ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 12.05: Σχέδιο Παρακολούθησης CO_2 και Σχέδιο Διορθωτικών Μέτρων

Μελέτη Περιβάλλοντος για την Τροποποίηση της ΑΕΠΟ του Έργου: Μονάδα Αποθήκευσης CO_2 στον Πρίνο

Ημερομηνία: 18/08/2025

Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων

Το παρόν έγγραφο συντάχθηκε αποκλειστικά για τους σκοπούς του Έργου «Μονάδα Αποθήκευσης CO_2 στον Πρίνο». Τα περιεχόμενα του εγγράφου μπορούν να χρησιμοποιηθούν από την EnEarth αποκλειστικά για τους σκοπούς του Έργου.

Έργο	Μονάδα Αποθήκευσης CO_2 στον Πρίνο		
ΣΤΑΔΙΟ ΜΕΛΕΤΗΣ	Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων στο πλαίσιο της Μελέτης Περιβάλλοντος για την Τροποποίηση της ΑΕΠΟ του Έργου		
ΚΩΔΙΚΌΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	CCP - 2902		
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	18.08.2025		
ΕΚΔΟΣΗ	v.01		
ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ	v.00		
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΣΥΜΒΟΥΛΟΣ	LDK CONSULTANTS A.E		
ΦΟΡΕΑΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ	ENEARTH GREECE		
ΕΚΠΟΝΗΣΗ	Ομάδα μελέτης LDK		
ΕΛΕΓΧΟΣ	Κωστής Νικολόπουλος, Υπεύθυνος Έργου LDK		
ΕΓΚΡΙΣΗ	Κωστής Νικολόπουλος Υπεύθυνος Έργου		
ΕΚΠΡΟΣΩΠΟΣ ΦΟΡΕΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ			

Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΧΕΙ ΑΦΕΘΕΙ ΣΚΟΠΙΜΩΣ ΚΕΝΗ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 ΣΧΕΔΙΟ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ CO_2 ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΟ ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΩΝ 1
1.1 ΣΧΕΔΙΟ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ CO_2 1
1.1.1 Παράμετροι Παρακολούθησης 1
1.1.2 Βασικό σχέδιο παρακολούθησης πιθανών διαδρομών διαρροής CO_2 στον Πρίνο 2
1.1.2.1 Τεχνολογίες παρακολούθησης 2
1.1.2.2 Απόκτηση δεδομένων βάσης (πριν την εισπίεση CO_2) 3
1.1.2.3 Απόκτηση δεδομένων κατά τη διάρκεια της εισπίεσης CO_2 4
1.1.2.4 Περιβαλλοντικές και Υποθαλάσσιες έρευνες 5
1.1.3 Προτεινόμενο Σχέδιο Παρακολούθησης CO_2 5
1.1.4 Ανίχνευση και Παρακολούθηση Διαρροών στους Αγωγούς CO_2 9
1.1.5 Επικαιροποίηση του Σχεδίου 9
1.1.6 Παρακολούθηση μετά το κλείσιμο 10
1.2 ΣΧΕΔΙΟ ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΩΝ 11

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1-1: Επισκόπηση του προτεινόμενου σχεδίου παρακολούθησης _____ 6

Πίνακας 1-2: Προτεινόμενο Σχέδιο Παρακολούθησης και διαδρομές διαρροής _____ 7

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 1-1: Τεχνικές παρακολούθησης καθ' όλη τη διάρκεια του Έργου αποθήκευσης CO_2_____ 8

1 ΣΧΕΔΙΟ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ CO_2 ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΟ ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΩΝ

1.1 ΣΧΕΔΙΟ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ CO_2

Η Energean θα εφαρμόσει Σχέδιο Παρακολούθησης της Παραγράφου 2 του άρθρου 14 της ΚΥΑ 48416/2037/Ε.103/2011), το οποίο εκπονείται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του παραρτήματος ΙΙ της ανωτέρω ΚΥΑ. Θα διενεργείται παρακολούθηση των γεωτρήσεων εισπίεσης του συγκροτήματος αποθήκευσης (συμπεριλαμβανομένου, όποτε υπάρχει δυνατότητα, του πλουμίου CO_2), και, κατά περίπτωση, του γύρω περιβάλλοντος, που αποσκοπεί:

- στη σύγκριση μεταξύ της πραγματικής και της αναπαριστώμενης με μοντέλο συμπεριφοράς του CO_2 και του ύδατος του σχηματισμού στον τόπο αποθήκευσης,
- στην ανίχνευση σημαντικών ανωμαλιών,
- στην ανίχνευση της μετανάστευσης του CO_2,
- στην ανίχνευση της διαρροής του CO_2,
- στην ανίχνευση σημαντικών αρνητικών επενεργειών στο γύρω περιβάλλον, μεταξύ άλλων ιδίως στο πόσιμο νερό, τους ανθρώπινους πληθυσμούς ή χρήστες της περιβάλλουσας βιόσφαιρας,
- στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας τυχόν διορθωτικών μέτρων που λαμβάνονται κατ' εφαρμογή του άρθρου 17 της ΚΥΑ 48416/2037/Ε.103/2011.

Μέσω του Σχεδίου Παρακολούθησης θα αξιολογείται η βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη ασφάλεια και ακεραιότητα του συγκροτήματος αποθήκευσης (συμπεριλαμβανομένου του κατά πόσον το αποθηκευμένο CO_2 θα παραμείνει πλήρως και μονίμως απομονωμένο).

Το Σχέδιο Παρακολούθησης αφορά στα κυριότερα στάδια του Έργου, συμπεριλαμβανομένης της βασικής παρακολούθησης κατά τη λειτουργία και μετά το κλείσιμο. Για κάθε φάση καθορίζονται τα ακόλουθα:

- οι παράμετροι που παρακολουθούνται,
- η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία παρακολούθησης με βάση τις βέλτιστες διαθέσιμες πρακτικές, και η αιτιολόγηση της επιλογής της τεχνολογίας,
- οι θέσεις παρακολούθησης και η λογική χωρικής δειγματοληψίας,
- η συχνότητα εφαρμογής και η λογική της χρονικής δειγματοληψίας.

