



Εκτεταμένη σύνοψη του έργου X-PRESS

Title of the Project: EXtreme environments: High PRESsure Sampling and experimentation system for deep sea hydrocarbon releases

Η βαθιά θάλασσα, που αποτελεί το τμήμα του ωκεανού κάτω από τα 1000 μέτρα βάθος, αποτελεί το μεγαλύτερο οικοσύστημα της Γης. Χαρακτηρίζεται από μόνιμο σκοτάδι, σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και έλλειψη σε οργανικό άνθρακα ενώ η υδροστατική πίεση αυξάνεται κατά 1 MPa ανά 100 μέτρα. Το περιβάλλον αυτό μπορεί σε μεγάλο βαθμό να θεωρηθεί ακραίο για τη ζωή. Παρ' όλα αυτά, εκεί ευδοκούν ξεχωριστές κοινότητες μικροβίων με εντυπωσιακή ποικιλότητα, που εκτελούν κρίσιμες οικολογικές λειτουργίες και προσφέρουν σημαντικά αγαθά και υπηρεσίες για την ανθρώπινη ευημερία, όπως γενετικούς πόρους και ρύθμιση του κλίματος. Ωστόσο, η ποικιλότητα και η λειτουργία της μικροβιακής ζωής στα βαθιά θαλάσσια οικοσυστήματα παραμένουν σε μεγάλο βαθμό άγνωστες. Η περιορισμένη κατανόησή μας οφείλεται κυρίως στην δυσκολία πρόσβασης σε αυτό το περιβάλλον αφενός και αφετέρου στις τεχνικές δυσκολίες συλλογής ανέπαφων δειγμάτων για μελέτη και πειράματα στο εργαστήριο, διατηρώντας παράλληλα την ακραία πίεση του βάθους από το οποίο συλλέγονται. Η διατήρηση της υδροστατικής πίεσης είναι κρίσιμη στη μελέτη των βαθύβιων μικροοργανισμών καθώς οι τελευταίοι είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στην αποσυμπίεση. Προηγούμενες μελέτες της ομάδας μας έδειξαν ότι η αποσυμπίεση οδηγεί σε σημαντική απώλεια μικροβιακής ποικιλότητας, κάτι που επηρεάζει την ακρίβεια με την οποία μπορούμε να μετρήσουμε τις ροές χημικών στοιχείων, όπως αυτές του κύκλου του άνθρακα. Τα ευρήματα αυτά οδήγησαν στην ιδέα του έργου X-PRESS.

Το έργο X-PRESS—EXtreme environments: High PRESsure Sampling and experimentation system for deep-sea hydrocarbon releases— καλύπτει ένα σημαντικό κενό στη μελέτη της μικροβιακής ζωής στη βαθιά θάλασσα. Με συντονιστή το Ινστιτούτου Γεωενέργειας του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ/ΙΓ), το X-PRESS ανέπτυξε ένα νέο, πλήρως λειτουργικό σύστημα δειγματοληψίας και πειραματισμού υπό υψηλή πίεση—μια τεχνολογία που φέρνει πλέον την Ελλάδα στην αιχμή της διεθνούς έρευνας των οικοσυστημάτων βαθιάς θάλασσας. Ο δειγματολήπτης X-PRESS μπορεί να πάρει δείγματα θαλασσινού νερού από βάθη έως και 6.000 μέτρα, τα οποία κατόπιν μεταφέρονται σε ένα συνδεδεμένο σύστημα πειραματισμού, χωρίς καμία μεταβολή της πίεσης - ένα απαραίτητο στοιχείο για αξιόπιστες βιολογικές παρατηρήσεις. Μέσα στα δοχεία υψηλής πίεσης, οι συνθήκες ρυθμίζονται από τους επιστήμονες ανάλογα με τον στόχο της έρευνας. Σε συνδυασμό, αυτά τα όργανα αποτελούν μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα για τη μελέτη της μικροβιακής ζωής σε περιβάλλοντα με ακραία πίεση. Το σύστημα κατασκευάστηκε από την γαλλική εταιρεία Top Industrie, και στη συνέχεια τροποποιήθηκε και δοκιμάστηκε στο εργαστήριο και στο πεδίο από τους επιστήμονες του ΙΤΕ/ΙΓ, με τη συνεργασία του Ελληνικού Κέντρου Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.) και του Ινστιτούτου Αλιευτικής Έρευνας του ΕΛΓΟ-ΔΗΜΗΤΡΑ (ΙΝ.ΑΛ.Ε.). Ένα από τα μεγαλύτερα επιτεύγματα του έργου ήταν ο επανασχεδιασμός του δειγματολήπτη X-PRESS ώστε να μπορεί να συνεργάζεται με δύο διαφορετικούς τύπους ωκεανογραφικών οργάνων που απαιτούνται για την πόντισή του, διευρύνοντας σημαντικά τις δυνατότητες χρήσης του.



