

ΤΟΥ ΠΑΝΟΥ ΤΣΙΜΠΟΥΚΗ  
panagiotis@gmail.com

## BIOOIKONOMIA



Ηδη από τα τέλη του 19ου αιώνα οι επιστήμονες είχαν διαπιστώσει ότι η οργανική ύλη, δηλαδή η ύλη που προέρχεται από ζωντανούς οργανισμούς, είναι απαραίτητη για την εμφάνιση κάθε νέας μορφής ζωής. Η ανάπτυξη της βιοτεχνολογίας τις τελευταίες δεκαετίες έχει δείξει ότι η οργανική ύλη δεν είναι μόνο η πρώτη ύλη της ζωής, αλλά μπορεί κάλλιστα να ανακυκλωθεί και να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή προϊόντων. Στις 18 Σεπτεμβρίου διοργανώθηκε στο Λοντράκι ένα πενθήμερο διεθνές συνέδριο αφιερωμένο στα ακραιόφιλα (extremophiles), στους οργανισμούς δηλαδή οι οποίοι έχουν προσαρμοστεί σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες και διαβιούν σε αυτές. Οι οργανισμοί αυτοί αξιοποιούνται ήδη από τη βιομηχανία, αφού «κρύβουν» ένζυμα τα οποία επιταχύνουν σημαντικά τις χημικές αντιδράσεις που είναι απαραίτητες για την παραγωγή διαφόρων πρώτων υλών. Το BHMA-Science απευθύνθηκε στον δρα Κωνσταντίνο Βοργιά, καθηγητή στο Τμήμα Βιολογίας του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (ΕΚΠΑ), επιστημονικό υπεύθυνο και διοργανωτή του εν λόγω συνεδρίου, ο οποίος μάς εξηγεί με ποιον τρόπο οι μικροσκοπικοί αυτοί οργανισμοί μπορούν να συμβάλουν καθοριστικά στη μετάβαση της βιομηχανίας σε ένα βιώσιμο παραγωγικό μοντέλο.

### Οργανισμοί που ζουν... στα άκρα

Τα ακραιόφιλα είναι μια μεγάλη οικογένεια μικρο-οργανισμών που διαβιούν σε ακραία περιβάλλοντα. Καθένας από τους μικρο-οργανισμούς αυτούς κατατάσσεται σε μία ιδιαίτερη κατηγορία, ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο ζει. Οι θερμόφιλοι οργανισμοί, παραδείγματος χάριν, είναι οργανισμοί οι οποίοι ζουν σε περιβάλλοντα όπου παρατηρούνται πολύ υψηλές θερμοκρασίες. «Η πο ακραία συνθήκη είναι η θερμοκρασία» σημειώνει στο BHMA-Science ο δρ Βοργιάς, συμπληρώνοντας ότι «ιοι μικροοργανισμοί οι οποίοι διαβιούν σε υψηλές θερμοκρασίες βρίσκονται στα ηφαίστεια, σε υδρο-θερμικές πηγές κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας ή σε θερμές πηγές στην επιφάνεια της Γης». Τα βάθη των ωκεανών είναι ένα μέρος όπου συναντώνται επίσης ακραίες συνθήκες, αφού το ηλιακό φως είναι λιγόστιο και η πίεση που ασκεί η μάζα του νερού μεγάλη. «Υπάρχουν οργανι-

# ΑΚΡΑΙΟΦΙΛΑ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟΙ «ΘΗΣΑΥΡΟΙ» ΓΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

**Η επιβίωση σε ακραίες συνθήκες - Θερμοκρασίας, πίεσης, φωτός κ.λπ. - έχει εξοπλίσει κάποιους μικροοργανισμούς με ένζυμα, των οποίων η αξιοποίηση από τη βιομηχανία έχει το επιπρόσθετο πλεονέκτημα της φροντίδας των οικοσυστημάτων**



Ο Κωνσταντίνος Βοργιάς

οι οποίοι οι αναπτύσσονται σε συνθήκες πίεσης που ξεπερνούν τις 300 ατμόσφαιρες σημειώνει ο καθηγητής. Για να αντιληφθούμε πόσο... ακραίο είναι αυτό το περιβάλλον, αρκεί να θυμηθούμε ότι η πίεση στην επιφάνεια τη θάλασσας είναι περίπου μία ατμόσφαιρα. Παρόμοιοι μικροοργανισμοί συναντώνται σε γεωθερμικά πεδία, δηλαδή σε περιοχές όπου η θερμική ενέργεια της Γης διαρρέει από το θερμό εσωτερικό του πλανήτη προς την επιφάνεια, σε περιοχές με υψηλή αλατόπτηρα όπως οι αλυκές, αλλά και σε περιοχές όπως οι πάγοι, οι έρημοι ή τα σημεία όπου συγκεντρώνονται πυρηνικά απόβλητα.