1.1.1 Παράμετροι Παρακολούθησης

Το σχέδιο παρακολούθησης θα περιλαμβάνει συνεχή ή περιοδική παρακολούθηση των εξής παραμέτρων:

1. Διαφεύγουσες εκπομπές CO_2 στον εξοπλισμό εισπίεσης,
2. Ογκομετρική ροή CO_2 στις κεφαλές των γεωτρήσεων εισπίεσης,
3. Πίεση και θερμοκρασία του CO_2 στις κεφαλές των γεωτρήσεων εισπίεσης (για τον προσδιορισμό της ροής μάζας),
4. Χημική ανάλυση του εγχεόμενου υλικού,

5. Θερμοκρασία και πίεση ταμιευτήρα (για την εύρεση της φασικής συμπεριφοράς και κατάστασης του CO_2).

1.1.2 Βασικό σχέδιο παρακολούθησης πιθανών διαδρομών διαρροής CO_2 στον Πρίνο

Το Βασικό σχέδιο παρακολούθησης προτείνεται να επικεντρωθεί στις εντοπισμένες διαδρομές διαρροής, ιδιαίτερα σε αυτές που έχουν ταξινομηθεί ως οι πιο επικίνδυνες. Ως εκ τούτου, το σχέδιο παρακολούθησης θα πρέπει να εστιάζει στον εντοπισμό οποιασδήποτε πιθανής μετανάστευσης εκτός των στόχων εισπίεσης κατά μήκος των εντοπισμένων διαδρομών διαρροής.

1.1.2.1 Τεχνολογίες παρακολούθησης

Για να αντιμετωπιστούν οι πιθανές διαδρομές διαρροής CO_2 που εντοπίστηκαν μετά από μια δομημένη Αξιολόγηση Περιορισμού Κινδύνων στο υπέδαφος, αλλά και για να αντιμετωπιστούν οι γενικοί κίνδυνοι απώλειας περιορισμού του CO_2 μέσω υφιστάμενων και μελλοντικών γεωτρήσεων, εξετάζονται διάφορες εναλλακτικές τεχνολογίες.

Οι ακόλουθες επιλογές εξετάζονται και χρησιμοποιούνται ως προς τις τεχνολογίες παρακολούθησης:

- τεχνολογίες που μπορούν να ανιχνεύουν την παρουσία, τη θέση και τις οδούς μετανάστευσης CO_2 κάτω από την επιφάνεια και στην επιφάνεια.
- τεχνολογίες που παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά όγκου–πίεσης και την κατανομή επιφανειακού/κατακόρυφου κορεσμού του θυσάνου CO_2 για την ακριβέστερη προσαρμογή της ψηφιακής τρισδιάστατης προσομοίωσης στα τρισδιάστατα γεωλογικά μοντέλα του σχηματισμού αποθήκευσης.
- τεχνολογίες που μπορούν να παρέχουν ευρύ επιφανειακό φάσμα ώστε να λαμβάνονται πληροφορίες σχετικά με τυχόν προηγουμένως μη ανιχνευθείσες δυνητικές οδούς διαρροής ανά τις επιφανειακές διαστάσεις του πλήρους συγκροτήματος αποθήκευσης και πέραν, σε περίπτωση σημαντικών ανωμαλιών ή μετανάστευσης του CO_2 εκτός του συγκροτήματος αποθήκευσης.

Αυτές οι τεχνολογίες περιλαμβάνουν όργανα που βρίσκονται κοντά ή πάνω στο βυθό της θάλασσας, όπως κλισιόμετρα και ενεργά σεισμικά όργανα, καθώς και όργανα που περιλαμβάνονται στο σχέδιο επιτήρησης των γεωτρήσεων για συνεχή παρακολούθηση και αξιολόγηση.

Είναι επίσης σημαντικό να τονιστεί ότι η προτεινόμενη στρατηγική παρακολούθησης δεν έχει μόνο την ικανότητα να αντιμετωπίζει τους κινδύνους απώλειας περιορισμού του CO_2, αλλά και άλλους τύπους κινδύνων του Έργου που σχετίζονται με την αποθηκευτική ικανότητα, τη δυνατότητα εισπίεσης, την πιθανή προκαλούμενη σεισμικότητα και το σχεδιασμό διαχείρισης.

Ο **Πίνακας 1-1** παρουσιάζει το προτεινόμενο σχέδιο παρακολούθησης, μέτρησης και επαλήθευσης (Monitoring, Measurement, and Verification - MMV) πιθανών διαδρομών διαρροής CO_2 στον Πρίνο. Περιλαμβάνει διάφορες τεχνολογίες που συνιστώνται τόσο για το Βασικό όσο και για τα Έκτακτα σχέδια (Ενότητα 17.2.2). Επιπλέον, το σχέδιο περιγράφει μια στρατηγική απόκρισης και πιθανές διορθωτικές ενέργειες.

Ο **Πίνακας 1-2** επισημαίνει ποιες πιθανές διαδρομές διαρροής CO_2 καλύπτονται από συγκεκριμένες τεχνικές. Οι πιθανές διαδρομές διαρροής που σχετίζονται με το υπέδαφος έχουν επισημανθεί ως #V1 έως #V5 για

πιθανές κατακόρυφες Διαδρομές Διαρροής, και #L1 έως #L3 για πιθανές οριζόντιας διεύθυνσης πιθανές Διαδρομές Διαρροής εκτός του προκαθορισμένου συγκροτήματος αποθήκευσης του Πρίνου.