Στα πλαίσια του έργου X-PRESS, η υποδομή υποστήριξε μια σειρά πειραμάτων που είχαν ως στόχο την οικολογία των μικροβίων που ειδικεύονται στη διάσπαση υδρογονανθράκων στα βαθιά νερά της Ανατολικής Μεσογείου. Τα μικρόβια αυτά κατέχουν εντυπωσιακές ιδιότητες, όχι μόνο γιατί μπορούν να διασπούν τις πολύπλοκες χημικές ενώσεις που συνιστούν το πετρέλαιο, αλλά και λόγω των μοναδικών βιοχημικών και οικολογικών χαρακτηριστικών που έχουν εξελίξει για να εκτελούν αυτή τη λειτουργία υπό ακραίες συνθήκες. Οι μικροοργανισμοί αυτοί εκκρίνουν βιοεπιφανειοδραστικές ενώσεις — ουσίες που βοηθούν στην γαλακτωματοποίηση και αποδόμηση των υδρογονανθράκων — και αποτελούν πηγή νέων ενζύμων καθώς και αντιμικροβιακών ή βιοδραστικών ενώσεων με πιθανές εφαρμογές σε διάφορες βιομηχανίες και στον τομέα της περιβαλλοντικής αποκατάστασης. Επιπλέον, με τη μοναδική μεταβολική τους ευελιξία και ανθεκτικότητα, τα μικρόβια αυτά προσφέρουν ελπιδοφόρες λύσεις για την επεξεργασία πλαστικών απορριμμάτων, ενός από τα πιο πιεστικά περιβαλλοντικά ζητήματα της εποχής μας.

Η πρώτη σειρά πειραμάτων αφορούσε στην παραγωγή βιοεπιφανειοδραστικών ουσιών από μια μικροβιακή κοινότητα, εμπλουτισμένη με μικροοργανισμούς που διασπούν υδρογονάνθρακες, η οποία είχε αρχικά συλλεχθεί από βάθος 1.000 μ. Συγκεκριμένα, απομονώσαμε και χαρακτηρίσαμε τη δομή και τις ιδιότητες των ραμνολίπιδων (rhamnolipids) που εκκρίθηκαν από τη μικροβιακή κοινότητα κατά τη διάρκεια της επώασης. Διαπιστώσαμε ότι η μικροβιακή μας κοινότητα παρήγαγε ραμνολίπιδια σε ποσότητα επαρκή για τη σταθεροποίηση μικροσκοπικών σταγονιδίων πετρελαίου, με αποδοτικότητα αντίστοιχη των εμπορικών διασκορπιστικών, αλλά χωρίς την αυξημένη τοξικότητα που τα συνοδεύει.

Στη συνέχεια, εξετάσαμε τη δυνατότητα βιοαποικοδόμησης πετρελαίου από την ίδια μικροβιακή κοινότητα σε διαφορετικά επίπεδα πίεσης (0, 10, 20 και 30 MPa), προκειμένου να αξιολογήσουμε την ικανότητά της να προσαρμόζεται στις μεταβολές αυτής. Τα αποτελέσματά μας έδειξαν ότι η κοινότητα αποτελούνταν κυρίως από πιεζοανθεκτικούς μικροοργανισμούς, δηλαδή μικρόβια ικανά να αναπτύσσονται εξίσου καλά τόσο σε ατμοσφαιρική πίεση όσο και σε πιέσεις έως περίπου 10 MPa — πίεση που αντιστοιχεί στο βάθος προέλευσής τους. Παρατηρήσαμε επίσης κάτι ιδιαίτερα ενδιαφέρον: αν και οι υψηλότερες πιέσεις (20 και 30 MPa) ανέστειλαν τη συνολική ανάπτυξη της κοινότητας, οι μικροοργανισμοί που παρέμειναν ενεργοί υπό αυτές τις συνθήκες εμφάνισαν μεγαλύτερη ικανότητα βιοαποικοδόμησης ανά κύτταρο. Το εύρημα αυτό συμφωνεί με πρόσφατες μελέτες και ενισχύει μια νέα αντίληψη που διαμορφώνεται στη μικροβιολογία βαθιάς θάλασσας — ότι ένα μικρό ποσοστό της μικροβιακής κοινότητας μπορεί να είναι υπεύθυνο για δυσανάλογα μεγάλο μέρος της συνολικής μεταβολικής δραστηριότητας στον βαθύ ωκεανό.

