Hz και η ισαπόσταση των υδροφώνων 10m.

Αμέσως μετά ορίστηκαν τα στρώματα του πειράματος. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης, δίνει την δυνατότητα στο χρήστη είτε να σχεδιάσει τα όρια του κάθε στρώματος, είτε να εισάγει τις συντεταγμένες του, μέσω πινάκων Matlab. Αφού σχεδιαστεί το κάθε

στρώμα (Σχήμα 4.1) ο χρήστης καλείται να εισάγει τις ταχύτητες των διαμήκων P και των εγκάρσιων S κυμάτων καθώς και τη πυκνότητα.

Επόμενο βήμα είναι ο ορισμός των παραμέτρων του πειράματος, δηλαδή του πλήθους των υδροφώνων και των πηγών (χρησιμοποιήθηκαν 201 υδρόφωνα σε σταθερές θέσεις και ισαποστάσεις των 10m και 50 πηγές), της θέσης και του βάθους του πρώτου υδροφώνου ($x=0m$, $z=0m$) και της πρώτης πηγής ($x=10m$, $z=10$), καθώς και η ισαπόσταση των πηγών (40m). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει περιορισμός ως προς τη θέση όπου τοποθετούνται οι πηγές. Ειδικότερα, η θέση των πηγών θα πρέπει να οριστούν έτσι ώστε να απέχουν τουλάχιστον τρεις (3) κόμβους μακριά ($3 \times \Delta x = 10m$) από οποιαδήποτε διαχωριστική επιφάνεια ή όριο του μοντέλου.

Τέλος, ορίζεται ο συνολικός χρόνος καταγραφής (3000.8 ms), καθώς επίσης υπάρχει η δυνατότητα απεικόνισης και αποθήκευσης στιγμιότυπων (snapshots) του κυματικού πεδίου σε προκαθορισμένες χρονικές στιγμές.

4.3 ΣΕΝΑΡΙΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ CO_2 ΣΤΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΤΟΥ ΠΡΙΝΟΥ

4.3.1 Σενάριο 1: Όλα τα στρώματα του Ταμιευτήρα 100% Κορεσμένα σε Νερό

Στο πρώτο σενάριο τα ψαμμιτικά στρώματα του ταμιευτήρα θεωρήθηκαν κορεσμένοι 100% σε νερό. Πιο συγκεκριμένα οι ταχύτητες και οι πυκνότητες για τα εν λόγω στρώματα είναι :

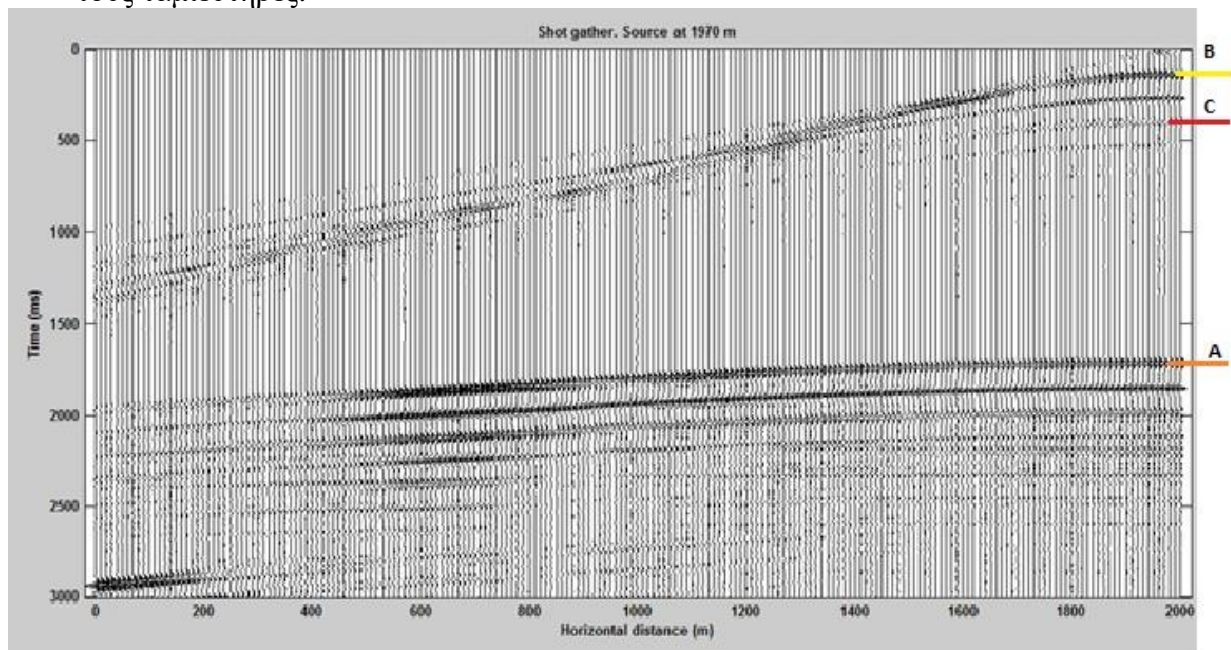
Πίνακας 4.2: Ταχύτητες Ταμιευτήρων 1^ο σεναρίου

Ταμιευτήρας	Ταχύτητα V_p	Ταχύτητα V_s	Πυκνότητα
A1	4100 m/s	2300 m/s	2.40 g/cm ³
A2	3850 m/s	2100 m/s	2.34 g/cm ³
B	3990 m/s	2240 m/s	2.31 g/cm ³
C	3890 m/s	2100 m/s	2.28 g/cm ³

Το μοντέλο ταχυτήτων που κατασκευάστηκε στο λογισμικό Matlab, καθώς και τα στοιχεία του, απεικονίζονται στο Σχήμα 4.1.

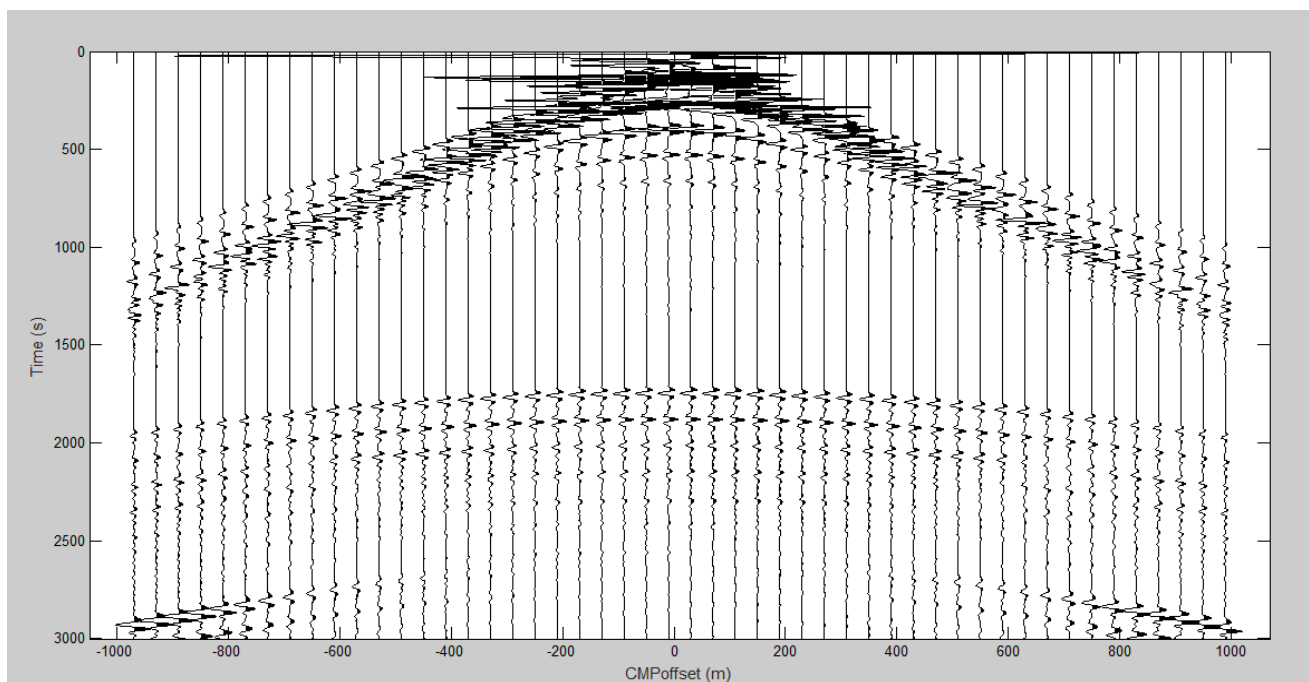
Στο Σχήμα 4.2 παρατηρείται μια καταγραφή κοινής πηγής με την πηγή να βρίσκεται στα 1970m (τελευταία θέση πηγής). Στην καταγραφή φαίνονται τα απευθείας και τα

επιφανειακά κύματα, καθώς και οι ανακλάσεις από το στρώμα των εβαποριτών και τους ταμιευτήρες.

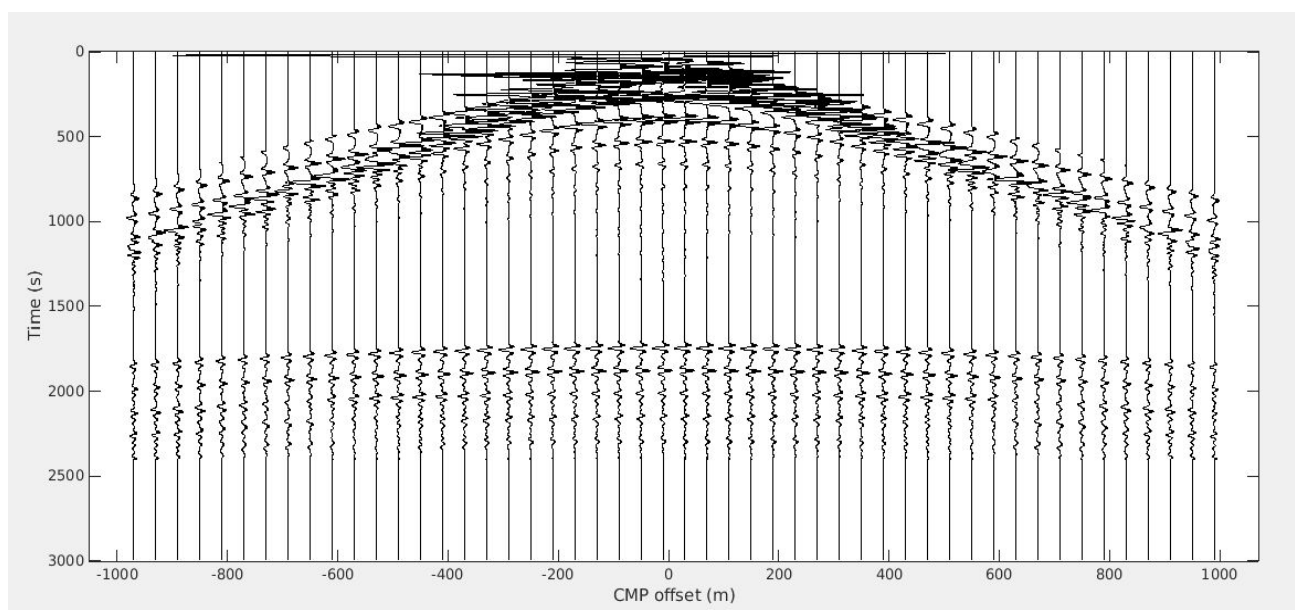


Σχήμα 4.2: Καταγραφή κοινής Πηγής με τη θέση της πηγής στα 1970m Α) Ανακλώμενα (πορτοκαλί) Β) Επιφανειακά (κίτρινα) C) Απευθείας (κόκκινα)

Στη συνέχεια (Σχήμα 4.3) παρουσιάζεται μία καταγραφή κοινού ενδιάμεσου σημείου στα 1000m, καθώς και η ίδια καταγραφή μετά από τη διόρθωση κανονικής χρονικής απόκλισης (NMO) (Σχήμα 4.4).



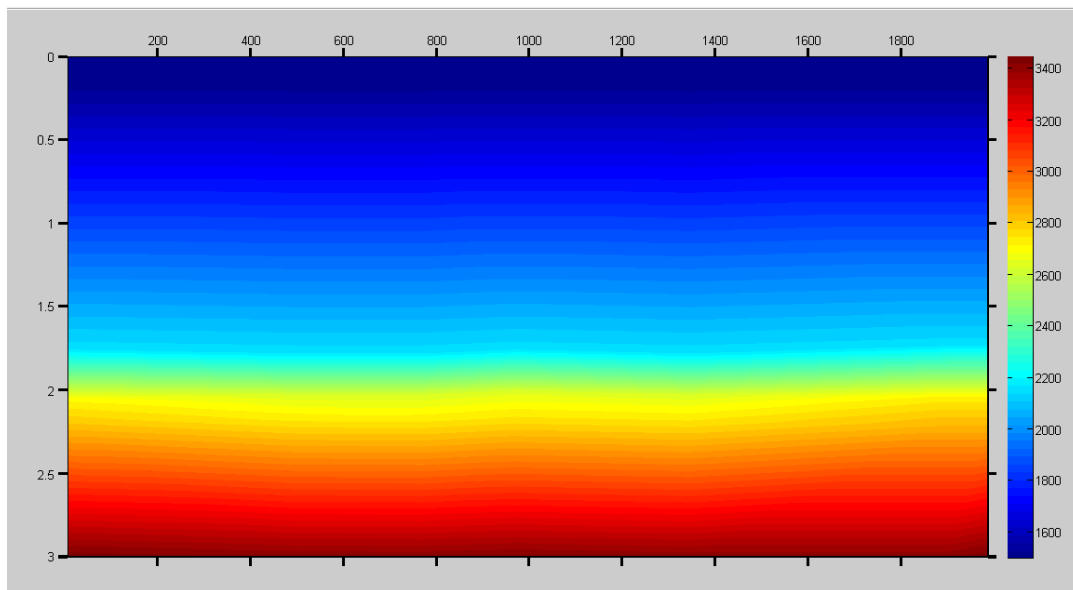
Σχήμα 4.3: Καταγραφή κοινού ενδιάμεσου σημείου (CMP) στη θέση 1000m



Σχήμα 4.4: Η καταγραφή κοινού ενδιάμεσου σημείου του Σχήματος 4.3 μετά τη διόρθωση NMO

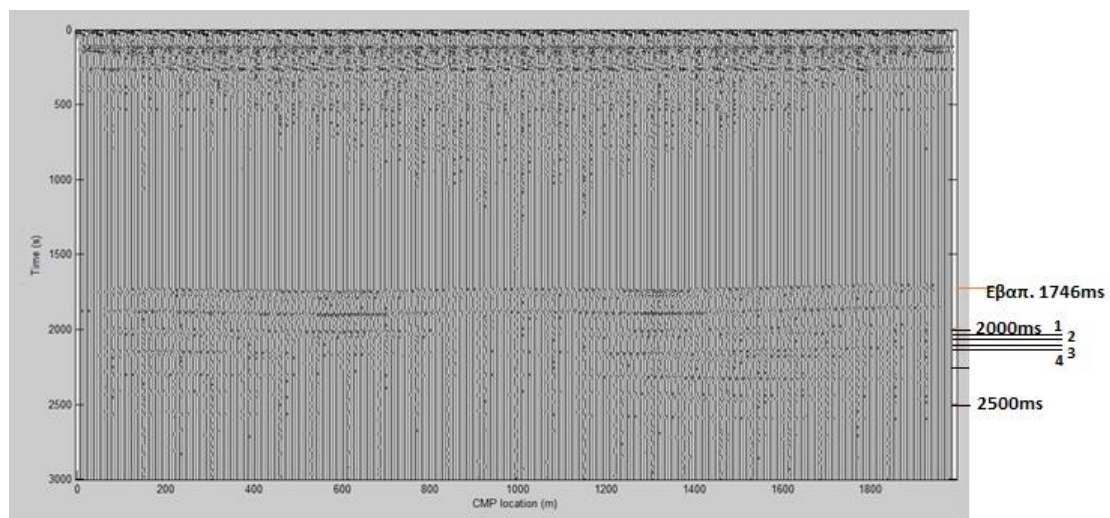
Κυρίως αυτό που παρατηρείται μετά τη δυναμική διόρθωση NMO είναι ότι οι ανακλαστήρες φαίνονται πιο οριζόντιοι.