Οι τεχνολογίες που αναφέρονται με κόκκινο στον Πίνακα 17.2 εφαρμόζονται στις διαδρομές διαρροής του υπεδάφους που απαιτούν μεγαλύτερη προσοχή, δηλαδή #L1, αλλά και #L2 και #V1, #V2 και #V3, καθώς το ενδεχόμενο διαρροής σε αυτές τις διαδρομές ενισχύεται λόγω της παλαιότητας των παλαιών γεωτρήσεων στον Πρίνο και στο Βόρειο Πρίνο.

1.1.2.2 Απόκτηση δεδομένων βάσης (πριν την εισπίεση CO_2)

Προτείνονται οι ακόλουθες μέθοδοι παρακολούθησης:

- Καταγραφή βάσης με χρήση σεισμικής καταγραφής 3D με καλώδιο ή καταγραφικά πυθμένα θάλασσας (OBN): Η κάλυψη θα οριστεί μόλις ολοκληρωθεί ο τελικός σχεδιασμός.
- Καταγραφή βάσης δεδομένων μικρο-σεισμικότητας & τρισδιάστατο κάθετο προφίλ σεισμικών καταγραφών (3D DAS-VSP):

  Το καλώδιο οπτικών ινών (FO) που θα είναι εγκατεστημένο στις γεωτρήσεις εισπίεσης και πιθανές γεωτρήσεις παρακολούθησης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως αισθητήρας σεισμικών (ακουστικών) σημάτων, επιτρέποντας την "ακρόαση" της περιβάλλουσας μικρο-σεισμικότητας, καθώς και τη λήψη μιας σεισμικής εικόνας του υπεδάφους, δηλαδή το 3D-DAS-VSP (τρισδιάστατο κάθετο Σεισμικό Προφίλ).

  Θα πρέπει να αξιολογηθεί κατά πόσο η χρήση των καλωδίων FO στις γεωτρήσεις είναι επαρκής και αν οι δέκτες ή οι σταθμοί στις κοντινές εξέδρες επαρκούν για την παρακολούθηση οποιασδήποτε επαγόμενης σεισμικότητας που θα μπορούσε να σχετίζεται με τις λειτουργίες εισπίεσης. Απαιτείται επίσης μελέτη σκοπιμότητας για να καθοριστεί η έκταση της αποτύπωσης σεισμικών καταγραφών.
- Κλισιόμετρα: Η μικρο-παραμόρφωση είναι μια από τις πιο σημαντικές τεχνολογίες για την παρακολούθηση της εισπίεσης και της επίδρασής της στην ανύψωση των υπερκείμενων στρωμάτων. Πρέπει να εγκατασταθεί μια σειρά από κλισιόμετρα πριν την εισπίεση για να εξασφαλιστεί ο εντοπισμός οποιασδήποτε παραμόρφωσης που συνδέεται με τις λειτουργίες εισπίεσης.
- Καταγραφή βάσης με χρήση ηλεκτρικών διαγραφιών: Αυτό πρέπει να περιλαμβάνει μια καταγραφή βάσης μετρήσεων παλμικών νετρονίων, μετρήσεων παλμών σίγμα/νετρονίων, αξιολόγηση του τσιμέντου και των προστατευτικών περιβληματικών σωληνώσεων καθώς και δειγματοληψία ρευστών του ταμιευτήρα.
- Περιβαλλοντικές και υποθαλάσσιες έρευνες: Προτείνεται η απόκτηση καταγραφής βάσης περιβαλλοντικών δεδομένων. Αυτές οι έρευνες περιλαμβάνουν δειγματοληψία των ιζημάτων του βυθού, της χλωρίδας και της πανίδας, καθώς και ηχοβολιστική χαρτογράφηση πολλαπλών δεσμών (MEBS) και/ή πλευρική σάρωση ηχοβολιστή (SSS) για την απεικόνιση του βυθού. Επιπλέον, καταγραφές βάσης δειγματοληψίας βυθού, χλωρίδας και πανίδας πρέπει να καθοριστούν για γεωχημικό χαρακτηρισμό και την παρακολούθηση του.
- Δειγματοληψία ρευστών και φυσικών ιχνηθετών: Για να αντιμετωπιστούν οποιαδήποτε πιθανά επακόλουθα θέματα κατά τη διάρκεια ή μετά τις λειτουργίες εισπίεσης, συνιστάται να ληφθεί τουλάχιστον ένα δείγμα βάσης των ρευστών του κοιτάσματος και του CO_2 που θα εισπιεστεί.

1.1.2.3 Απόκτηση δεδομένων κατά τη διάρκεια της εισπίεσης CO_2

Προτείνονται οι ακόλουθες μέθοδοι παρακολούθησης:

- Μέθοδοι παρακολούθησης μέσα από γεωτρήσεις: μετρητές πίεσης και θερμοκρασίας στο βαθύτερο διαπερατό σχηματισμό έξω από το συγκρότημα αποθήκευσης (πάνω από την ζώνη «brown marker», στη μετα-μεσσήνια ακολουθία), καθώς και ένα καλώδιο Οπτικών Ινών (FO).

  Οι Μετρητές Πίεσης και Θερμοκρασίας και το καλώδιο Οπτικών Ινών (FO) συνιστάται να εγκατασταθούν στη βαθύτερη διαπερατή μονάδα εντός του δευτερεύοντος συστήματος συγκράτησης του CO_2 (μεσσήνια εβαπορητική ακολουθία). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη διάτρηση νέων γεωτρήσεων παρακολούθησης, η χωροθέτηση των οποίων δεν έχει ακόμα καθοριστεί, ή μέσω της εγκατάστασης κατάλληλων μετρητών πίσω από την προστατευτική περιβληματική σωλήνωση των γεωτρήσεων εισπίεσης σύστημα LinX), ή μέσω της επαναχρησιμοποίησης οποιωνδήποτε παλαιών γεωτρήσεων.