Ένα τρίτο πείραμα διεύρυνε το επιστημονικό πεδίο του έργου, εισάγοντας μια νέα μέθοδο πειραματισμού υπό υψηλή πίεση με μεθάνιο — ένα από τα σημαντικότερα αέρια του θερμοκηπίου. Η τεχνική αυτή μας επέτρεψε να εμπλουτίσουμε αερόβιους μεθανότροφους μικροοργανισμούς από δείγματα που συλλέχθηκαν σε βάθος 2.000 μέτρων, στο νοτιοανατολικό Αιγαίο. Τα μεθανότροφα βακτήρια διαθέτουν μια μοναδική ικανότητα: μπορούν να επιβιώνουν χρησιμοποιώντας αποκλειστικά το μεθάνιο ως πηγή άνθρακα και ενέργειας, σχηματίζοντας έτσι ένα βιολογικό φράγμα που περιορίζει τη ροή του μεθανίου προς την ατμόσφαιρα. Η διεργασία αυτή παίζει καθοριστικό ρόλο στη ρύθμιση των εκπομπών τόσο από φυσικές πηγές (όπως η διάσπαση υδριτών μεθανίου ή τα ηφαίστεια λάσπης) όσο και από ανθρωπογενείς δραστηριότητες (όπως διαρροές από υποθαλάσσιες γεωτρήσεις). Η ανάπτυξη αυτού του πειραματικού πρωτοκόλλου αποδεικνύει ότι το σύστημα X-PRESS αποτελεί μια πολύτιμη πλατφόρμα για τη μελέτη ευρύτερων περιβαλλοντικών διεργασιών,



όπως ο κύκλος του μεθανίου στα βάθη των ωκεανών και οι μικροβιακοί μηχανισμοί που περιορίζουν την απελευθέρωση αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα.

Καθ' όλη τη διάρκεια του έργου, η διάχυση των αποτελεσμάτων αποτέλεσε βασική προτεραιότητα. Τα ευρήματα παρουσιάστηκαν σε περισσότερα από δεκαπέντε επιστημονικά συνέδρια και συναντήσεις με εκπροσώπους της βιομηχανίας πετρελαίου και φυσικού αερίου, καθώς και σε ενημερωτικές ημερίδες τοπικών φορέων με θέμα την εξερεύνηση κοιτασμάτων υδρογονανθράκων στην Ανατολική Μεσόγειο. Η πρόοδος του έργου και οπτικό υλικό από τις ερευνητικές αποστολές κοινοποιήθηκαν μέσω των επίσημων λογαριασμών του ΙΤΕ/ΙΓ στα μέσα κοινωνικής δικτύωσης, ενώ δύο επιστημονικά άρθρα βρίσκονται υπό προετοιμασία και οι αναλύσεις των δεδομένων που θα συμπεριληφθούν σε μελλοντικές δημοσιεύσεις συνεχίζονται.

Συνολικά, το έργο X-PRESS είχε ως στόχο να εξοπλίσει την Ελλάδα με τα εργαλεία και τη γνώση που απαιτούνται για την αποτελεσματική αντιμετώπιση πιθανών διαρροών υδρογονανθράκων σε μεγάλα βάθη, ιδίως στο πλαίσιο της συνεχιζόμενης έρευνας για φυσικό αέριο εντός της Ελληνικής Αποκλειστικής Οικονομικής Ζώνης (ΑΟΖ), σε βάθη που υπερβαίνουν τα 2.500 μέτρα. Ωστόσο, οι δυνατότητες του έργου υπερβαίνουν κατά πολύ την αντιμετώπιση διαρροών. Το σύστημα X-PRESS αποτελεί πλέον μια εθνική ερευνητική υποδομή, ικανή να υποστηρίξει τη μελέτη της μικροβιακής ζωής σε ακραία περιβάλλοντα. Η έρευνα αυτών των «ακραιόφιλων» μικροοργανισμών μπορεί να αποκαλύψει νέα ένζυμα και βιοχημικές οδούς με εφαρμογές στη βιοτεχνολογία, την ανακάλυψη νέων φαρμάκων και την «πράσινη» χημεία. Παράλληλα, οι ακραίοι μικροοργανισμοί που διαβιούν σε βάθος χιλιομέτρων στο υπέδαφος, παίζουν σημαντικό ρόλο σε τεχνολογίες ενεργειακής μετάβασης, όπως η αποθήκευση CO₂ και H₂ ή την ύπαρξη φυσικών κοιτασμάτων υδρογόνου. Τέλος, η μελέτη των μηχανισμών προσαρμογής στην πίεση φωτίζει τα όρια της ζωής στη Γη — και πιθανώς σε άλλους πλανήτες — συνδέοντας τη μικροβιολογία ακραίων περιβαλλόντων με την αστροβιολογία. Μέσα από αυτές τις ευρύτερες ερευνητικές προοπτικές, το X-PRESS συμβάλλει στην ανάδειξη του ΙΤΕ/ΙΓ σε πρωτοπόρο κέντρο έρευνας στα ακραία περιβάλλοντα και στη «γαλάζια» βιοτεχνολογία στην Ανατολική Μεσόγειο.