Οι V_{rms} ταχύτητες μαζί με τους διπλούς κατακόρυφους χρόνους (T_0), καθώς και την οριζόντια απόσταση (x), εισήχθησαν στο λογισμικό της Matlab και διαβάστηκαν από τον αλγόριθμο *GridData*. Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων αναπαριστά το μοντέλο ταχυτήτων σε χρωματική κλίμακα (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5: Η μέση τετραγωνική ταχύτητα (V_{rms}) (m/s) του μοντέλου μέχρι τα 3000.8ms

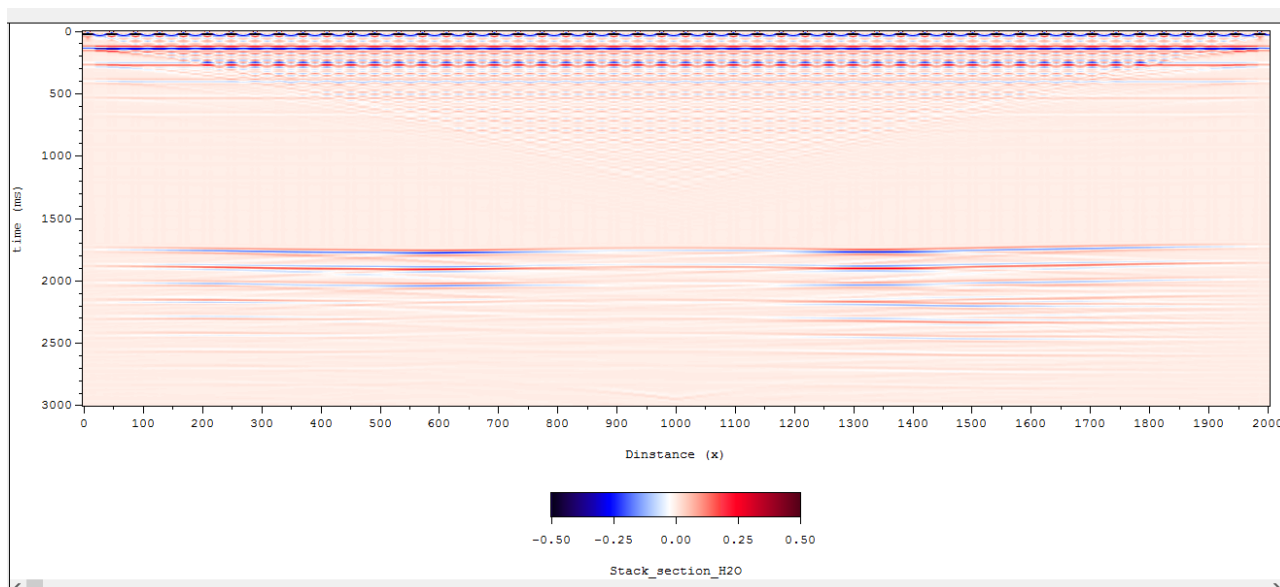
Μετά τη δυναμική διόρθωση NMO πραγματοποιείται άθροιση των διορθωμένων σειсмоγραμμάτων, που έχει ως αποτέλεσμα τη σεισμική τομή υπέρθεσης (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.6: Τομή υπέρθεσης του πρώτου σεναρίου. Ανακλάσεις από την κορυφή των Εβαποριτών και των ψαμμιτικών στρωμάτων του ταμιεντήρα A1(1) 2010ms, A2(2) 2043ms, B(3) 2090ms και C(4) 2120ms.

Για να εντοπιστούν οι ανακλάσεις από τους ταμιεντήρες και να υπάρχει μία καλύτερη οπτική απεικόνιση της τομής υπέρθεσης, θεωρήθηκε αναγκαία η

απεικόνιση της στο λογισμικό *Transform* (Σχήμα 4.7). Ο οριζόντιος άξονας αναπαριστά το μήκος του μοντέλου σε m, ενώ ο κάθετος το διπλό κατακόρυφο χρόνο σε ms. Ακόμα παρατηρούνται οι ανακλάσεις από τους ταμιευτήρες, καθώς και οι ανακλάσεις από τα στρώματα τις θάλασσας και των εβαπορίτων.



Σχήμα 4.7: Τομή υπέρθεσης του πρώτου σεναρίου στο λογισμικό Transform.

Όπως φαίνεται και από την τομή δεν μπορούν να ξεχωρίσουν εύκολα οι ανακλάσεις από τους ενδιάμεσους ταμιευτήρες λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων και της μεγάλης περιόδου της κυματομορφής.

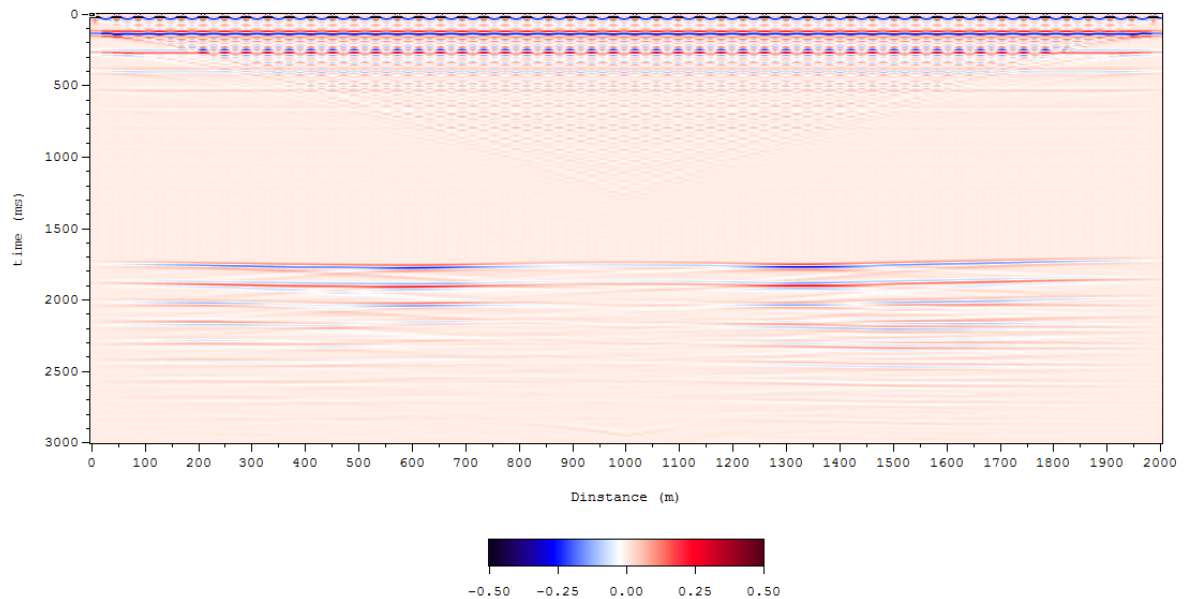
4.3.2 Σενάριο 2: Πλήρωση όλου του πρώτου στρώματος (A1) του ταμιευτήρα με 50% CO_2

Το δεύτερο σενάριο σχεδιάστηκε με τη λογική να εισαχθεί 50% διοξείδιο του άνθρακα στο πρώτο στρώμα του ταμιευτήρα, δηλαδή τον A1 (Σχήμα 4.1). Συγκεκριμένα, αυτό που διαφοροποιήθηκε σε σχέση με το πρώτο σενάριο ήταν η αλλαγή της ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων V_p και της πυκνότητας (Πίνακας 4.3). Η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων V_s έχει παραμείνει σταθερή, εφόσον δεν επηρεάζεται από τα ρευστά, όπως σημειώθηκε και παραπάνω (βλ. παράγραφο 4.2).

Πίνακας 4.3: Ταχύτητες Ταμιευτήρων 2^{ου} σεναρίου

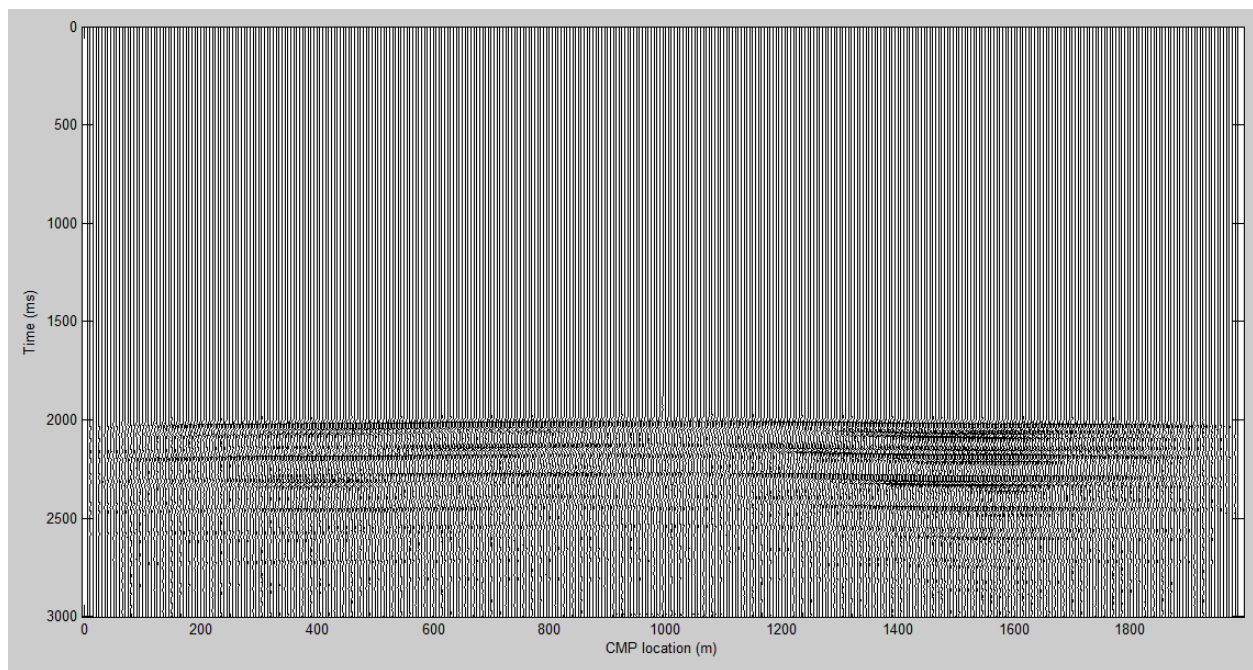
Ταμιευτήρες	Ταχύτητες Vp	Ταχύτητες Vs	Πυκνότητες
A1	3734m/s	2300 m/s	2.13 g/cm ³
A2	3850 m/s	2100 m/s	2.34 g/cm ³
B	3990 m/s	2240 m/s	2.31 g/cm ³
C	3890 m/s	2100 m/s	2.28 g/cm ³

Αντίστοιχα με το προηγούμενο σενάριο παρουσιάζεται η τομή υπέρθεσης (Σχήμα 4.8).



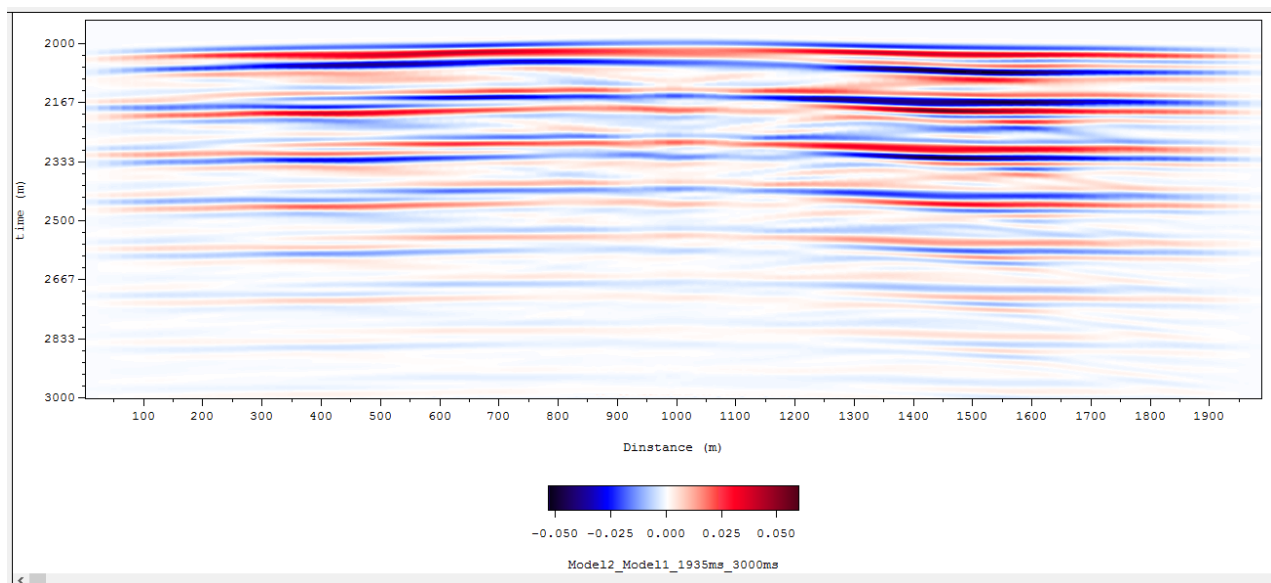
Σχήμα 4.8: Τομή υπέρθεσης 2^{ου} σεναρίου. Απεικόνιση στο λογισμικό Transform.

Για να εντοπιστεί η θέση του θυσάνου του διοξειδίου του άνθρακα μέσω της σεισμικής ανάκλασης, αφαιρέθηκαν τα πλάτη από τα σεισμικά ίχνη μεταξύ των τομών υπέρθεσης από το 1^ο και 2^ο σενάριο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 4.9.



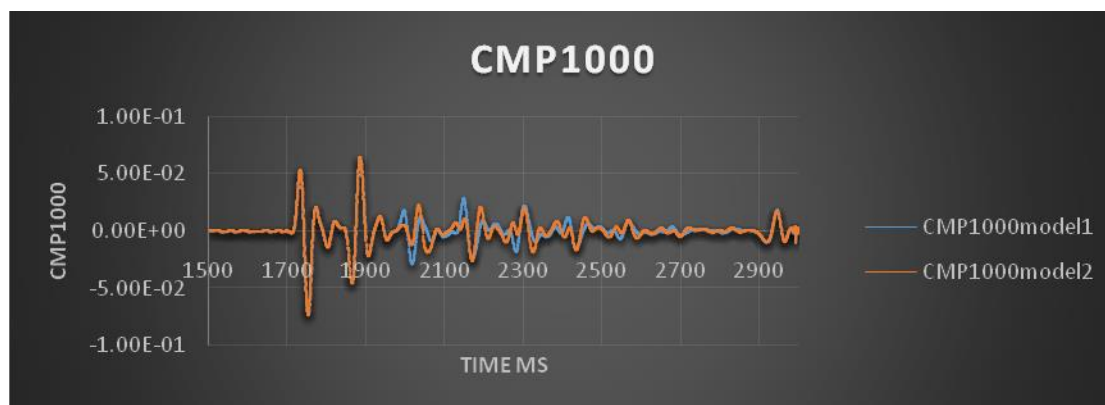
Σχήμα 4.9: Διαφορά τομών υπέρθεσης του 2^{ου} σεναρίου από το 1^ο σενάριο.

Για να μπορέσουν οι ανακλάσεις να διακριθούν καλύτερα, η τομή υπέρθεσης απεικονίστηκε στο λογισμικό *Transform* και ιδιαίτερα για χρόνους από τα 2000ms μέχρι και τα 3000ms (Σχήμα 4.10).