  Μετρητές Πίεσης/Θερμοκρασίας στο βάθος της εισπίεσης CO_2, καθώς και χρήση καλωδίου Οπτικών Ινών, προτείνονται επίσης να εγκατασταθούν στις γεωτρήσεις εισπίεσης.

  Η παρουσία ενός καλωδίου Οπτικών Ινών μπορεί να εφαρμοστεί για τους σκοπούς παρακολούθησης του ταμιευτήρα και της κατανομής της εισπίεσης στις γεωτρήσεις, μετρώντας το ακουστικό σήμα (Κατανεμημένη Ακουστική Ανίχνευση - DAS) και/ή το σήμα Θερμοκρασίας (Κατανεμημένη Ανίχνευση Θερμοκρασίας – DTS) που σχετίζεται με τη ροή του CO_2 του ταμιευτήρα. Επίσης, μπορεί να εντοπιστεί οποιαδήποτε πιθανή διαρροή στο δακτύλιο Α της γεώτρησης (A-annulus) ή στο υπερκείμενο πέτρωμα.

- Τρισδιάστατο κάθετο προφίλ σεισμικών καταγραφών (3D DAS-VSP): Υποθέτοντας λειτουργίες εισπίεσης για 20 χρόνια, προτείνεται να αποκτηθούν έρευνες τρισδιάστατου κάθετου προφίλ σεισμικών καταγραφών (3D DAS-VSP) στα έτη 2, 5, 8, 10, 15 και 20. Η τελευταία καταγραφή θα γίνει αμέσως μετά την ολοκλήρωση των λειτουργιών εισπίεσης για να υποστηρίξει την αποξήλωση της πλατφόρμας και πιθανή πρώιμη παράδοση της περιοχής. Μπορεί να οριστεί διαφορετική συχνότητα ανάλογα με τις πραγματικές λειτουργίες εισπίεσης και τα αποτελέσματα της παρακολούθησης στα αρχικά στάδια, αλλά και ανάλογα με τη διαθεσιμότητα οποιασδήποτε άλλης λιγότερο παρεμβατικής και/ή αποτελεσματικής τεχνολογίας.
- Κλισιόμετρα: Τα κλισιόμετρα μπορούν να παρακολουθούν την παραμόρφωση του εδάφους κατά τη διάρκεια της εισπίεσης. Κατά την περίοδο εισπίεσης το επίπεδο του εδάφους μπορεί να ωθηθεί προς τα πάνω και τα κλισιόμετρα που είναι προσαρτημένα στο βυθό μπορούν να παρακολουθούν αυτές τις ανωμαλίες. Για τη συλλογή δεδομένων από τα κλισιόμετρα που είναι προσαρτημένοι στο βυθό, είναι απαραίτητο να παρέχεται ένα σκάφος που να αποκτά τα δεδομένα μια φορά ανά επιθυμητή χρονική περίοδο. Είναι επίσης δυνατό να αποκτηθούν τα δεδομένα με μη επανδρωμένα υποβρύχια drones. Τα υποθαλάσσια κλισιόμετρα λειτουργούν με μπαταρία και απαιτούν αντικατάσταση κάθε 2-3 χρόνια. Η ύπαρξη μιας σειράς κλισιόμετρων επιτρέπει ταυτόχρονη, χαμηλού κόστους παρακολούθηση και άλλων εργασιών, όπως την καταγραφή επιδιορθώσεων υδραυλικής διάρρηξης.

1.1.2.4 Περιβαλλοντικές και Υποθαλάσσιες έρευνες

Υποθέτοντας λειτουργίες εισπίεσης για 20 χρόνια, προτείνεται η επανάληψη των περιβαλλοντικών ερευνών τα έτη 2, 5, 8, 10, 15 και 20. Η τελευταία καταγραφή θα αποκτηθεί αμέσως μετά την ολοκλήρωση των λειτουργιών εισπίεσης.

Ως μέρος της στρατηγικής παρακολούθησης του βυθού, τα ROV και άλλες περιβαλλοντικές φωτογραφικές τεχνικές μπορούν να επικεντρωθούν στην εξέδρα και τις γεωτρήσεις. Αυτές οι λιγότερο παρεμβατικές τεχνικές μπορούν να ελαχιστοποιήσουν την ανάγκη τακτικής δειγματοληψίας της χλωρίδας / πανίδας / ιζημάτων του βυθού.

Επιπλέον, μπορεί να οριστεί διαφορετική συχνότητα ανάλογα με τις πραγματικές λειτουργίες εισπίεσης και τα αποτελέσματα της παρακολούθησης στα αρχικά στάδια του Έργου.

Σε κάθε περίπτωση, το πρόγραμμα παρακολούθησης CO_2 θα εκτελείται σε συμφωνία με το γενικό πρόγραμμα παρακολούθησης της **Ενότητας 13.2** της παρούσας ΜΠΕ.

1.1.3 Προτεινόμενο Σχέδιο Παρακολούθησης CO_2

Ο **Πίνακας 1-1** παρουσιάζει το προτεινόμενο σχέδιο παρακολούθησης, μέτρησης και επαλήθευσης (Monitoring, Measurement, and Verification - MMV) πιθανών διαδρομών διαρροής CO_2 στον Πρίνο. Περιλαμβάνει διάφορες τεχνολογίες που συνιστώνται τόσο για το Βασικό όσο και για τα Έκτακτα σχέδια (Ενότητα 17.2.2). Επιπλέον, το σχέδιο περιγράφει μια στρατηγική απόκρισης και πιθανές διορθωτικές ενέργειες.

Ο **Πίνακας 1-2** επισημαίνει ποιες πιθανές διαδρομές διαρροής CO_2 καλύπτονται από συγκεκριμένες τεχνικές. Οι πιθανές διαδρομές διαρροής που σχετίζονται με το υπέδαφος έχουν επισημανθεί ως #V1 έως #V5 για πιθανές κατακόρυφες Διαδρομές Διαρροής, και #L1 έως #L3 για πιθανές οριζόντιας διεύθυνσης Διαδρομές Διαρροής εκτός του προκαθορισμένου συγκροτήματος αποθήκευσης του Πρίνου.

Το **Σχήμα 1-1** δίνει μια ένδειξη των τεχνικών παρακολούθησης που προβλέπεται να εφαρμοστούν σε κάθε στάδιο κατά τη διάρκεια της εξέλιξης του Έργου αποθήκευσης CO_2.

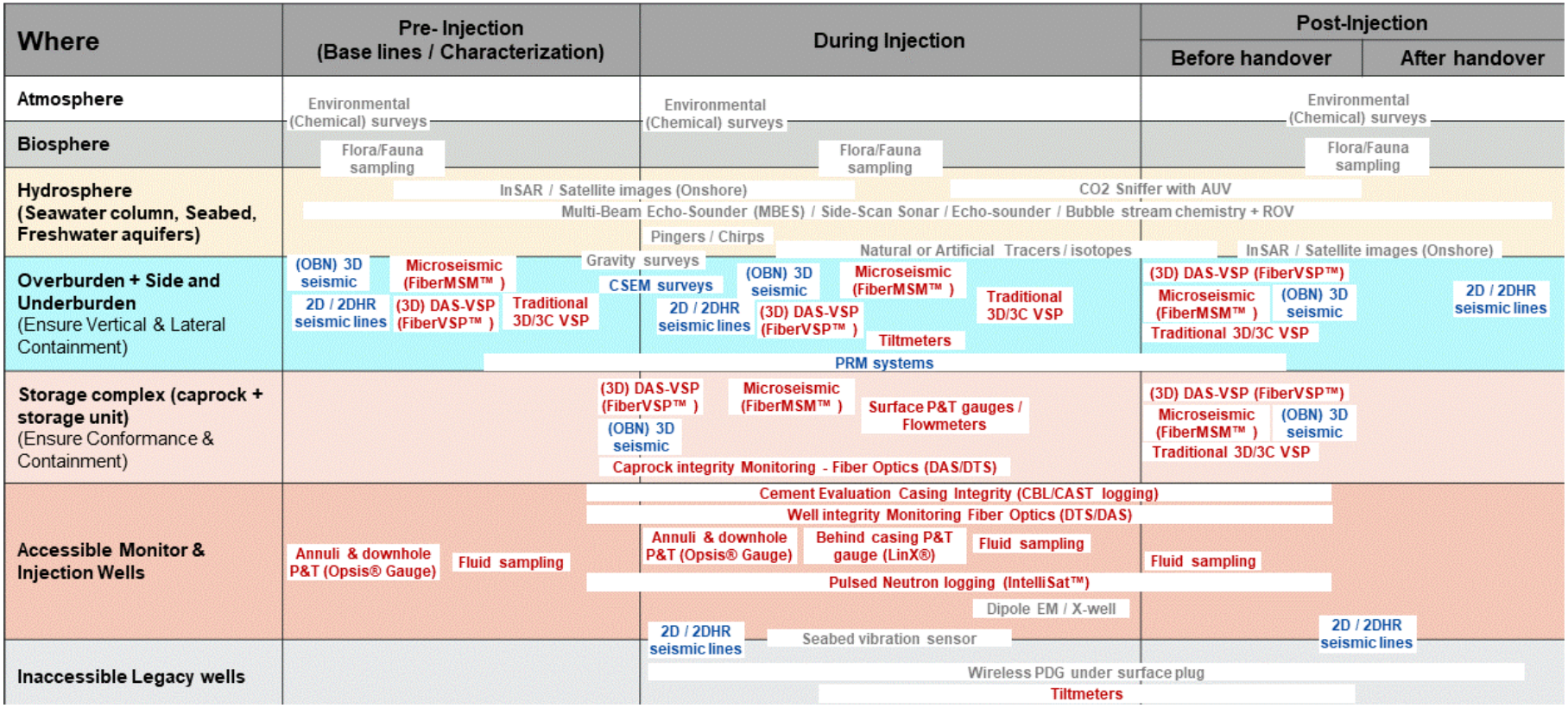
Πίνακας 1-1: Επισκόπηση του προτεινόμενου σχεδίου παρακολούθησης

Monitoring options			Pre-injection Characterisation / Base line	Conformance	Containment	
					Well related	Geological
Characterization / Base Monitoring Plan	Surface	2D / 2DHR seismic lines (to fill any gaps from DAS-VSP)	Yes/No			
		Surface Passive seismic – Microseismicity	Yes			
		Environmental/seabed surveys/sampling	Yes			
		Tiltmeters	Yes			
	Injection/Monitor Wells	3D DAS-VSP	Yes			
		Annuli & downhole P&T gauges	No			
		Fibre Optics (DTS/DAS)	No			
		Behind casing P&T gauges (LinX)	No			
		P&T gauges in Monitor wells (Storage units only)	No			
		Fibre Optics (DTS/DAS) in Monitor wells	No			
		Overburden (Out-of-Zone) P&T gauges exclusively in Monitor wells	No			
		Sigma/Neutron logging	Yes			
		Pulsed Neutron logging (IntelliSat™)	Yes			
Triggered or Contingency Plan	Surface	OBN 3D survey	Yes			
		Streamer 3D survey	Yes			
		Seawater / Bubble stream chemistry + AUV (Sniffer)	Yes			
		Multi Beam Echo Sounder	Yes			
		Side Scan Sonar	Yes			
		Gas-flux spectroscopy	Yes			
	Injection/Monitor Wells	Cement Evaluation Casing Integrity (CBL/CAST logging)	Yes			
		Passive seismic – Microseismicity	Yes			
		Fluid sampling / Natural tracers in Monitor wells	Yes			
Response Plan (After Triggered Plan)		Manage injection	NA			
		Stop injection some/all wells	NA			
		Drill Pressure relief well	NA			
		Drill CO2 drainage well	NA			
Other options	Surface	Traditional 3D/3C VSP	Yes			
		2D/3D PRM systems				
		Gravity surveys	Yes			
		CSEM	Yes			
		Pingers / Chirps	Yes			
	Injection/Monitor	Dipole EM / X-well				
		Artificial tracers	Yes			