Σχήμα 4.10: Διαφορά τομών υπέρθεσης του 2^{ου} σεναρίου από το 1^ο σενάριο. Απεικόνιση από τα 2000 έως τα 3000 ms

Για να διακριθούν οι ανακλάσεις των ψαμμιτικών στρωμάτων του ταμιευτήρα και να διαχωριστούν από τις πολλαπλές ανακλάσεις, που προέρχονται από τη θάλασσα και από τα άλλα στρώματα, αναπαραστάθηκε επιλεκτικά ένα σεισμικό ίχνος, που αντιστοιχεί στη θέση των 1000m, των τομών υπέρθεσης του 1^{ου} και του 2^{ου} σεναρίου για χρόνους καταγραφής από τα 1500 ms μέχρι και τα 3000ms (Σχήμα 4.11).



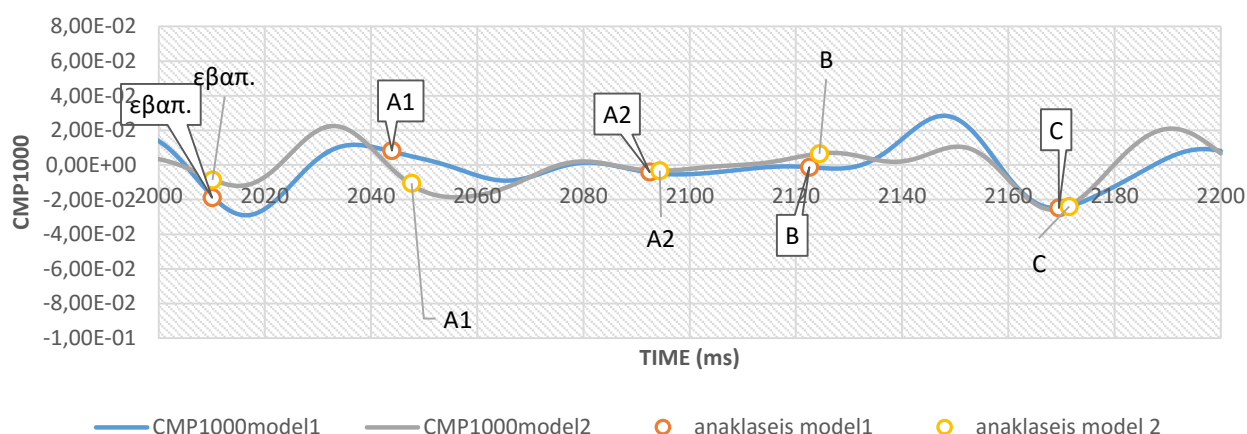
Σχήμα 4.11: Απεικόνιση των σεισμικών ίχνων της τομής υπέρθεσης του 1^{ου} και του 2^{ου} σεναρίου για χρόνους καταγραφής 1500-3000ms. Τα ίχνη αντιστοιχούν στα 1000m της τομής.

Στο σχήμα 4.12 ξεχωρίζουν οι διαφορές στους χρόνους καταγραφής και στα πλάτη των ανακλώμενων κυμάτων μεταξύ των δύο σεναρίων.

Ειδικότερα, στα εν λόγω σεισμικά ίχνη του πρώτου και του δεύτερου σεναρίου παρατηρείται διαφορά στον χρόνο άφιξης των ανακλάσεων από τον πυθμένα του ταμιευτήρα A1 (κορυφή του A2) που ισούται περίπου με 3,72 ms. Η καθυστέρηση στην άφιξη της ανάκλασης στο 2^ο σενάριο είναι αναμενόμενη, εφόσον σε αυτή την περίπτωση ο ταμιευτήρας A1 50% διοξειδίου του άνθρακα και επομένως έχει μικρότερη ταχύτητα διάδοσης των P-κυμάτων.

Για τις ανακλάσεις που προέρχονται από τους επόμενους ανακλαστήρες παρατηρείται περίπου η ίδια διαφορά χρόνου (3,7 ms – Πίνακας 4.4), η οποία όμως οφείλεται μόνο στο πρώτο στρώμα (A1) του ταμιευτήρα. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι τα υπόλοιπα στρώματα στο 2^ο σενάριο είναι κορεσμένα μόνο με νερό, όπως και στο 1^ο σενάριο, με αποτέλεσμα να μην μεταβληθούν περαιτέρω οι χρόνοι άφιξης των ανακλώμενων κυμάτων.

Ανάκλαση Μοντέλων 1 και 2



Σχήμα 4.12: Απεικόνιση των σεισμικών ιχνών της τομής υπέρθεσης του 1^{ου} και του 2^{ου} σεναρίου για χρόνους καταγραφής 2000-2200ms, Με τους κύκλους επισημαίνονται οι χρόνοι όπου θεωρητικά (υπολογισμός από τα πάχη και τις τμηματικές ταχύτητες) αναμένονται οι ανακλάσεις από τα στρώματα του ταμιευτήρα. Τα ίχνη αντιστοιχούν στα 1000m της τομής.

Πίνακας 4.4: Χρόνοι ανάκλασης σεισμικών κυμάτων για πρώτο και δεύτερο σενάριο, καθώς και οι διαφορές τους, όπως υπολογίστηκαν από τα πάχη και τις τμηματικές ταχύτητες των σχηματισμών στη θέση 968m. Οι χρόνοι ανάκλασης είναι υπολογισμένοι την κορυφή των σχηματισμών

x = 968	Σενάριο1 t(ms)	Σενάριο 2 t(ms)	Διαφορές t(ms)
Άμμος Άργιλοι	133,3	133,3	0
Εβαπορίτες	1746,9	1746,9	0
Ταμιευτήρας A1	2010,09	2010,08	0
Ταμιευτήρας A2	2043,9	2047,62	3,72
Ταμιευτήρας B	2090,7	2094,37	3,67
Ταμιευτήρας C	2120,7	2124,45	3,75
Εβαπορίτες	2167,7	2171,45	3,75

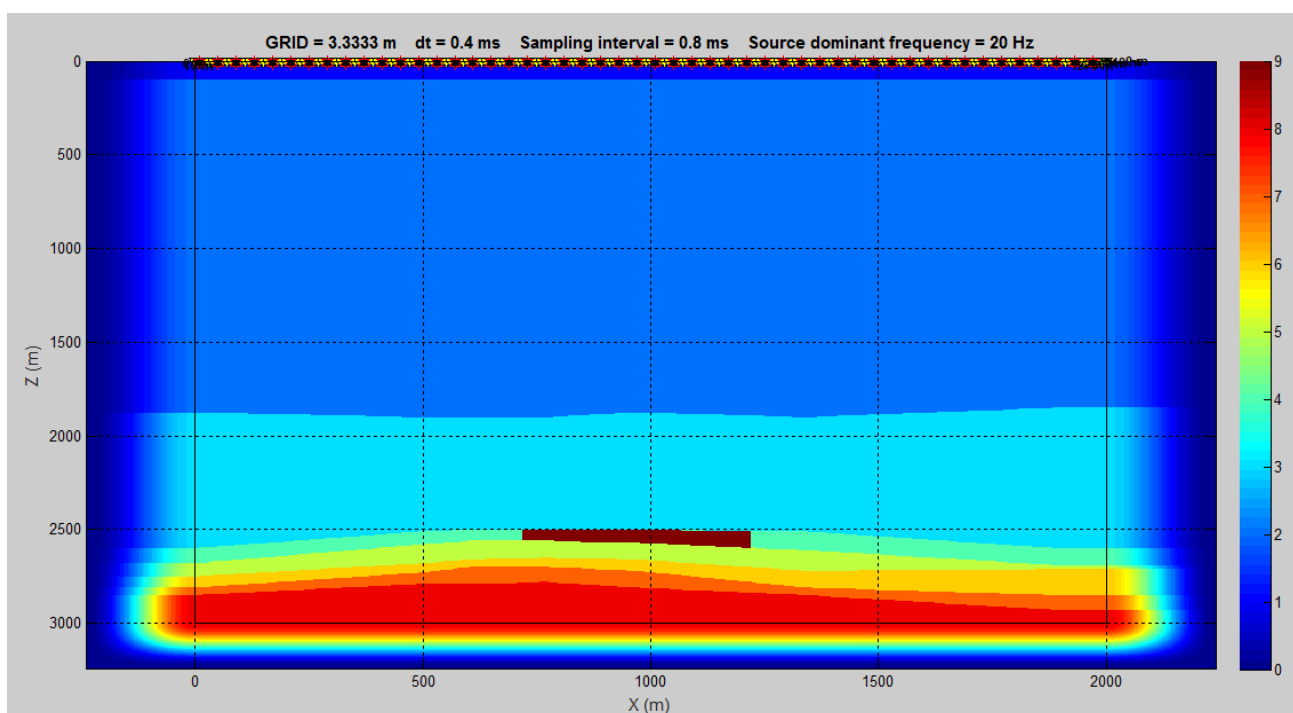
4.3.3 Σενάριο 3: Πλήρωση τμήματος του στρώματος A1 με 50% CO₂

Στο τρίτο σενάριο έχει γίνει η παραδοχή εισαγωγής διοξειδίου του άνθρακα κατά 50% σε τμήμα του πρώτου στρώματος (A1) του ταμιευτήρα (Σχήμα 4.13). Πιο συγκεκριμένα μοντελοποιήθηκε η εισαγωγή CO₂ από τη γεώτρηση PB-14 (Σχήμα 4.13) , η οποία βρίσκεται στα 968m του μοντέλου. Θεωρήθηκε ότι ο θύσανος του CO₂ εκτείνεται 250m αριστερά και 250m δεξιά της γεώτρησης, πράγμα που σημαίνει

ότι οριοθετείται από τα 718m μέχρι και τα 1218m του μοντέλου. Ουσιαστικά, οι διαφορές σε σχέση με το πρώτο σενάριο απαντώνται στις ταχύτητες των διαμήκων κυμάτων, αλλά και στην πυκνότητα του A1 για το προαναφερθέν τμήμα του.

Πίνακας 4.5: Ταχύτητες Ταμειυτήρων 3^{ου} σεναρίου από τα 718m μέχρι και τα 1218m

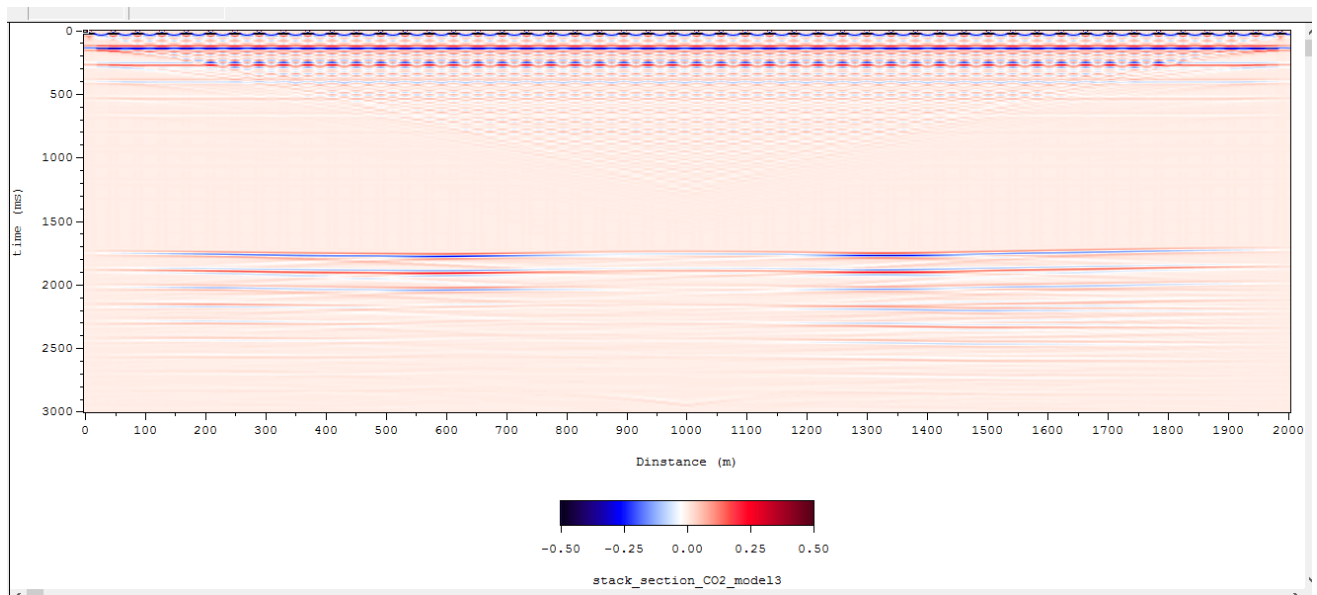
Ταμειυτήρες	Ταχύτητες Vp	Ταχύτητες Vs	Πυκνότητες
A1	3734m/s	2300 m/s	2.13 g/cm ³
A2	3850 m/s	2100 m/s	2.34 g/cm ³
B	3990 m/s	2240 m/s	2.31 g/cm ³
C	3890 m/s	2100 m/s	2.28 g/cm ³



Σχήμα 4.13: Μοντέλο 3^{ου} σεναρίου. Τμήμα του A1, που αντιστοιχεί στα 718-1218m του μοντέλου, είναι πληρωμένο με 50% CO₂

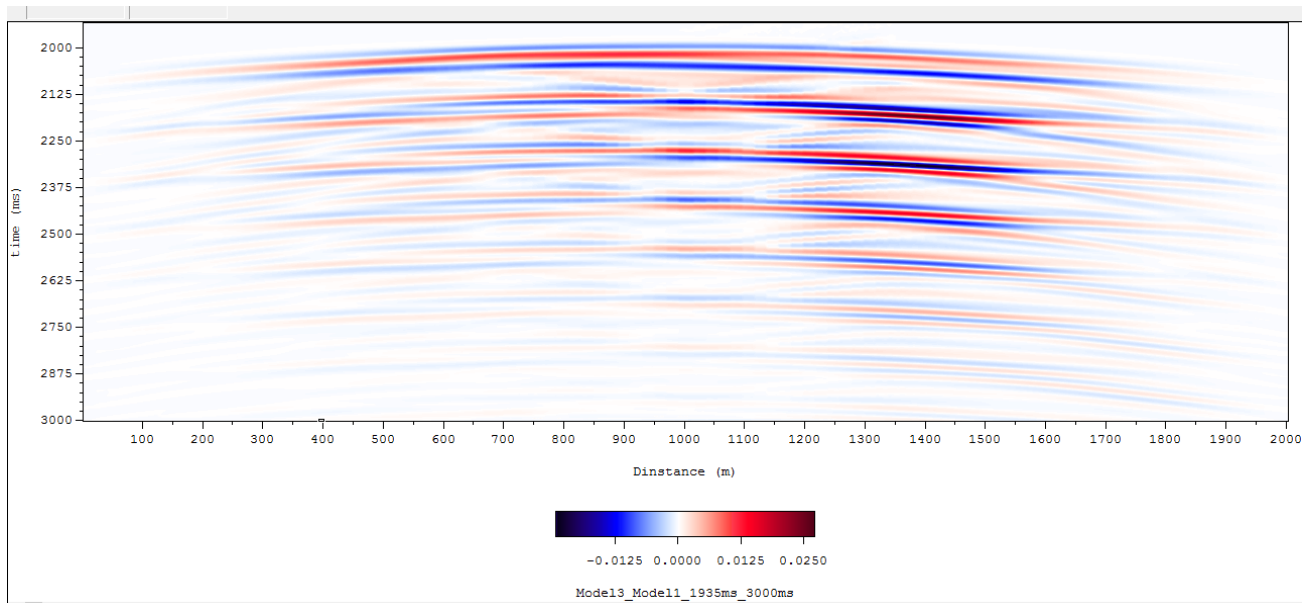
Αντίστοιχα, όπως και με τα προηγούμενα σενάρια, η δημιουργία της τομής υπέρθεσης ήταν αναγκαία για τον εντοπισμό του θυσάνου του διοξειδίου του άνθρακα (Σχήμα 4.14).

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε αφαίρεση των ιχνών από τις τομές υπέρθεσης του πρώτου (Σχήμα 4.15). Για να μπορέσουν οι ανακλάσεις να διακριθούν καλύτερα, οι τομές απεικονίστηκαν στο λογισμικό *Transform* και ιδιαίτερα από τα 2000ms μέχρι και τα 3000ms.



Σχήμα 4.14: Τομή υπέρθεσης 3^{ου} σεναρίου. Απεικόνιση στο λογισμικό Transform

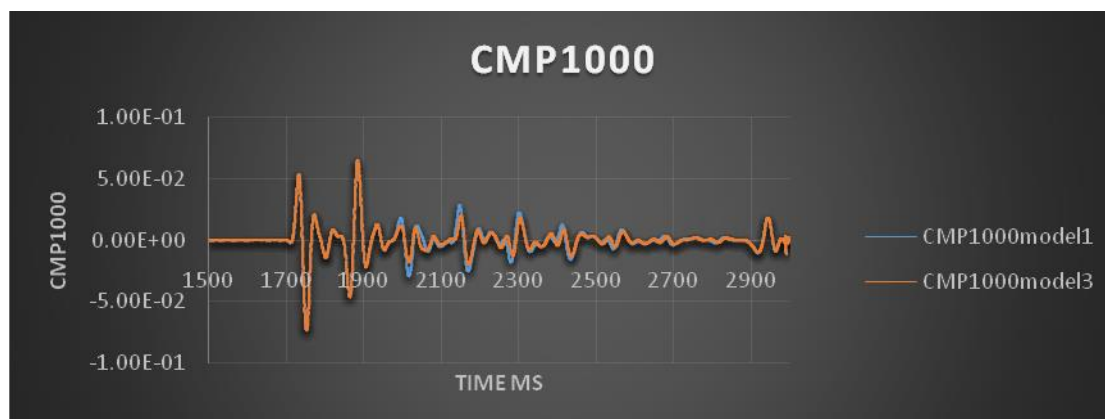
Σε αυτή την περίπτωση (3^ο σενάριο- 1^ο σενάριο), παρατηρείται ότι ανακλάσεις παρουσιάζονται εντονότερα στο κεντρικό τμήμα της τομής, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι μόνο το κεντρικό τμήμα του A1 έχει πληρωθεί με 50% CO₂.



Σχήμα 4.15: Διαφορά τομών υπέρθεσης του 3^{ου} σεναρίου από το 1^ο σενάριο. Απεικόνιση από τα 2000 έως τα 3000 ms

Διαφορές παρατηρούνται κυρίως μεταξύ των πλατών των CMP1000 του πρώτου και του τρίτου σεναρίου (Σχήμα 4.16), όπως είναι λογικό, εφόσον βρίσκεται

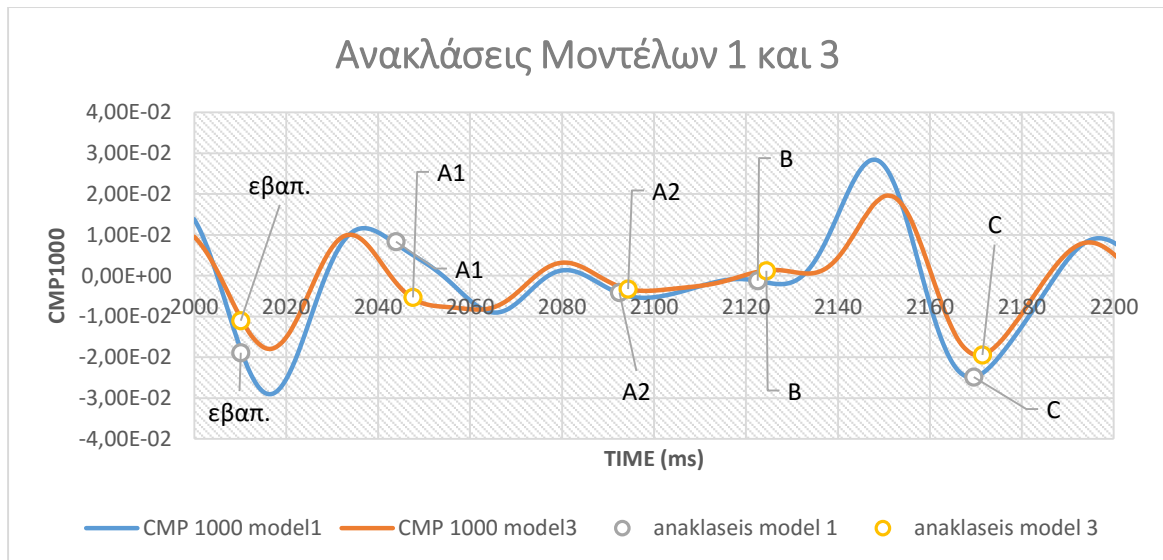
στη θέση που συναντάμε το μικρό στρώμα διοξειδίου του άνθρακα. Στα υπόλοιπα δεν παρατηρείται κάποια διαφορά, αφού περιέχουν μόνο νερό.



Σχήμα 4.16: Απεικόνιση των σεισμικών ιχνών της τομής υπέρθεσης του 1^{ου} και του 3^{ου} σεναρίου για χρόνους καταγραφής 1500-3000ms. Τα ίχνη αντιστοιχούν στα 1000m της τομής.

Ειδικότερα, στα εν λόγω σεισμικά ίχνη του πρώτου και του τρίτου σεναρίου παρατηρείται διαφορά στον χρόνο άφιξης των ανακλάσεων από τον πυθμένα του μικρού τμήματος που έχει γεμίσει με διοξείδιο στο πρώτο στρώμα του (A1) ταμιευτήρα (κορυφή του A2) που ισούται περίπου με 3,68 ms. Η καθυστέρηση στην άφιξη της ανάκλασης στο 3^ο σενάριο είναι αναμενόμενη, εφόσον σε αυτή την περίπτωση το στρώμα A1 περιέχει 50% διοξείδιο του άνθρακα και επομένως έχει μικρότερη ταχύτητα διάδοσης των P-κυμάτων.

Για τις ανακλάσεις που προέρχονται από τους επόμενους ανακλαστήρες παρατηρείται περίπου η ίδια διαφορά χρόνου (3,7 ms – Πίνακας 4.6), η οποία όμως οφείλεται κατά κύριο λόγο μόνο στον A1. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι τα υπόλοιπα στρώματα του ταμιευτήρα στο 3^ο σενάριο είναι κορεσμένοι μόνο με νερό, όπως και στο 1^ο σενάριο, με αποτέλεσμα να μην μεταβληθούν περαιτέρω οι χρόνοι άφιξης των ανακλώμενων κυμάτων.



Σχήμα 4.17: Απεικόνιση των σεισμικών ιχνών της τομής υπέρθεσης του 1^{ου} και του 3^{ου} σεναρίου για χρόνους καταγραφής 2000-2200ms. Με τους κύκλους επισημαίνονται οι χρόνοι όπου θεωρητικά (υπολογισμός από τα πάχη και τις τμηματικές ταχύτητες) αναμένονται οι ανακλάσεις από τα στρώματα του ταμιευτήρα. Τα ίχνη αντιστοιχούν στα 1000m της τομής.

Αντίστοιχα και στο σχήμα 4.17 βλέπουμε ότι οι ανακλάσεις μεταξύ των στρωμάτων του ταμιευτήρα διαφέρουν στους χρόνους ανάκλασης.

Πίνακας 4.6: Χρόνοι ανάκλασης σεισμικών κυμάτων για πρώτο και τρίτο σενάριο, καθώς και οι διαφορές τους, όπως υπολογίστηκαν από τα πάχη και τις τμηματικές ταχύτητες των σχηματισμών στη θέση 968m. Οι χρόνοι ανάκλασης είναι υπολογισμένοι από την κορυφή των σχηματισμών

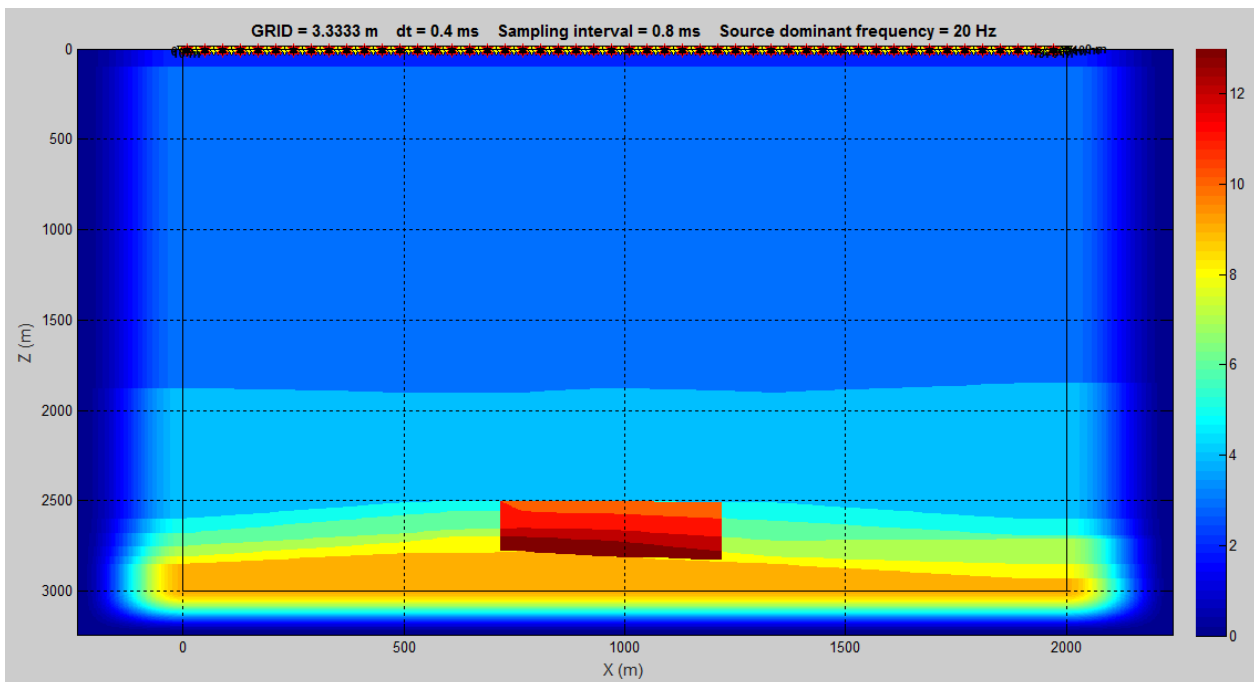
x = 968	Σενάριο1 t(ms)	Σενάριο 3 t(ms)	Διαφορές t(ms)
Άμμος Άργιλοι	133,3	133,3	0
Εβαπορίτες	1746,9	1746,9	0
Ταμιευτήρας A1	2010,09	2010,09	0
Ταμιευτήρας A2	2043,9	2047,588	3,688
Ταμιευτήρας B	2090,7	2094,34	3,64
Ταμιευτήρας C	2120,7	2124,45	3,75
Εβαπορίτες	2167,7	2171,45	3,75

4.3.4 Σενάριο 4: Πλήρωση τμήματος όλων των στρωμάτων του ταμιευτήρα με 50% CO₂

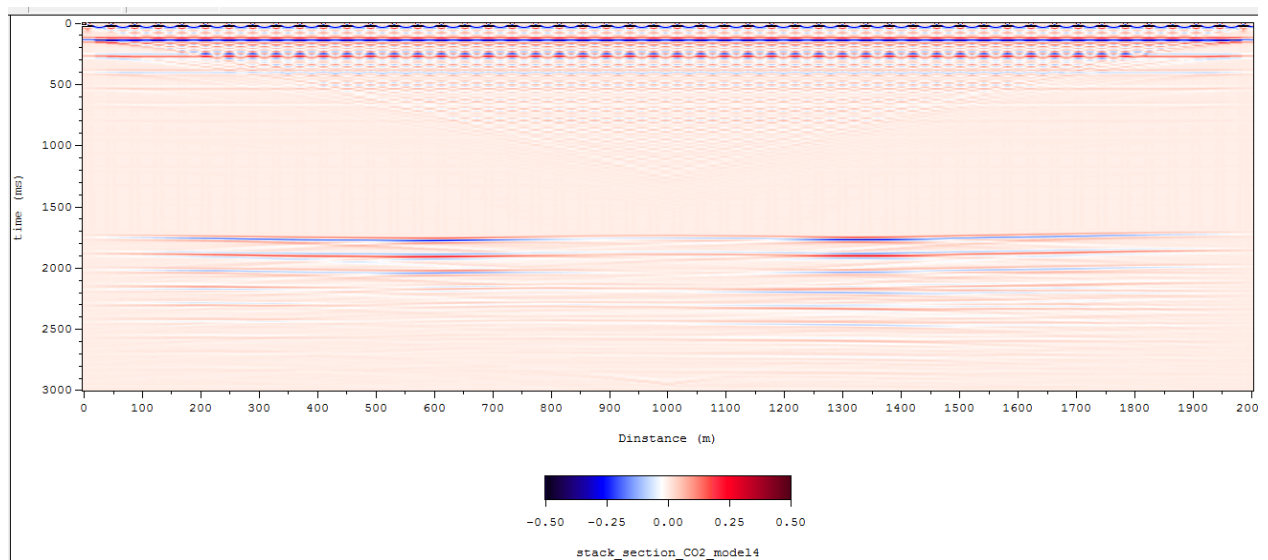
Στο τέταρτο σενάριο, η εισαγωγή του διοξειδίου του άνθρακα αφορά και τα τέσσερα στρώματα του ταμιευτήρα (Σχήμα 4.18). Το διοξείδιο εισάγεται από τη γεώτρηση PB-14, σε συνολική απόσταση 500m αριστερά και δεξιά της, το οποίο σημαίνει ότι φτάνει από τα 718m μέχρι και τα 1218m. Σε αυτό το σενάριο επηρεάζονται οι ταχύτητες των διαμήκων κυμάτων V_p σε όλους τους περατούς σχηματισμούς του ταμιευτήρα, καθώς και οι πυκνότητες των.