Πίνακας 1-2: Προτεινόμενο Σχέδιο Παρακολούθησης και διαδρομές διαρροής[1]

Monitoring options			CONTAINMENT Geological Leak-paths		
			Across Caprock (V5)	Along faults (V1, V2, V3, V4)	Laterally outside Storage complex (L1, L2, L3)
Characterization / Base Monitoring Plan	Surface	2D / 2DHR seismic lines (to fill any gaps from DAS-VSP)			
		Surface Passive seismic – Microseismicity			
		Environmental/seabed surveys/sampling			
		Tiltmeters			
	Injection/Monitor Wells	3D DAS-VSP			
		Annuli & downhole P&T gauges			
		Fibre Optics (DTS/DAS)			
		Behind casing P&T gauges (LinX)			
		P&T gauges in Monitor wells (Storage units only)			
		Fibre Optics (DTS/DAS) in Monitor wells			
		Overburden (Out-of-Zone) P&T gauges exclusively in Monitor wells			
		Sigma/Neutron logging			
		Pulsed Neutron logging (IntelliSat™)			
Triggered or Contingency Plan	Surface	OBN 3D survey			
		Streamer 3D survey			
		Seawater / Bubble stream chemistry + AUV (Sniffer)			
		Multi Beam Echo Sounder			
		Side Scan Sonar			
		Gas-flux spectroscopy			
	Injection/Monitor Wells	Cement Evaluation Casing Integrity (CBL/CAST logging)			
		Wells Passive seismic – Microseismicity			
		Fluid sampling / Natural tracers in Monitor wells			
Response Plan (After Triggered Plan)		Manage injection			
		Stop injection some/all wells			
		Drill Pressure relief well			
		Drill CO2 drainage well			
Other options	Surface	Traditional 3D/3C VSP			
		2D/3D PRM systems			
		Gravity surveys			
		CSEM			
		Pingers / Chirps			
	Injection/Monitor Wells	Dipole EM / X-well			
		Artificial tracers			

[1] Με κόκκινο οι τεχνολογίες που αντιμετωπίζουν τις πιθανές διαδρομές διαρροής που απαιτούν προσοχή



Σχήμα 1-1: Τεχνικές παρακολούθησης καθ' όλη τη διάρκεια του Έργου αποθήκευσης CO_2

1.1.4 Ανίχνευση και Παρακολούθηση Διαρροών στους Αγωγούς CO_2

Μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την ανίχνευση και παρακολούθηση διαρροών στους αγωγούς CO_2 επιτυγχάνεται μέσω συνδυασμού μεθόδων. Η παρακολούθηση για την πρόληψη διαρροών είναι ζωτικής σημασίας τόσο για να εξασφαλιστούν ασφαλείς συνθήκες λειτουργίας για το προσωπικό και τον εξοπλισμό, όσο και για να αποφευχθούν καθυστερήσεις στη λειτουργία και αυξημένα κόστη λόγω απώλειας προϊόντος.

Ο συνηθέστερος τρόπος για την ανίχνευση διαρροών είναι η παρακολούθηση των ρυθμών ροής, των πιέσεων και των θερμοκρασιών σε διάφορα σημεία του αγωγού. Στην περίπτωση διαφυγής συμπιεσμένου αερίου, ο αισθητήρας θα καταγράψει μια ξαφνική πτώση πίεσης στο σημείο, η οποία θα συνοδεύεται από πιθανή μείωση της θερμοκρασίας. Για να προληφθεί και να παρακολουθείται αυτό κατά την κανονική λειτουργία, πρέπει να εγκατασταθούν αισθητήρες πίεσης στην είσοδο και στην έξοδο του αγωγού. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν θερμόμετρα συνεχούς παρακολούθησης της θερμοκρασίας στην είσοδο και στην έξοδο του αγωγού.

Χημικοί αισθητήρες (αισθητήρες CO_2) μπορούν να τοποθετηθούν στις χερσαίες και στις υπεράκτιες εγκαταστάσεις για να ανιχνεύσουν την αυξημένη συγκέντρωση CO_2 στον αέρα, υποδεικνύοντας μια διαρροή σε κάποιο σημείο κατά μήκος του αγωγού. Στην παρούσα φάση ανάπτυξης του τομέα δέσμευσης και αποθήκευσης CO_2 παγκοσμίως, δεν είναι διαδεδομένη η βιομηχανική εφαρμογή αισθητήρων CO_2. Ωστόσο, ο περιορισμένος αριθμός βιομηχανικών εφαρμογών για την ανίχνευση CO_2 χρησιμοποιεί την τεχνική αισθητήρων μη διασποράς υπέρυθρου (Non-Dispersive InfraRed sensors NDIR), η οποία είναι σήμερα η πιο κοινή και αποτελεσματική μέθοδος μέτρησης των επιπέδων διοξειδίου του άνθρακα.

Μέρος της παρακολούθησης των αγωγών CO_2 θα είναι η παρακολούθηση της σύνθεσης του CO_2 που θα καταλήξει στις γεωτρήσεις εισπίεσης. Η δειγματοληψία μπορεί να διεξαχθεί πριν από την εισπίεση για να εξασφαλιστεί ότι η ροή CO_2 είναι εντός προδιαγραφών από το σημείο εισόδου μέχρι το σημείο εισπίεσης.