Πίνακας 4.7: Ταχύτητες στρωμάτων του ταμιευτήρα, 4^ο σεναρίου από τα 718m μέχρι και τα 1218m

Ταμιευτήρες	Ταχύτητες V _p	Ταχύτητες V _s	Πυκνότητες
A1	3734m/s	2300 m/s	2.139g/cm ³
A2	3472.44 m/s	2100 m/s	2.1 g/cm ³
B	3598.71 m/s	2240 m/s	2.123 g/cm ³
C	3454.40 m/s	2100 m/s	2.1 g/cm ³

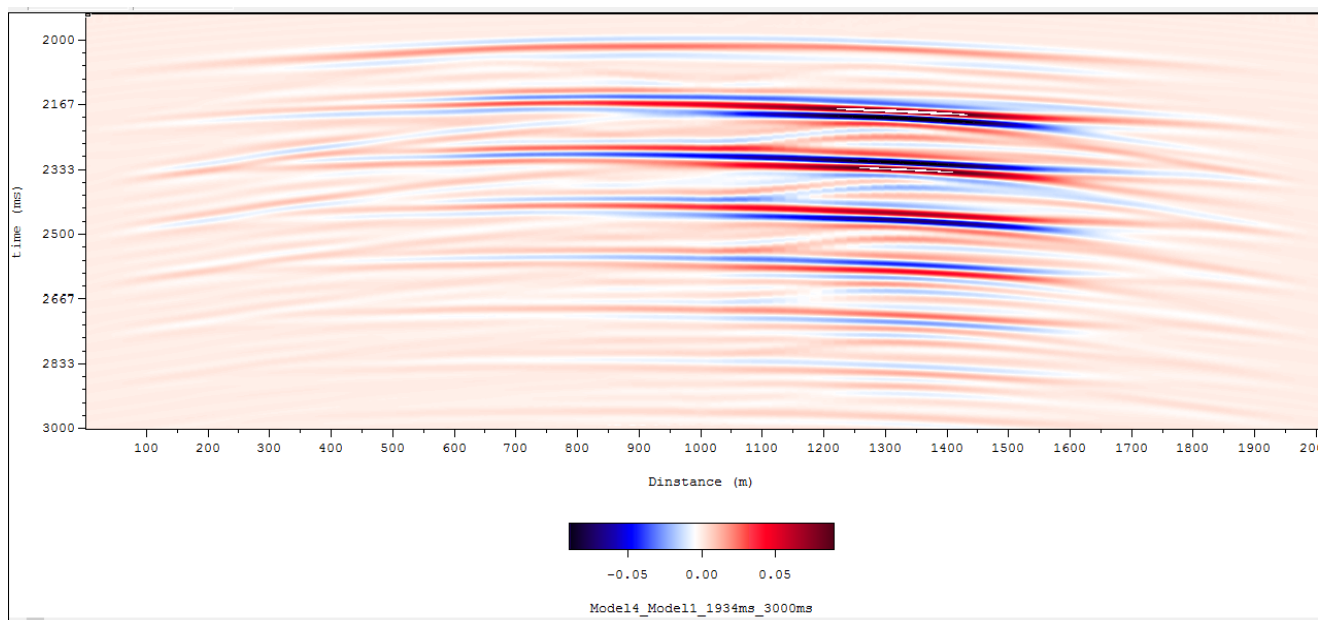


Σχήμα 4.18: Μοντέλο 4^ο σεναρίου από Matlab. Τμήματα των στρωμάτων, που αντιστοιχούν στα 718-1218m του μοντέλου, είναι πληρωμένο με 50% CO₂



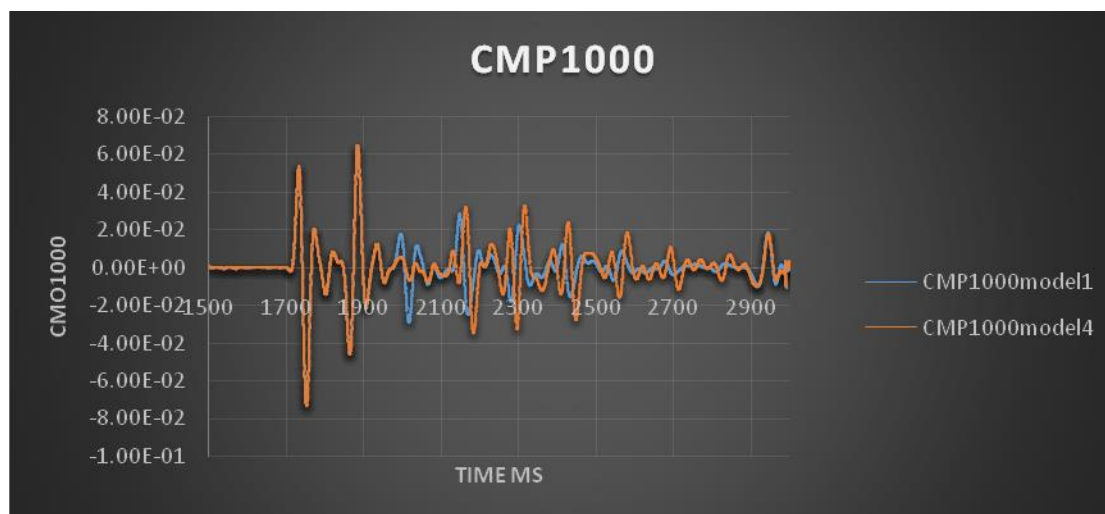
Σχήμα 4.19: Τομή υπέρθεσης 4^{ου} σεναρίου στο transform

Όπως και στα προηγούμενα σενάρια, έτσι και σε αυτό ήταν απαραίτητη η δημιουργία και η εξέταση της τομής υπέρθεσης του τέταρτου σεναρίου (Σχήμα 4.19). Επιπλέον εξετάστηκε η διαφορά των ιχνών στις τομές υπέρθεσης του πρώτου σεναρίου από το τέταρτο. Η διαφορά φαίνεται στο σχήμα 4.20. Παρατηρείται ότι οι ανακλάσεις είναι εντονότερες σε αυτή την τομή και είναι λογικό, εφόσον υπάρχουν τέσσερα στρώματα με διοξείδιο του άνθρακα.



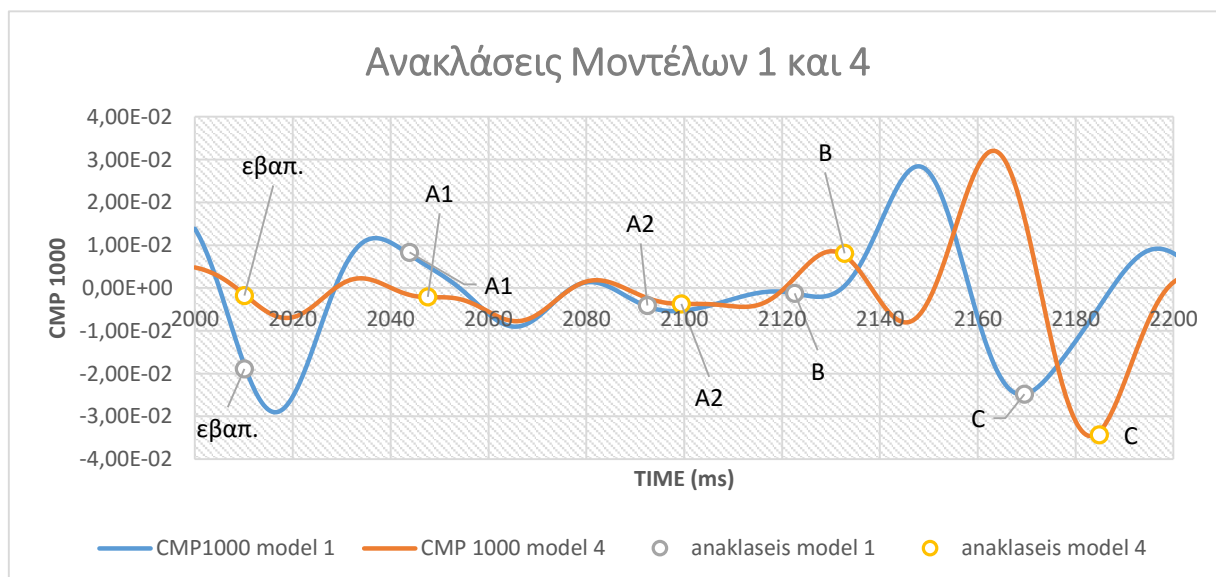
Σχήμα 4.20: Διαφορά τομών υπέρθεσης 4^{ου} σεναρίου από το 1^ο στο transform από τα 2000 έως τα 3000 ms

Στο σχήμα 4.21 παρουσιάζονται διαφορές στους χρόνους των ανακλάσεων και στα πλάτη των ιχνών μεταξύ των σεναρίων ένα και τέσσερα.



Σχήμα 4.21: Απεικόνιση των σεισμικών ιχνών της τομής υπέρθεσης του 1^{ου} και του 4^{ου} σεναρίου για χρόνους καταγραφής 1500-3000ms. Τα ίχνη αντιστοιχούν στα 1000m της τομής.

Στο σχήμα 4.22 φαίνονται ακόμα πιο καθαρά, οι διαφορές μεταξύ των χρόνων ανάκλασης των στρωμάτων και θα μπορούσε να σημειωθεί ότι είναι το σενάριο, στο οποίο παρατηρείται και η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των χρόνων. Αυτό βέβαια φαίνεται λογικό, εφόσον το πρώτο σενάριο είναι κορεσμένο μόνο σε νερό, ενώ αντίθετα το τέταρτο περιέχει διοξείδιο στα στρώματα του ταμιευτήρα. Έτσι, έχουμε ως αποτέλεσμα την αλλαγή των ταχυτήτων και πυκνοτήτων σε όλα τα στρώματα των ταμιευτήρων.



Σχήμα 4.22: Απεικόνιση των σεισμικών ιχνών της τομής υπέρθεσης του 1^{ου} και του 4^{ου} σεναρίου για χρόνους καταγραφής 2000-2200ms. Με τους κύκλους επισημαίνονται οι χρόνοι όπου θεωρητικά

(υπολογισμός από τα πάχη και τις τμηματικές ταχύτητες) αναμένονται οι ανακλάσεις από τα στρώματα του ταμιευτήρα. Τα ίχνη αντιστοιχούν στα 1000m της τομής.

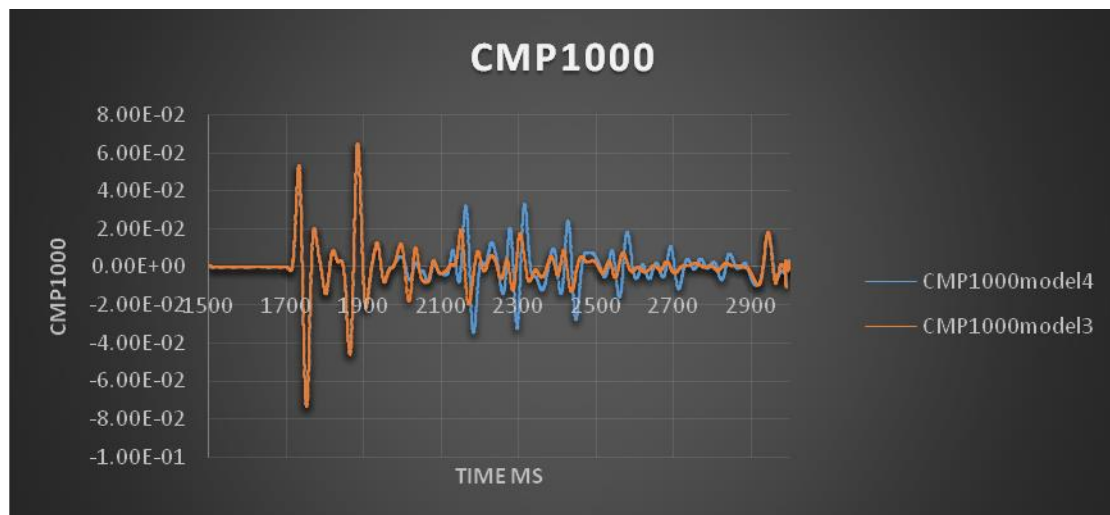
Αυτό που παρατηρείται σε αυτήν την περίπτωση είναι ότι η διαφορά στους χρόνους (Πίνακας 4.8) είναι αυξανόμενη σε σχέση με τις διαφορές στα προηγούμενα σενάρια που ήταν σταθερή. Ειδικότερα παρατηρούμε ότι η διαφορά ξεκινάει από τα 3.68ms και καταλήγει στα 17,177 ms.

Επιπλέον αυτό που μπορεί να παρατηρηθεί είναι ότι στο σχήμα 4.22 φαίνονται οι ανακλάσεις από το πάνω όριο του ταμιευτήρα A1 και του κάτω ορίου του στρώματος C. Μεταξύ λοιπόν αυτών των κορυφών δεν ξεχωρίζει κάποια ανάκλαση από τις διαχωριστικές επιφάνειες μεταξύ των ψαμμιτικών στρωμάτων.

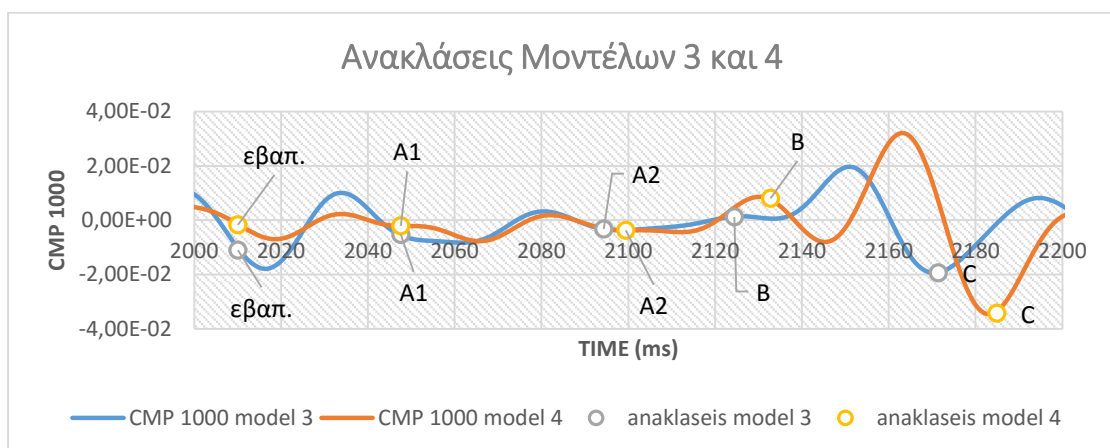
Πίνακας 4.8: Χρόνοι ανάκλασης σεισμικών κυμάτων για πρώτο και τέταρτο σενάριο, καθώς και οι διαφορές τους, όπως υπολογίστηκαν από τα πάχη και τις τμηματικές ταχύτητες των σχηματισμών στη θέση 968m. Οι χρόνοι ανάκλασης είναι υπολογισμένοι από την κορυφή των σχηματισμών

x = 968	Σενάριο1 t(ms)	Σενάριο 4 t(ms)	Διαφορές t(ms)
Άμμος Άργιλοι	133,3	133,3	0
Εβαπορίτες	1746,9	1746,9	0
Ταμιευτήρας A1	2010,09	2010,09	0
Ταμιευτήρας A2	2043,9	2047,588	3,688
Ταμιευτήρας B	2090,7	2099,424	8,724
Ταμιευτήρας C	2120,7	2132,77	12,07
Εβαπορίτες	2167,7	2184,877	17,177

Τέλος, συγκρίνονται τα ίχνη του τρίτου και του τέταρτου σεναρίου (Σχήμα 4.23 και 4.24), στα οποία παρατηρούνται μικρές διαφορές μεταξύ των χρόνων ανάκλασης για τα στρώματα A2, B και C. Επιπλέον, βλέπουμε ότι για το στρώμα A1 ο χρόνος ανάκλασης και στα δύο ίχνη είναι ίδιος, φαινόμενο που εξηγείται με το ότι και τα δύο σενάρια περιέχουν διοξείδιο του άνθρακα. Στα υπόλοιπα στρώματα του ταμιευτήρα σημειώνονται διαφορές, εξαιτίας του ότι στο τρίτο σενάριο υπάρχει μόνο νερό στα στρώματα A2, B και C, ενώ στο τέταρτο υπάρχει σε ποσοστό πενήντα τοις εκατό διοξείδιο του άνθρακα σε όλα τα στρώματα του ταμιευτήρα.



Σχήμα 4.23: Απεικόνιση των σεισμικών ιχνών της τομής υπέρθεσης του 3^{ου} και του 4^{ου} σεναρίου για χρόνους καταγραφής 1500-3000ms. Τα ίχνη αντιστοιχούν στα 1000m της τομής.



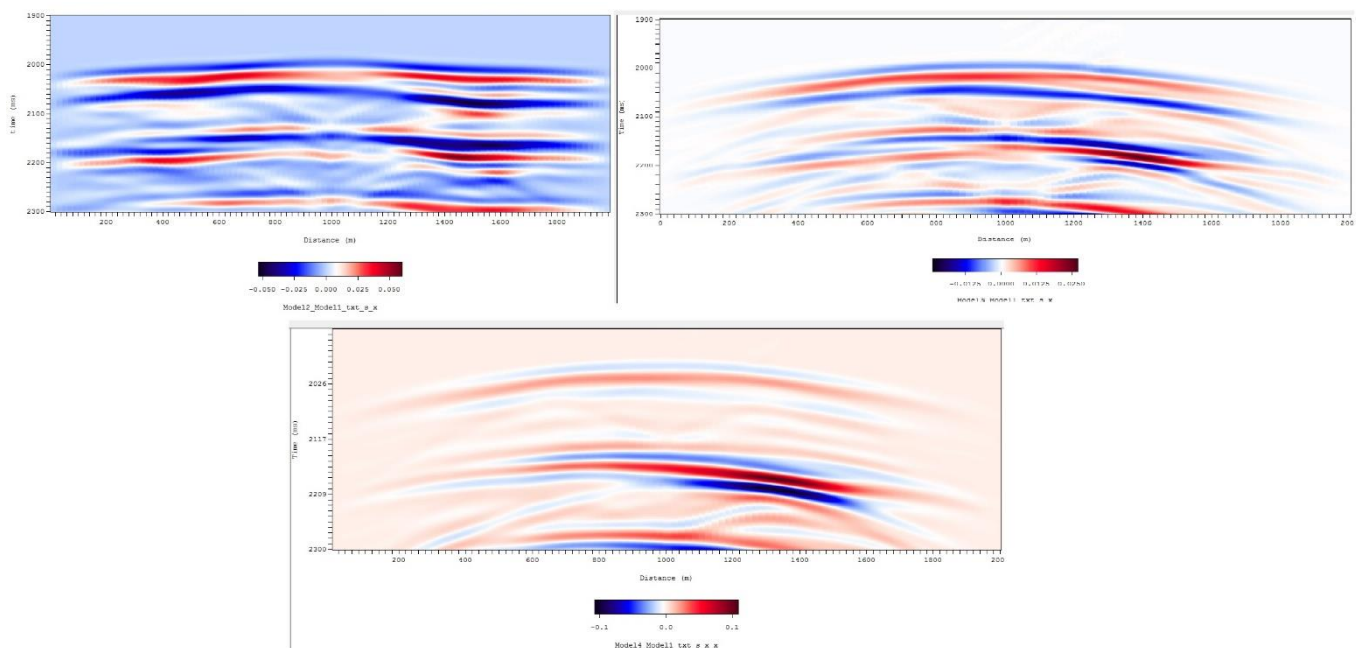
Σχήμα 4.24: Απεικόνιση των σεισμικών ιχνών της τομής υπέρθεσης του 3^{ου} και του 4^{ου} σεναρίου για χρόνους καταγραφής 2000-2200ms. Με τους κύκλους επισημαίνονται οι χρόνοι όπου θεωρητικά (υπολογισμός από τα πάχη και τις τμηματικές ταχύτητες) αναμένονται οι ανακλάσεις από τα στρώματα του ταμιευτήρα. Τα ίχνη αντιστοιχούν στα 1000m της τομής.

Πίνακας 4.9: Χρόνοι ανάκλασης σεισμικών κυμάτων για πρώτο και τέταρτο σενάριο, καθώς και οι διαφορές τους, όπως υπολογίστηκαν από τα πάχη και τις τμηματικές ταχύτητες των σχηματισμών στη θέση 968m. Οι χρόνοι ανάκλασης είναι υπολογισμένοι από την κορυφή των σχηματισμών.

x = 968	Σενάριο 3 t(ms)	Σενάριο 4 t(ms)	Διαφορές t(ms)
Άμμος Άργιλοι	133,3	133,3	0
Εβαπορίτες	1746,9	1746,9	0

Ταμιευτήρας Α1	2010,09	2010,09	0
Ταμιευτήρας Α2	2047,588	2047,588	0
Ταμιευτήρας Β	2094,34	2099,424	5,084
Ταμιευτήρας C	2124,45	2132,77	8,32
Εβαπορίτες	2171,45	2184,877	13,427

Στον πίνακα 4.9 παρατηρούνται αντίστοιχα μεγάλες διαφορές στους χρόνους μεταξύ των σεναρίων 3^{ου} και 4^{ου}. Αυτό που διαφέρει σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια είναι ότι η διαφορά για το στρώμα Α1 είναι μηδενική, ενώ στα υπόλοιπα στρώματα παρατηρούνται διαφορές που ξεκινάνε από τα 5,084ms μέχρι και τα 13,427ms.



Σχήμα 4.25: Σύγκριση τομών υπέρθεσης και των τριών διαφορών των σεναρίων από τα 1900ms μέχρι και τα 2300ms.

Στο Σχήμα 4.25 παρατηρούνται οι πολλαπλές ανακλάσεις καθώς και οι σεισμικές ανακλάσεις των στρωμάτων του ταμιευτήρα. Το πρόβλημα είναι ότι οι σεισμικές ανακλάσεις διαχωρίζονται δύσκολα από τις πολλαπλές ανακλάσεις. Το σχήμα που βρίσκεται πάνω αριστερά είναι η τομή της διαφοράς του δεύτερου από το πρώτο σενάριο, πάνω δεξιά βρίσκεται η τομή της διαφοράς του τρίτου από το πρώτο σενάριο και στο κάτω σχήμα φαίνεται η τομή διαφοράς του τέταρτου από το πρώτο σενάριο.

5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η προσομοίωση της παρακολούθησης εισαγωγής CO₂ σε ταμιευτήρες του κοιτάσματος πετρελαίου του Πρίνου. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε με την χρήση συνθετικών δεδομένων σεισμικής ανάκλασης μέσω αλγορίθμων (Matlab) που αναπτύχθηκαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η εν λόγω προσομοίωση βασίστηκε στην θεώρηση ότι αναμένονται διαφοροποιήσεις, τόσο στην πυκνότητα, όσο και στην ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων (P) κυμάτων των στρωμάτων του ταμιευτήρα μετά την εισαγωγή του CO₂.

Το βασικό πλεονέκτημα της εν λόγω μεθοδολογίας είναι η ευελιξία διαμόρφωσης πλήθος μοντέλων που αναπαριστούν την δομή του ταμιευτήρα, αλλά και η δυνατότητα ανάπτυξης οποιουδήποτε είδους σεναρίου πλήρωσης των στρωμάτων αυτών, χωρίς να είναι απαραίτητη διεξαγωγή πραγματικών πειραμάτων σεισμικής ανάκλασης, παρά μόνο η χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Για την επίτευξη του στόχου της διπλωματικής εργασίας δημιουργήθηκαν τέσσερα διαφορετικά σενάρια πλήρωσης CO₂ σε ταμιευτήρες του κοιτάσματος πετρελαίου του Πρίνου:

1. Στο *πρώτο* σενάριο θεωρήθηκε ότι τα στρώματα του ταμιευτήρα είναι πληρωμένα εξολοκλήρου (100%) με νερό. Το σενάριο αυτό υλοποιήθηκε με στόχο την αναπαράσταση της κατάστασης των ταμιευτήρων πριν την έναρξη εισαγωγής CO₂.
2. Στο *δεύτερο* σενάριο προσομοιώθηκε η προσθήκη 50% διοξειδίου του άνθρακα σε όλο το μήκος του πρώτου ψαμμιτικού ορίζοντα (A1).
3. Στο *τρίτο* σενάριο προσομοιώθηκε η προσθήκη 50% διοξειδίου σε τμήμα του πρώτου ψαμμιτικού ορίζοντα (A1).
4. Στο *τέταρτο* σενάριο προσομοιώθηκε η προσθήκη 50% CO₂, αντίστοιχα με το τρίτο, αλλά σε τμήματα και των τεσσάρων ψαμμιτικών στρωμάτων του κοιτάσματος του Πρίνου.

Εφόσον λοιπόν δημιουργήθηκαν οι τομές υπέρθεσης και των τεσσάρων σεναρίων, μελετήθηκε η θέση του θυσάνου του CO₂ μέσα στους ταμιευτήρες του Πρίνου.

Για την καλύτερη μελέτη της διαφοροποίησης των πλατών και των χρόνων άφιξης των ανακλάσεων που προέρχονται από τα στρώματα του ταμιευτήρα, εξετάστηκε το σεισμικό ίχνος των τομών υπέρθεσης στο κέντρο του μοντέλου (1000m) για τα διάφορα σενάρια.

Μεταξύ των σεισμικών ιχνών εντοπίστηκαν διαφορές στα πλάτη των κυμάτων και στους χρόνους άφιξης των ανακλάσεων από τις διεπιφάνειες των στρωμάτων του ταμειυτήρα. Ειδικότερα, οι ανακλάσεις από τα ψαμμιτικά στρώματα των ταμειυτήρες όπου εισήχθηκε CO₂ καταγράφονται σε μεγαλύτερους χρόνους σε σχέση με την αρχική κατάσταση όπου περιέχουν μόνο νερό. Μελετώντας τις διαφορές αυτές είναι δυνατό να εξαχθούν συμπεράσματα για την κατακόρυφη εξάπλωση του θυσάνου του CO₂ στον ταμειυτήρα.

Επιπλέον πρέπει να ειπωθεί ότι δεν μπορούν να διακριθούν οι ανακλάσεις που προέρχονται από τα ενδιάμεσα ψαμμιτικά στρώματα του ταμειυτήρα εφόσον το πάχος τους είναι συγκρίσιμο σε σχέση με το μήκος κύματος των σεισμικών κυμάτων. Η παρακολούθηση λοιπόν της οριζόντιας εξάπλωσης του θυσάνου του διοξειδίου είναι δυνατή βάση των διαφορών μεταξύ των τομών υπέρθεσης όπως φαίνεται στο κεφάλαιο της επεξεργασίας.

Για να μπορέσει να υπάρξει εξέλιξη πάνω στο θέμα της παρακολούθησης της αποθήκευσης του διοξειδίου του άνθρακα, με τη βοήθεια συνθετικών δεδομένων σεισμικής ανάκλασης προτείνεται να υλοποιηθούν τα ακόλουθα βήματα:

- Δημιουργία συνθετικών δεδομένων σεισμικής ανάκλασης με τη χρήση μεγαλύτερης συχνότητας πηγών (από 20 Hz σε 50 Hz) για την πιο λεπτομερή αναπαράσταση των ανακλαστήρων.
- Εφαρμογή τεχνικών απομάκρυνσης πολλαπλών ανακλάσεων στα συνθετικά δεδομένα σεισμικής ανάκλασης.
- Να εξεταστούν συνθετικά δεδομένα με προσθήκη θορύβου, έτσι ώστε το πείραμα να προσεγγίζει περισσότερο μία πραγματική κατάσταση.
- Αλλαγή τρόπου απόκτησης δεδομένων π.χ. πύκνωση πηγών 20m, για να υπάρχει λεπτομερέστερη σεισμική τομή.
- Ο χρόνος πραγματοποίησης των μοντέλων και η δημιουργία των συνθετικών δεδομένων να είναι ταχύτερος με βελτιστοποίηση του υπάρχοντος αλγορίθμου ή τη δημιουργία αποκλειστικού προγράμματος για αυτή τη διαδικασία.
- Εφαρμογή αντίστοιχης μεθοδολογίας σε τρισδιάστατη προσομοίωση διάδοσης συνθετικών δεδομένων σεισμικής ανάκλασης.
- Εξέταση ενδεχομένου αποθήκευσης CO₂ σε άλλους ενεργούς ταμειυτήρες πετρελαίου (EOR), εκτός αυτών των κοιτασμάτων του Πρίνου.
- Να μελετηθεί η τεχνική της βελτιωμένης ανάκτησης πετρελαίου (Enhanced Oil Recovery) που χρησιμοποιείται σε ταμειυτήρες που έχουν σχεδόν εκκενωθεί ή σε ταμειυτήρες υψηλού ιξώδους σε συνδυασμό με την προτεινόμενη μεθοδολογία παρακολούθησης της αποθήκευσης του CO₂. Η τεχνική αυτή,

έχει την δυνατότητα όχι μόνο να αυξάνει την ανάκτηση πετρελαίου αλλά να αποθηκεύει στον ταμιευτήρα και την ποσότητα του CO₂ που παράγεται από διάφορες διαδικασίες καύσης.

Συμπερασματικά λοιπόν η ιδέα της δέσμευσης και αποθήκευσης του διοξειδίου του άνθρακα σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς, όπως ταμιευτήρες πετρελαίου ή φυσικού αερίου θα μπορούσε να αποτελέσει μια εναλλακτική λύση για μηδενικές εκπομπές διοξειδίου.

Είναι απαραίτητο, οι ερευνητικές προσπάθειες να επικεντρωθούν στην αντιμετώπιση των βασικών ζητημάτων που συνδέονται με την γεωλογική αποθήκευση του συμπεριλαμβανομένης της ασφάλειας, την σταθερότητα της υπόγειας αποθήκευσης καθώς και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από μία πιθανή διαρροή κάποιου υπόγειου ταμιευτήρα.

Το περιβαλλοντικό αυτό πρόβλημα λοιπόν, είναι προφανές ότι δεν αφορά μόνο το παρόν αλλά και τις μελλοντικές γενιές. Πρόκειται, για ένα εξαιρετικά πολύπλοκο παγκόσμιο ζήτημα και γι' αυτό απαιτεί συντονισμένη δράση σε διεθνές επίπεδο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΕΝΕΣ ΠΗΓΕΣ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αποστολόπουλος Γ., 2013, Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών Τομέας Μεταλλευτικής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
2. Βαφειδής Α., 2011, Αξιολόγηση Σχηματισμών με Γεωφυσικές Μεθόδους, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης
3. Βαφειδής Α., 1993, Εφαρμοσμένη Γεωφυσική Ι – Σεισμικές Μέθοδοι, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης
4. Βαφειδής Α., 2011, Αξιολόγηση Σχηματισμών με Γεωφυσικές Μεθόδους, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων
5. Καραβίτης Δ., 2007, Αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα σε γεωλογικούς σχηματισμούς, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης
6. Κούκουζας, Ν., Στογιάννης, Π., Κλήμαντος, Π., Κακαράς, Εμ Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης/ Ινστιτούτο Τεχνολογίας και Εφαρμογών Στερεών Καυσίμων. Τίτλος: Αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς.
http://library.tee.gr/digital/m2069/m2069_koukouzas.pdf
7. Μιχελάκη, Μ., 2010, Τρισδιάστατη λιθοστρωματογραφική προσομοίωση του κοιτάσματος υδρογονανθράκων του Πρίνου, Διπλωματική Εργασία, Ερευνητική Μονάδα Γεωλογία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείου Κρήτης.
8. Μπραουδάκη Γ. Κ., 2004, Σεισμικά Ανάκλασης στο Ιόνιο, Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης
9. Παγιαλάκης Μ., 2014, Προσομοίωση δεδομένων σεισμικής ανάκλασης για το σχεδιασμό διασκόπησης στο θαλάσσιο χώρο του Πατραϊκού Κόλπου, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης
10. Πουλάκης Π., 2008, Συγκριτική αξιολόγηση πετρελαίων από σχηματισμούς της λεκάνης του Πρίνου με μεθόδους οργανικής γεωχημείας, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης

11. Σκαρλατούδης Α., 2009, Προσομοίωση της σεισμικής κίνησης με τη χρήση δισδιάστατων και τρισδιάστατων μοντέλων, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας της Σχολής Θετικών Επιστημών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
12. Φρόνιμος Π. Κ., 1998, Έλεγχος Θέσης Οριζόντιας Γεώτρησης με χρήση Γεωφυσικών Διαγραφιών Logging While Drilling, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

13. Annetts D., Hauser J., Gunning J., Boris Gurevich ,Andrej Bona, Roman Pevzner, Brett Harris, Milovan Urosevic, Mamdohal Ajami , Cant J., 2012, A deployment strategy for effective geophysical remote sensing of CO₂ sequestration, Final report, Curtin University, pp. 137
14. Bachu, S. ,2003, Screening and ranking sedimentary basins for sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change. Environmental Geology, 44, pp 277 – 289.
15. Birch F., 1961, The velocity of Compressional Waves in Rocks to 10 kilobars. Part 2, Journal of Geophysical Research, pp 2199 -2223 , [http: onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/JZ066i007/epdf](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/JZ066i007/epdf)
16. Castagna, J. P., M. L. Batzle, and R. L. Eastwood, 1985, Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks, Geophysics, 50, 571–581.
17. Georgakopoulos A., 1998, Lithology and Stratigraphy of the Neogene Prinos – Kavala basin, Northern Greece, Geological society of Greece, Special Publications, No 9. 79 – 84, 2000.
18. Griffiths D. H. and King R. F., 1981, Applied Geophysics for Geologists and Engineers, Pergamon International Library of science, Technology, Engineering and Social Studies, Publisher Robert Maxwell M. C.
19. Hunt J. M., 1996, Petroleum Geochemistry and Geology. W.H. Freeman and Company. New York, 743 pp.
20. Jawwad Ashraf Queshi, 2013, 3D Processing of Seismic Data from the KetzinCO₂ Storage Site, Germany