1.1.5 Επικαιροποίηση του Σχεδίου

Το Σχέδιο θα επικαιροποιείται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του παραρτήματος ΙΙ της ΚΥΑ 48416/2037/Ε.103/2011, και οπωσδήποτε ανά πενταετία ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι μεταβολές του εκτιμώμενου κινδύνου διαρροής, οι αλλαγές στους εκτιμώμενους κινδύνους για το περιβάλλον και την υγεία, οι νέες επιστημονικές γνώσεις και οι βελτιώσεις της βέλτιστης διαθέσιμης τεχνολογίας. Τα επικαιροποιημένα σχέδια θα υποβάλλονται στην αρμόδια αρχή προς έγκριση.

Τα δεδομένα που θα συλλέγονται από την παρακολούθηση θα υποβάλλονται σε σύνθεση και θα ερμηνεύονται. Τα παρατηρούμενα αποτελέσματα θα συγκρίνονται με την προβλεπόμενη συμπεριφορά στη δυναμική προσομοίωση της τρισδιάστατης πίεσης και όγκου και τη συμπεριφορά κορεσμού.

Στις περιπτώσεις που παρατηρείται σημαντική απόκλιση μεταξύ της παρατηρούμενης και της προβλεπόμενης συμπεριφοράς, το τρισδιάστατο μοντέλο βαθμονομείται εκ νέου ώστε να αντανακλά την παρατηρούμενη συμπεριφορά. Η εκ νέου βαθμονόμηση θα βασίζεται στις παρατηρήσεις δεδομένων από το σχέδιο

παρακολούθησης και, όποτε είναι αναγκαίο, θα προστίθενται επιπλέον δεδομένα για να προσδίδεται εμπιστοσύνη στις παραδοχές της επαναβαθμονόμησης.

Οι φάσεις 2 (εκπόνηση του τρισδιάστατου στατικού γεωλογικού μοντέλου) και 3 (Χαρακτηρισμός της δυναμικής συμπεριφοράς της αποθήκευσης, χαρακτηρισμός ευαισθησίας, εκτίμηση κινδύνου) του παραρτήματος Ι της ΚΥΑ 48416/2037/Ε.103/2011 επαναλαμβάνονται με τη χρήση του (των) επαναβαθμονομημένου(−ων) τρισδιάστατου(−ων) μοντέλου(−ων), ώστε να παράγονται νέα σενάρια δυνητικού κινδύνου και ρυθμοί ροής και να ενημερώνεται η εκτίμηση κινδύνου.

Στις περιπτώσεις όπου εντοπίζονται νέες πηγές CO_2, δίοδοι και ρυθμοί ροής, ή παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις από τις προηγούμενες εκτιμήσεις ύστερα από την αντιπαραβολή του ιστορικού και την επαναβαθμονόμηση του μοντέλου, θα επικαιροποιείται αντίστοιχα το σχέδιο παρακολούθησης.

1.1.6 Παρακολούθηση μετά το κλείσιμο

Η παρακολούθηση μετά το κλείσιμο θα βασίζεται στις πληροφορίες που συγκεντρώθηκαν και μοντελοποιήθηκαν στη διάρκεια της εφαρμογής του σχεδίου παρακολούθησης και κατά την επικαιροποίηση του. Θα εξυπηρετεί ειδικότερα την παροχή των απαιτούμενων πληροφοριών για τη διασφάλιση των απαιτήσεων ασφάλειας του κλειστού τόπου αποθήκευσης, σύμφωνα με την παράγραφο 1 του άρθρου 19 της ΚΥΑ 48416/2037/Ε.103/2011.

Εφόσον δεν έχουν εντοπιστεί ανωμαλίες από το βασικό σχέδιο παρακολούθησης κατά τη διάρκεια των 20 χρόνων των λειτουργιών εισπίεσης, που να υποδεικνύουν κάποιο σημάδι απώλειας συγκράτησης, προτείνεται να περιληφθούν επαναλαμβανόμενες περιβαλλοντικές και υποθαλάσσιες παρακολουθήσεις το 5ο έτος μετά τη λήξη των λειτουργιών εισπίεσης.

Πρόσθετες καταγραφές παθητικών σεισμικών σε συνδυασμό με ενεργές (2D) σεισμικές γραμμές θα μπορούσαν να περιληφθούν για να αποδειχθεί ότι το CO_2 δεν έχει μεταναστεύσει μέσω των τοπικών στεγανών, εκτεταμένων καλυμμάτων, αλλά και κατά μήκος οποιασδήποτε παλαιάς γεώτρησης.

Για να παρασχεθούν περαιτέρω διαβεβαιώσεις για μόνιμη συγκράτηση του CO_2 και να βελτιστοποιηθεί η περίοδος παράδοσης, θα μπορούσε να περιληφθεί μια επιπλέον επαναλαμβανόμενη σεισμική καταγραφή 3D για να παρέχει πλήρη κάλυψη εικόνας σε ολόκληρο το συγκρότημα αποθήκευσης και όλες τις εγκαταλελειμμένες γεωτρήσεις.

Ο φορέας εκμετάλλευσης θα συντάξει έκθεση στην οποία θα τεκμηριώνεται με βάση όλα τα διαθέσιμα στοιχεία ότι το αποθηκευμένο CO_2 θα διατηρείται πλήρως και μονίμως απομονωμένο. Στην έκθεση αυτή θα τεκμηριώνονται τουλάχιστον τα εξής:

- η αντιστοιχία της πραγματικής συμπεριφοράς του εγχυμένου CO_2 προς τη μοντελοποιημένη συμπεριφορά,
- η απουσία ανιχνεύσιμης διαρροής,
- η εξέλιξη του τόπου αποθήκευσης προς κατάσταση μακροχρόνιας σταθερότητας.

Το σχέδιο παρακολούθησης μετά το κλείσιμο πρέπει να επανεξεταστεί και να οριστικοποιηθεί μόλις πραγματοποιηθούν συζητήσεις με τις αρμόδιες αρχές.