21. Kirk – Othmer, 1985, Concise Encyclopaedia of Chemical Technology, 3rd Edition, Wiley, New York, USA.
22. Nist, 2003, National Institute of Standards and Technology Standard Reference Database Number 69, P.J. Linstrom and W.G. Mallard
23. Pollak W. H., 1979, Structural and lithological development of the Prinos – Kavala basin, sea of Thrace, Greece. Ann. Geol.Pays Hellenique., Tome hors serie II, 1003 – 1011.
24. Proedrou P., 1986, New age determination of the Prinos Basin. Proc. Of the XX/2 Geological society of Greece, May, 141 – 147.
25. Proedrou P., 1979, The evaporate formation in the Nestos – Prinos graben in the Northern Aegean Sea, Annex Geologique Pays Hellenic, tome hors serie fash II, 1013 -1020, Athens.
26. Proedrou, P., and Papakonstantinou, C., M., 2004, Prinos Basin- A model for oil exploration, πρακτικά 10^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου Γεωλογίας, Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, τόμος XXXVI, σελίδες 327 -333, Θεσσαλονίκη.
27. Proedrou, P., and Sidiropoulos, Th., 1992, Prinos field – Greece, Aegean basin, structural traps, Treatise of petroleum geology, atlas of oil and gas field, AAPG, p.275 – 333.
28. Sheriff, E., R., and Geldart, P., L., 1995, Exploration Seismology, (Second Edition), Cambridge University Press
29. Zimmerle W.,1995 , Petroleum Sedimentology. Kluwer Publichers. Dordecht, 413 pp.
30. Yilmaz O.,1987 , Seismic data processing Society of Exploration Geophysicists

ΠΗΓΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

[1] :**BGS** Natural Environment Research Council-British Geological Survey, **BGR** Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, **BRGM** Bureau de Recherches Géologiques et Minières, **GEUS** Geological Survey of Denmark and Greenland, **HWU** Heriot-Watt University, **IFPEN** IFP Energies nouvelles, **IMPERIAL** Imperial College of Science, Technology and Medicine, **NIV** (BGS Natural Environment Research Council-British Geological Survey, 2013) **A** Norwegian Institute for Water Research, **OGS** Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, **IRIS** International Research Institute of Stavanger, **SPR SINTEF** Petroleumsforskning AS, **TNO** Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, **URS** Università di Roma La Sapienza-CERI
Η Ελληνική έκδοση μεταφράστηκε και εκτυπώθηκε στα πλαίσια του έργου του FP7 “CGS Europe — Pan-European coordination action on CO₂ Geological Storage” από το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών και Μελετών (Ι.Γ.Μ.Ε.Μ.) του Εθνικού Κέντρου Βιώσιμης και Αειφόρου Ανάπτυξης (Ε.Κ.Β.Α.Α.) (2013) «Τι σημαίνει στην πραγματικότητα γεωλογική αποθήκευση CO₂;»/ CO₂ Geo Net Ευρωπαϊκό Δίκτυο Αριστείας

[2]: <http://geolib.geo.auth.gr/index.php/bgsg/article/viewFile/6946/6704>

[3]: http://library.tee.gr/digital/m2589/m2589_vafidis.pdf (διαφάνεια 12)

[4]: Φροντιστηριακή Άσκηση 6, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

[5]: http://www.bairdpetro.com/pdf_files/p58-62.pdf

[6]: https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CE%B9%CE%BF%CE%BE%CE%B5%CE%AF%CE%B4%CE%B9%CE%BF_%CF%84%CE%BF%CF%85_%CE%AC%CE%BD%CE%B8%CF%81%CE%B1%CE%BA%CE%B1#/media/File:%CE%94%CE%B9%CE%AC%CE%B3%CF%81%CE%B1%CE%BC%CE%BC%CE%B1_%CF%86%CE%AC%CF%83%CE%B5%CF%89%CE%BD_CO2.png

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 1: με γκρι χρώμα ορίζεται το ανώτερο όριο κάθε στρώματος, ενώ με άσπρο το κατώτατο όριο κάθε στρώματος. Το κίτρινο χρώμα δηλώνει τη θέση των γεωτρήσεων πάνω στον άξονα των $\chi - \chi'$, δηλαδή τις οριζόντιες αποστάσεις τους.

Ονόματα γεωτρήσεων	PA11	PA31	PA9A	PB26	PB14	PB23	PB16A
Αποστάσεις X (μέτρα)	0	495	605	770	968	1342	1892
Στρώματα	Βάθη γεωτρήσεων Y (μέτρα)						
Θάλασσα	0	0	0	0	0	0	0
	100	100	100	100	100	100	100
Άμμος Αργυλοι	100	100	100	100	100	100	100
	1875	1900	1900	1900	1875	1900	1850
Εβαπορήτες	1875	1900	1900	1900	1875	1900	1850
	2600	2510	2500	2500	2500	2510	2600
Ταμ. Α1	2600	2510	2500	2500	2500	2510	2600
	2680	2580	2560	2560	2570	2610	2670
Ταμ. Α2	2680	2580	2560	2560	2570	2610	2670
	2750	2680	2660	2650	2660	2720	2710
Ταμ. Β	2750	2680	2660	2650	2660	2720	2710
	2810	2730	2700	2700	2720	2810	2850
Ταμ. C	2810	2730	2700	2700	2720	2810	2850
	2850	2790	2770	2780	2810	2830	2930
Εβαπορήτες (πάτωμα)	2850	2790	2770	2780	2810	2830	2930
	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000

Πίνακας 2: Πάχος κάθε στρώματος ξεχωριστά

Πάχη σε μέτρα							
Ονόματα γεωτρήσεων	PA11	PA31	PA9A	PB26	PB14	PB23	PB16A
Αποστάσεις X (μέτρα)	0	495	605	770	968	1342	1892
Θάλασσα	100	100	100	100	100	100	100
Άμμος Αργυλοι	1775	1800	1800	1800	1775	1800	1750
Εβαπορήτες	725	610	600	600	625	610	750
Ταμ. Α1	80	70	60	60	70	100	70
Ταμ. Α2	70	100	100	90	90	110	40
Ταμ. Β	60	50	40	50	60	90	140
Ταμ. C	40	60	70	80	90	20	80
Εβαπορήτες (πάτωμα)	150	210	230	220	190	170	70

Πίνακας 3: Αποστάσεις σε ms διπλού κατακόρυφου χρόνου για το πρώτο σενάριο

Αποστάσεις σε ms διπλός κατακόρυφος χρόνος							
Θάλασσα	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3
Άμμος Άργιλοι	1746.9	1769.7	1769.7	1769.7	1746.9	1769.7	1724.2
Εβαπορίτες	2052.2	2026.5	2022.3	2022.3	2010.1	2026.5	2040.0
Ταμ. Α1	2090.8	2060.3	2051.3	2051.3	2043.9	2074.8	2073.8
Ταμ. Α2	2127.2	2112.3	2103.2	2098.0	2090.7	2132.0	2094.6
Ταμ. Β	2157.3	2137.3	2123.3	2123.1	2120.7	2177.1	2164.8
Ταμ. C	2178.2	2168.7	2159.8	2164.9	2167.7	2187.5	2206.5
Εβαπορίτες							

Πίνακας 4: Διαφορές διπλού κατακόρυφου χρόνου για το πρώτο σενάριο

Σχετικοί χρόνοι =(διαφορές διπλού κατακόρυφου χρόνου σε ms)							
Θάλασσα	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3
Άμμος Άργιλοι	1613.634	1636.364	1636.364	1636.364	1613.636	1636.364	1590.909
Εβαπορήτες	305.2632	256.8421	252.6316	252.6316	263.1579	256.8421	315.7895
Ταμ. Α1	38.64734	33.81643	28.98551	28.98551	33.81643	48.30918	33.81643
Ταμ. Α2	36.36364	51.94805	51.94805	46.75325	46.75325	57.14286	20.77922
Ταμ. Β	30.07519	25.06266	20.05013	25.06266	30.07519	45.11278	70.17544
Ταμ. C	20.88773	31.33159	36.55352	41.77546	46.99739	10.44386	41.77546
Εβαπορήτες	759.5	743.7	744.1	743.3	753.1	741.7	764.8

Πίνακας 5: Διπλοί χρόνοι διαδρομής πρώτου σενάριο

οριζόντια θέση (m)	θάλασσα	άμμος-αργ	εβαπορ.	ταμ.Α1	ταμ.Α2	ταμ.Β	ταμ.С
x	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7
0	133.3	1746.93636	2052.2	2090.847	2127.211	2157.286	2178.173
495	133.3	1769.66364	2026.506	2060.322	2112.27	2137.333	2168.664
605	133.3	1769.66364	2022.295	2051.281	2103.229	2123.279	2159.832
770	133.3	1769.66364	2022.295	2051.281	2098.034	2123.097	2164.872
968	133.3	1746.93636	2010.094	2019.756	2092.483	2122.559	2169.556
1342	133.3	1769.66364	2026.506	2074.815	2131.958	2177.071	2187.514
1892	133.3	1724.20909	2039.999	2073.815	2094.594	2164.77	2206.545
2000	133.3	1724.20909	2039.999	2073.815	2094.594	2164.77	2206.545

Πίνακας 6: Διπλοί χρόνοι διαδρομής, οι τιμές έχουν διαμορφωθεί βάση της συνάρτησης ceil από το excel

Διπλός Χρόνος Διαδρομής								
Αποστάσεις X (μέτρα)	t0	t1(ceil)	t2(ceil)	t3(ceil)	t4(ceil)	t5(ceil)	t6(ceil)	t7(ceil)
0	0	133.6	1747.2	2052.8	2091.2	2128	2157.6	2178.4
495	0	133.6	1770.4	2027.2	2060.8	2112.8	2137.6	2168.8
605	0	133.6	1770.4	2022.4	2052	2104	2124	2160
770	0	133.6	1770.4	2022.4	2052	2098.4	2123.2	2165.6
968	0	133.6	1747.2	2010.4	2020	2092.8	2123.2	2169.6
1342	0	133.6	1770.4	2027.2	2075.2	2132	2177.6	2188
1892	0	133.6	1724.8	2040	2074.4	2095.2	2164.8	2207.2
2000	0	133.6	1724.8	2040	2074.4	2095.2	2164.8	2207.2

Πίνακας 7: Ταχύτητες Vrms πρώτου σεναρίου

Αποστάσεις X (μέτρα)	Vrms0	Vrms1	Vrms2	Vrms3	Vrms4	Vrms5	Vrms6	Vrms7	Vrms8
0	1500	1500	2154.52	2703.661	2736.839	2759.906	2780.466	2792.353	3441.483
495	1500	1500	2155.122	2629.514	2661.026	2696.589	2715.13	2734.393	3414.605
605	1500	1500	2155.122	2622.443	2650.517	2686.624	2701.831	2724.464	3415.37
770	1500	1500	2155.122	2622.443	2650.517	2682.844	2701.766	2728.337	3413.464
968	1500	1500	2154.52	2643.501	2652.611	2703.182	2725.897	2754.145	3425.476
1342	1500	1500	2155.122	2629.514	2674.109	2712.055	2744.922	2751.092	3410.249
1892	1500	1500	2153.923	2721.889	2751.372	2764.425	2812.151	2835.148	3446.627
2000	1500	1500	2153.923	2721.889	2751.372	2764.425	2812.151	2835.148	3446.627

Πίνακας 8: Ταχυτήτων στρωμάτων στην τομή BB' με την προσθήκη CO₂ στον Α1

	Στρώματα	Ταχύτητες διαμήκων κυμάτων Vp (m/s)	Ταχύτητες εγκάρσιων κυμάτων Vs (m/s)	Πυκνότητες στρωμάτων (g/cm ³)	Πορώδη στρωμάτων
1 ^ο	Θάλασσα	1500	0.01	1	-
2 ^ο	Άμμος Άργιλοι	2200	1060	2.3	-
3 ^ο	Εβαπορίτες	4750	3100	2.6	-
4 ^ο	Ταμ. Α1	3734	2300	2.13	0.17
5 ^ο	Ταμ. Α2	3850	2100	2.34	0.195
6 ^ο	Ταμ. Β	3990	2240	2.31	0.18
7 ^ο	Ταμ. C	3830	2100	2.28	0.195
8 ^ο	Εβαπορίτες Πάτωμα	4750	2900	2.7	-

Πίνακας 9: Αποστάσεις σε ms διπλού κατακόρυφου χρόνου για το δεύτερο σενάριο

Αποστάσεις σε ms διπλός κατακόρυφος χρόνος							
Θάλασσα	133.333	133.333	133.333	133.333	133.333	133.333	133.333
Άμμος Άργιλοι	1746.969697	1769.697	1769.697	1769.697	1746.97	1769.697	1724.242
Εβαπορίτες	2052.232855	2026.539	2022.329	2022.329	2010.128	2026.539	2040.032
Ταμ. Α1	2095.082346	2064.032	2054.466	2054.466	2047.621	2080.101	2077.525
Ταμ. Α2	2131.445982	2115.98	2106.414	2101.219	2094.374	2137.244	2098.304
Ταμ. Β	2161.52117	2141.043	2126.464	2126.282	2124.449	2182.357	2168.48
Ταμ. C	2182.408899	2172.375	2163.017	2168.057	2171.447	2192.8	2210.255
Εβαπορίτες Πάτωμα	2245.566794	2260.796	2259.859	2260.689	2251.447	2264.379	2239.729

Πίνακας 10: Διαφορές διπλού κατακόρυφου χρόνου για το δεύτερο σενάριο

Σχετικοί χρόνοι =(διαφορές διπλού κατακόρυφου χρόνου σε ms)							
Θάλασσα	133.333	133.333	133.333	133.333	133.333	133.333	133.333
Άμμος Άργιλοι	1613.636	1636.364	1636.364	1636.364	1613.636	1636.364	1590.909
Εβαπορίτες	305.2631579	256.8421	252.6316	252.6316	263.1579	256.8421	315.7895
Ταμ. Α1	42.84949116	37.4933	32.13712	32.13712	37.4933	53.56186	37.4933
Ταμ. Α2	36.36363636	51.94805	51.94805	46.75325	46.75325	57.14286	20.77922
Ταμ. Β	30.07518797	25.06266	20.05013	25.06266	30.07519	45.11278	70.17544
Ταμ. C	20.88772846	31.33159	36.55352	41.77546	46.99739	10.44386	41.77546
Εβαπορίτες Πάτωμα	755.2332064	740.0043	740.9405	740.1114	749.3533	736.4206	761.071

Πίνακας 11: Διπλοί χρόνοι διαδρομής δεύτερου σενάριο

οριζόντια θέση (m)	θάλασσα	άμμος-αργ	εβαπορ.	ταμ.Α1	ταμ.Α2	ταμ.Β	ταμ.С
x	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7
0	133.333	1746.9697	2052.23	2095.082	2131.446	2125.194	2146.082
495	133.333	1769.6969	2026.53	2064.032	2115.98	2089.147	2120.479
605	133.333	1769.6969	2022.32	2054.466	2106.414	2074.568	2111.121
770	133.333	1769.6969	2022.32	2054.466	2101.219	2079.575	2121.351
968	133.333	1746.9697	2010.12	2047.621	2094.374	2124.449	2171.447
1342	133.333	1769.6969	2026.53	2080.101	2137.244	2125.271	2135.715
1892	133.333	1724.2424	2040.03	2077.525	2098.304	2147.721	2189.497
2000	133.333	1724.2424	2040.03	2077.525	2098.304	2147.721	2189.497

Πίνακας 12: Διπλοί χρόνοι διαδρομής οι τιμές έχουν διαμορφωθεί βάση της συνάρτησης ceil από το excel

Διπλός Χρόνος Διαδρομής								
t0	t1(ceil)	t2(ceil)	t3(ceil)	t4(ceil)	t5(ceil)	t6(ceil)	t7(ceil)	t8(ceil)
0	133,6	1747,2	2052,8	2095,2	2132	2125,6	2146,4	3000,8
0	133,6	1770,4	2027,2	2064,8	2116	2089,6	2120,8	3000,8
0	133,6	1770,4	2022,4	2055,2	2107,2	2075,2	2111,2	3000,8
0	133,6	1770,4	2022,4	2055,2	2101,6	2080	2121,6	3000,8
0	133,6	1747,2	2010,4	2048	2094,4	2124,8	2172	3000,8
0	133,6	1770,4	2027,2	2080,8	2137,6	2125,6	2136	3000,8
0	133,6	1724,8	2040,8	2077,6	2098,4	2148	2189,6	3000,8

Πίνακας 13: Ταχύτητες Vrms δεύτερου σεναρίου

Vrms0	Vrms1	Vrms2	Vrms3	Vrms4	Vrms5	Vrms6	Vrms7	Vrms8
1500	1500	2154.52	2703.661	2728.372	2751.613	2747.041	2759.576	3445.446
1500	1500	2155.122	2629.514	2653.739	2688.975	2668.483	2689.209	3424.564
1500	1500	2155.122	2622.443	2643.855	2680.159	2654.907	2679.267	3426.242
1500	1500	2155.122	2622.443	2643.855	2676.359	2659.315	2687.177	3422.839
1500	1500	2154.52	2643.501	2650.779	2701.409	2667.585	2699.241	3446.72
1500	1500	2155.122	2629.514	2663.718	2701.984	2692.964	2699.661	3419.075
1500	1500	2153.923	2722.98	2744.13	2757.269	2791.881	2815.174	3447.038

Πίνακας 14: Ταχύτητες στρωμάτων στην τομή BB' με την προσθήκη CO₂ στον A1 σε διάστημα των 718m μέχρι και τα 1218m, Μοντέλο 3

	Στρώματα	Ταχύτητες διαμήκων κυμάτων Vp (m/s)	Ταχύτητες εγκαρσίων κυμάτων Vs (m/s)	Πυκνότητες στρωμάτων (g/cm ³)	Πορώδη στρωμάτων
1 ^ο	Θάλασσα	1500	0.01	1	-
2 ^ο	Άμμος Άργιλοι	2200	1060	2.3	-
3 ^ο	Εβαπορίτες	4750	3100	2.6	-
4 ^ο	Ταμ. A1	3734	2300	2.13	0.17
5 ^ο	Ταμ. A2	3850	2100	2.34	0.195
6 ^ο	Ταμ. B	3990	2240	2.31	0.18
7 ^ο	Ταμ. C	3830	2100	2.28	0.195
8 ^ο	Εβαπορίτες Πάτωμα	4750	2900	2.7	-

Πίνακας 15: Αποστάσεις σε ms διπλού κατακόρυφου χρόνου. Οι τιμές μέσα στα χρωματισμένα τετράγωνα είναι οι τιμές με βάση του CO₂. Τρίτο σενάριο.

Οι θέσεις που μπήκε το CO₂ είναι από 718m μέχρι και τα 1218m μόνο για Α1									
αποστάσεις	0	495	605	718	770	968	1218	1342	1892
Αποστάσεις σε ms διπλού κατακόρυφου χρόνου 50% H₂O και 50% CO₂									
Θάλασσα	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3
Άμμος Αργίλοι	1746.936	1769.664	1769.664	1769.664	1769.664	1746.936	1746.936	1769.664	1724.209
Εβαπορίτες	2052.2	2026.506	2022.295	2022.295	2022.295	2010.094	2010.094	2026.506	2039.999
Ταμ. Α1	2090.847	2060.322	2051.281	2054.432	2054.432	2047.588	2058.3	2074.815	2073.815
Ταμ. Α2	2127.211	2112.27	2103.229	2102.744	2101.186	2094.341	2110.248	2131.958	2094.594
Ταμ. Β	2157.286	2137.333	2123.279	2126.303	2126.248	2124.416	2150.348	2177.071	2164.77
Ταμ. C	2178.173	2168.664	2159.832	2165.99	2168.024	2171.413	2173.847	2187.514	2206.545
Εβαπορίτες Πάτωμα	2241.331	2257.086	2256.675	2260.305	2260.655	2251.413	2247.531	2259.093	2236.019

Πίνακας 16: Διαφορές διπλού κατακόρυφου χρόνου για το τρίτο σενάριο.

οι θέσεις που μπήκε το CO₂ είναι από 718m μέχρι και τα 1218m									
αποστάσεις	0	495	605	718	770	968	1218	1342	1892
Σχετικοί χρόνοι =(διαφορές διπλού κατακόρυφου χρόνου σε ms)									
Θάλασσα	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3
Άμμος Αργίλοι	1613.636	1636.364	1636.364	1636.364	1636.364	1613.636	1613.636	1636.364	1590.909
Εβαπορίτες	305.2632	256.8421	252.6316	252.6316	252.6316	263.1579	263.1579	256.8421	315.7895
Ταμ. Α1	38.64734	33.81643	28.98551	32.13712	32.13712	37.4933	48.20568	48.30918	33.81643
Ταμ. Α2	36.36364	51.94805	51.94805	48.31169	46.75325	46.75325	51.94805	57.14286	20.77922
Ταμ. Β	30.07519	25.06266	20.05013	23.5589	25.06266	30.07519	40.10025	45.11278	70.17544
Ταμ. C	20.88773	31.33159	36.55352	39.68668	41.77546	46.99739	23.49869	10.44386	41.77546
Εβαπορίτες Πάτωμα	63.15789	88.42105	96.84211	94.31579	92.63158	80	73.68421	71.57895	29.47368

Πίνακας 17: Οι τιμές μέσα στα χρωματισμένα τετράγωνα είναι οι τιμές με βάση του CO₂. Τρίτο σενάριο

Οριζόντια θέση (m)	θάλασσα	άμμος- αργ	εβαπορ.	Ταμ.Α1	ταμ.Α2	ταμ.Β	ταμ.С
x	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7
0	133.3	1746.936	2052.2	2090.847	2127.211	2157.286	2178.173
495	133.3	1769.664	2026.506	2060.322	2112.27	2137.333	2168.664
605	133.3	1769.664	2022.295	2051.281	2103.229	2123.279	2159.832
718	133.3	1769.664	2022.295	2054.432	2102.744	2126.303	2165.99
770	133.3	1769.664	2022.295	2054.432	2101.186	2126.248	2168.024
968	133.3	1746.936	2010.094	2047.588	2094.341	2124.416	2171.413
1218	133.3	1746.936	2010.094	2058.3	2110.248	2150.348	2173.847
1342	133.3	1769.664	2026.506	2074.815	2131.958	2177.071	2187.514
1892	133.3	1724.209	2039.999	2073.815	2094.594	2164.77	2206.545
2000	133.3	1724.209	2039.999	2073.815	2094.594	2164.77	2206.545

Πίνακας 18: Διπλοί χρόνοι διαδρομής τρίτου μοντέλου. Οι τιμές έχουν διαμορφωθεί βάση της συνάρτησης ceil από το excel.

Διπλός Χρόνος Διαδρομής							
t0	t1(ceil)	t2(ceil)	t3(ceil)	t4(ceil)	t5(ceil)	t6(ceil)	t7(ceil)
0	133.6	1747.2	2052.8	2091.2	2128	2157.6	2178.4
0	133.6	1770.4	2027.2	2060.8	2112.8	2137.6	2168.8
0	133.6	1770.4	2022.4	2052	2104	2124	2160
0	133.6	1770.4	2022.4	2055.2	2103.2	2126.4	2166.4
0	133.6	1770.4	2022.4	2055.2	2101.6	2126.4	2168.8
0	133.6	1747.2	2010.4	2048	2094.4	2124.8	2172
0	133.6	1747.2	2010.4	2058.4	2110.4	2150.4	2174.4
0	133.6	1770.4	2027.2	2075.2	2132	2177.6	2188
0	133.6	1724.8	2040	2074.4	2095.2	2164.8	2207.2

Πίνακας 19: Ταχύτητες Vrms τρίτου σεναρίου

Vrms0	Vrms1	Vrms2	Vrms3	Vrms4	Vrms5	Vrms6	Vrms7	Vrms8
1500	1500	2154.52	2703.661	2726.093	2749.436	2770.216	2782.244	3435.535
1500	1500	2155.122	2629.514	2651.215	2687.146	2705.861	2725.322	3409.36
1500	1500	2155.122	2622.443	2641.804	2678.241	2693.574	2716.413	3410.751
1500	1500	2155.122	2622.443	2643.855	2677.448	2695.219	2720.464	3408.334
1500	1500	2155.122	2622.443	2643.855	2676.359	2695.373	2722.091	3407.494
1500	1500	2154.52	2643.501	2667.542	2699.355	2722.139	2750.961	3421.874
1500	1500	2154.52	2643.501	2674	2709.118	2738.418	2752.829	3421.21
1500	1500	2155.122	2629.514	2660.247	2698.753	2732.056	2738.316	3402.743
1500	1500	2153.923	2721.889	2741.721	2754.916	2803.104	2826.348	3441.307

Πίνακας 20 : Ταχύτητες στρωμάτων στην τομή BB' με την προσθήκη CO₂ στον Α1 σε διάστημα των 718m μέχρι και τα 1218m. Τέταρτο σενάριο

	Στρώματα	Ταχύτητες διαμήκων κυμάτων Vp (m/s)	Ταχύτητες εγκάρσιων κυμάτων Vs (m/s)	Πυκνότητες στρωμάτων (g/cm ³)	Πορώδη στρωμάτων
1 ^ο	Θάλασσα	1500	0.01	1	-
2 ^ο	Άμμος Άργιλοι	2200	1060	2.3	-
3 ^ο	Εβαπορήτες	4750	3100	2.6	-
4 ^ο	Ταμ. Α1	3734	2300	2.139	0.17
5 ^ο	Ταμ. Α2	3472.44	2100	2.1	0.195
6 ^ο	Ταμ. Β	3598.71	2240	2.123	0.18
7 ^ο	Ταμ. C	3454.40	2100	2.1	0.195
8 ^ο	Εβαπορήτες Πάτωμα	4750	2900	2.7	-

Πίνακας 21: Αποστάσεις σε ms διπλού κατακόρυφου χρόνου. Οι τιμές μέσα στα χρωματισμένα τετράγωνα είναι οι τιμές με βάση του CO₂. Τέταρτο σενάριο.

οι θέσεις που μπήκε το CO ₂ είναι από 718m μέχρι και τα 1218m									
Αποστάσεις	0	495	605	718	770	968	1218	1342	1892
Αποστάσεις σε ms διπλού κατακόρυφου χρόνου 50% H ₂ O και 50% CO ₂									
Θάλασσα	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3
Άμμος Άργιλοι	1746.936	1769.664	1769.664	1769.664	1769.664	1746.936	1746.936	1769.664	1724.209
Εβαπορήτες	2052.2	2026.506	2022.295	2022.295	2022.295	2010.094	2010.094	2026.506	2039.999
Ταμ. Α1	2090.847	2060.322	2051.281	2054.432	2054.432	2047.588	2058.3	2074.815	2073.815
Ταμ. Α2	2127.211	2112.27	2103.229	2107.997	2106.269	2099.424	2115.896	2131.958	2094.594
Ταμ. Β	2157.286	2137.333	2123.279	2134.117	2134.057	2132.77	2160.357	2177.071	2164.77
Ταμ. C	2178.173	2168.664	2159.832	2178.119	2180.375	2184.877	2186.41	2187.514	2206.545
Εβαπορήτες Πάτωμα	2241.331	2257.086	2256.675	2272.435	2273.006	2264.877	2260.095	2259.093	2236.019

Πίνακας 22: Διαφορές διπλού κατακόρυφου χρόνου για το τέταρτο σενάριο.

οι θέσεις που μπήκε το CO ₂ είναι από 718m μέχρι και τα 1218m									
Αποστάσεις	0	495	605	718	770	968	1218	1342	1892
Σχετικοί χρόνοι =(διαφορές διπλού κατακόρυφου χρόνου σε ms)									
Θάλασσα	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3	133.3
Άμμος	1613.636364	1636.364	1636.364	1636.364	1636.364	1613.636	1613.636	1636.364	1590.909
Αργίλοι									
Εβαπορήτες	305.2631579	256.8421	252.6316	252.6316	252.6316	263.1579	263.1579	256.8421	315.7895
Ταμ. Α1	38.647343	33.81643	28.98551	32.13712	32.13712	37.4933	48.20568	48.30918	33.81643
Ταμ. Α2	36.36363636	51.94805	51.94805	53.56465	51.83675	51.83675	57.59639	57.14286	20.77922
Ταμ. Β	30.07518797	25.06266	20.05013	26.12047	27.78773	33.34528	44.46037	45.11278	70.17544
Ταμ. C	20.88772846	31.33159	36.55352	44.00184	46.31773	52.10744	26.05372	10.44386	41.77546
Εβαπορήτες	63.15789474	88.42105	96.84211	94.31579	92.63158	80	73.68421	71.57895	29.47368
Πάτωμα									

Πίνακας 23: Οι τιμές μέσα στα χρωματισμένα τετράγωνα είναι οι τιμές με βάση του CO₂. Τέταρτο σενάριο

οριζόντια θέση (m)	θάλασσα	άμμος-αργ	εβαπορ.	ταμ.Α1	ταμ.Α2	ταμ.Β	ταμ.С
x	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7
0	133.3	1746.936	2052.2	2090.847	2127.211	2157.286	2178.173
495	133.3	1769.664	2026.506	2060.322	2112.27	2137.333	2168.664
605	133.3	1769.664	2022.295	2051.281	2103.229	2123.279	2159.832
718	133.3	1769.664	2022.295	2054.432	2107.997	2134.117	2178.119
770	133.3	1769.664	2022.295	2054.432	2106.269	2134.057	2180.375
968	133.3	1746.936	2010.094	2047.588	2099.424	2132.77	2184.877
1218	133.3	1746.936	2010.094	2058.3	2115.896	2160.357	2186.41
1342	133.3	1769.664	2026.506	2074.815	2131.958	2177.071	2187.514
1892	133.3	1724.209	2039.999	2073.815	2094.594	2164.77	2206.545
2000	133.3	1724.209	2039.999	2073.815	2094.594	2164.77	2206.545

Πίνακας 24: Διπλοί χρόνοι διαδρομής τέταρτου μοντέλου. Οι τιμές έχουν διαμορφωθεί βάση της συνάρτησης ceil από το excel.

Διπλός Χρόνος Διαδρομής							
t0	t1(ceil)	t2(ceil)	t3(ceil)	t4(ceil)	t5(ceil)	t6(ceil)	t7(ceil)
0	133.6	1747.2	2052.8	2091.2	2128	2157.6	2178.4
0	133.6	1770.4	2027.2	2060.8	2112.8	2137.6	2168.8
0	133.6	1770.4	2022.4	2052	2104	2124	2160
0	133.6	1770.4	2022.4	2055.2	2108	2134.4	2178.4
0	133.6	1770.4	2022.4	2055.2	2106.4	2134.4	2180.8
0	133.6	1747.2	2010.4	2048	2100	2132.8	2185.6
0	133.6	1747.2	2010.4	2058.4	2116	2160.8	2187.2
0	133.6	1770.4	2027.2	2075.2	2132	2177.6	2188
0	133.6	1724.8	2040	2074.4	2095.2	2164.8	2207.2

Πίνακας 25: Ταχύτητες Vrms τέταρτου σεναρίου

Vrms0	Vrms1	Vrms2	Vrms3	Vrms4	Vrms5	Vrms6	Vrms7	Vrms8
1500	1500	2154.52	2703.661	2726.093	2740.727	2754.307	2761.831	3423.557
1500	1500	2155.122	2629.514	2651.215	2674.455	2687.002	2699.588	3394.53
1500	1500	2155.122	2622.443	2641.804	2665.454	2675.76	2690.585	3395.983
1500	1500	2155.122	2622.443	2643.855	2667.753	2681.243	2699.052	3387.015
1500	1500	2155.122	2622.443	2643.855	2667.05	2681.368	2700.121	3385.83
1500	1500	2154.52	2643.501	2667.542	2690.382	2706.66	2727.142	3397.974
1500	1500	2154.52	2643.501	2674	2698.864	2720.543	2730.577	3398.798
1500	1500	2155.122	2629.514	2660.247	2685.073	2707.367	2711.405	3386.994
1500	1500	2153.923	2721.889	2741.721	2749.93	2781.252	2795.71	3422.849