1.2 ΣΧΕΔΙΟ ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΩΝ

Σύμφωνα με την παρ. 2 του άρθρου 17 της ΚΥΑ 48416/2037/Ε.103/2011, σε περίπτωση διαρροών ή σημαντικών ανωμαλιών, ο φορέας εκμετάλλευσης υποχρεούται να ειδοποιεί αμέσως την αρμόδια αρχή και να λαμβάνει τα αναγκαία διορθωτικά μέτρα, συμπεριλαμβανομένων μέτρων σχετικών με την προστασία της υγείας.

Σε περίπτωση διαρροών και σημαντικών ανωμαλιών που ενέχουν τον κίνδυνο διαρροής, ο φορέας εκμετάλλευσης ειδοποιεί επίσης τη Διεύθυνση Κλιματικής Αλλαγής και Ποιότητας της Ατμόσφαιρας της Γενικής Διεύθυνσης Περιβαλλοντικής Πολιτικής του ΥΠΕΝ, που είναι η αρμόδια αρχή σύμφωνα με την ΚΥΑ 181478/965 (ΦΕΚ 3763/Β/26.10.2017).

Στη μικρής πιθανότητας περίπτωση που το βασικό σχέδιο παρακολούθησης εντοπίσει οποιαδήποτε ανωμαλία που μπορεί να υποδεικνύει τη διαρροή CO_2 εκτός του συγκροτήματος αποθήκευσης (απώλεια συγκράτησης), θα γίνει άμεσα διακοπή της εισπίεσης για να αξιολογηθεί η κατάσταση πριν τη λήψη άλλων διορθωτικών μέτρων.

Στη συνέχεια, πρόσθετοι έλεγχοι θα βοηθήσουν στον καθορισμό των πιο κατάλληλων διορθωτικών μέτρων. Το προτεινόμενο **Σχέδιο Παρακολούθησης Έκτακτης Κατάστασης** περιλαμβάνει τα εξής:

- Επανάληψη τρισδιάστατων σεισμικών καταγραφών με καλώδιο: Προτείνεται να αξιολογηθεί ο προγραμματισμός τουλάχιστον μιας επαναλαμβανόμενης σεισμικής καταγραφής 3D ως μέρος των κριτηρίων παράδοσης για να αποδειχθεί ότι το CO_2 δεν έχει κινηθεί εκτός του συγκροτήματος αποθήκευσης πλευρικά ή κατακόρυφα.
- Επανάληψη σεισμικών καταγραφών δισδιάστατων γραμμών 2D/2DHR: Προτείνεται ως στοχευμένη εναλλακτική της πλήρους σεισμικής καταγραφής 3D με καλώδιο. Η επιλογή για τη λήψη σεισμικών γραμμών 2D αντί για πλήρη καταγραφή 3D θα πρέπει να υποστηριχθεί από κατάλληλη μελέτη σκοπιμότητας, αν εντοπίζονται πολύ συγκεκριμένες και τοπικές ανωμαλίες από την αρχική παρακολούθηση.
- Μικρο-σεισμικότητα (Παθητική σεισμική παρακολούθηση): Η παθητική παρακολούθηση έχει περιληφθεί ως μέρος του έκτακτου και όχι του βασικού σχεδίου παρακολούθησης με την υπόθεση ότι τα καλώδια οπτικών ινών (FO) είναι εγκατεστημένα μόνο στις γεωτρήσεις εισπίεσης και δεν υπάρχουν γεωτρήσεις παρακολούθησης. Ως εκ τούτου, οι καταγραφές παθητικών σεισμικών θα ήταν πιθανότερο να λειτουργήσουν αξιόπιστα κατά τις περιόδους διακοπής της εισπίεσης. Το ενδεχόμενο να συμπεριληφθεί η ανίχνευση της μικροσεισμικότητας στο βασικό σχέδιο παρακολούθησης θα εξετασθεί με κατάλληλη μελέτη σκοπιμότητας. Θα αξιολογηθεί κατά πόσο η χρήση των καλωδίων οπτικών ινών στις γεωτρήσεις εισπίεσης και τις πιθανές γεωτρήσεις παρακολούθησης είναι επαρκής ή αν απαιτούνται άλλες εναλλακτικές λύσεις με δέκτες ή σταθμούς σε κοντινές εξέδρες για να παρακολουθείται οποιαδήποτε προκαλούμενη σεισμικότητα που θα μπορούσε να σχετίζεται με τις λειτουργίες εισπίεσης.
- Επανάληψη καταγραφών με χρήση ηλεκτρικών διαγραφιών: μετρήσεις παλμικών νετρονίων, παλμών σίγμα/νετρονίων, αξιολόγηση της επένδυσης του τσιμέντου (CBL/CAST logging). Ιδιαίτερα εάν υπάρχουν ενδείξεις απώλειας δέσμευσης σε οποιαδήποτε γεώτρηση εισπίεσης ή παρακολούθησης, αυτές οι τεχνικές χρησιμεύουν για την περαιτέρω διερεύνηση.

- Ηχοβολιστική χαρτογράφηση πολλαπλών καταγραφικών και/ή ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης: Εάν υπάρχει ένδειξη διαρροής στο βυθό, μια εικόνα του βυθού, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης πολλαπλών καταγραφικών ηχοβολιστών (MBES), θα έδειχνε περιοχές όπου μπορεί να διαφεύγει οποιοδήποτε ρευστό.

Με βάση τα αποτελέσματα των παραπάνω ελέγχων τα **διορθωτικά μέτρα** αφορούν κυρίως στα εξής:

- Διαχείριση της διαδικασίας εισπίεσης και πιθανή τροποποίηση των παραμέτρων λειτουργίας.
- Διακοπή της εισπίεσης σε ορισμένες ή σε όλες τις γεωτρήσεις.
- Διάνοιξη βοηθητικής γεώτρησης για τη μείωση της πίεσης (γεώτρησης νερού).