Η Ελλάδα δεν στερείται περιοχών στις οποίες επικρατούν τέτοιου είδους συνθήκες. «Στη χώρα μας υπάρχουν περίπου 600 πηγές όπου συναντώνται ακραιόφιλα. Αν και έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες για τη χαρτογράφηση των μικροοργανισμών αυτών, το αποτέλεσμα δεν είναι ικανοποιητικό, αφού χρειάζεται μια συστηματική και συνεπής καταγραφή» αναφέρει ο καθηγητής. Χαρακτηριστικά παραδείγματα περιοχών όπου επικρατούν ακραίες συνθήκες είναι το ηφαίστειο στη Νίσυρο, θερμές πηγές που υπάρχουν στη Μήλο, στα Μέθανα και στις Θερμούλες, ή ακόμα οι ιαματικές πηγές στη Βόρεια Ελλάδα. «Όλες αυτές είναι πηγές οι οποίες κρύβουν έναν θησαυρό μικροοργανισμών» σημειώνει ο δρ Βοργιάς. Μέχρι σήμερα έχει καταγραφεί μόλις το 2% των συνολικού αριθμού των ακραιόφιλων που εκτυπώνται ότι υπάρχουν στη φύση. Για να εντοπίσουν και νούργιους

### Οι ιδιαίτερότητες των ακραιόφιλων

Οι επιστήμονες ενδιαφέρονται για τη μελέτη αυτών των μικροοργανισμών επειδή, μεταξύ άλλων, παρουσιάζουν έναν πολύ ιδιαίτερο μεταβολισμό. «Οι ακραιόφιλοι μικροοργανισμοί έχουν τη δική τους χημεία. Λόγω του γεγονότος ότι καλούνται να ζήσουν σε δυσμενή περιβάλλοντα, έχουν αναπτύξει έναν ιδιαίτερο μεταβολισμό. Διαθέτουν δηλαδή ένα «οπλοστάσιο» χημικών αντιδράσεων, οι οποίες τους επιτρέπουν να αντεπεξέλθουν σε τέτοιου είδους περιβάλλοντα και οι οποίες δεν συναντώνται σε άλλους οργανισμούς» σημειώνει ο καθηγητής. Η μελέτη του μεταβολισμού των συγκεκριμένων μικροοργανισμών είναι ένα δύσκολο εγχείρημα, αφού οι επιστήμονες καλούνται να δημιουργήσουν στο εργαστήριο ακραίες συνθήκες, οι οποίες θα επιτρέψουν την ανάπτυξή τους και τη μελέτη τους. «Μερικοί από αυτούς τους μικροοργανισμούς ενδέχεται να χρειάζονται πολλούς μήνες για να αναπτυχθούν, απαιτώντας αναερόβιες καταστάσεις ή πολύπλοκα θρεπτικά διαλύματα. Επιπλέον, υπάρχουν και μικροοργανισμοί οι οποίοι δεν μπορούν να καλλιεργηθούν στο εργαστήριο» αναφέρει χαρακτηριστικά ο καθηγητής. Μέχρι σήμερα έχει καταγραφεί μόλις το 2% των συνολικού αριθμού των ακραιόφιλων που εκτυπώνται ότι υπάρχουν στη φύση. Για να εντοπίσουν και νούργιους



Μια από τις πολλές θερμοπηγές στο Εθνικό Πάρκο Yellowstone των ΗΠΑ βάφεται πρασινοκίτρινη χάρη στη δράση των θερμόφιλων βακτηρίων, τα οποία όχι μόνο αντέχουν αλλά και απολαμβάνουν τις συνθήκες που θα ήταν θανατηφόρες για άλλους μικροοργανισμούς.

οργανισμούς, οι ερευνητές πραγματοποιούν μεταγενωμικές αναλύσεις, δηλαδή συλλέγουν δείγματα από ακραία περιβάλλοντα και επιχειρούν να βρουν ίχνη γενετικού υλικού μέσα σε αυτά. Επειτα, χρησιμοποιούν τα «θραύσματα» αυτά του γενετικού υλικού ώστε να ανασυνθέσουν το πλήρες γενετικό υλικό των μικροοργανισμών.

#### Πολύτιμοι για τη βιομηχανία

Εκτός από επιστημονικό ενδιαφέρον που παρουσιάζουν, τα ακραίφιλα έχουν αποδειχθεί πολύτιμα και για τη χημική βιομηχανία, αφού τα ένζυμα τα οποία παράγουν – δηλαδή οι πρωτεΐνες οι οποίες διαμεσολαβούν για να λειτουργήσει ο τόσο ιδιαίτερος μεταβολισμός τους – μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αιχθεί η ταχύτητα των χημικών αντιδράσεων που απαιτούνται για την παραγωγή διαφόρων πρώτων υλών. Επιπλέον, τα ένζυμα αυτά παρουσιάζουν αυξημένη σταθερότητα σε σχέση με ένζυμα που προέρχονται από μη ακραίφιλους μικροοργανισμούς, κάπι που τα κάνει κατάλληλα για βιομηχανική χρήση. «Εδώ και πολλά χρόνια η βιομηχανία έχει διαπιστώσει ότι πρέπει να μειωθεί η χρήση της κλασικής Χημείας και να ενθαρρυνθεί η χρήση ενζύμων για την πραγματοποίηση διάφορων χημικών αντιδράσεων» αναφέρει ο καθηγητής, συμπληρώνοντας ότι «για να ολοκληρωθεί μια χημική διαδικασία μπορεί να απαιτούνται πολλά διαφορετικά στάδια. Ωστόσο, εάν υπάρχει το κατάλληλο ένζυμο, ο αριθμός των σταδίων αυτών μπορεί να μειωθεί δραστικά. Ιστορικά, η διαπίστωση αυτή συνοδεύθηκε με τη ραγδαία ανάπτυξη της βιοτεχνολογίας. Παράλληλα, οι επιστήμονες βρήκαν ότι οι καλύτεροι μικροοργανισμοί που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν σε αυτή την κατεύθυνση είναι αυτοί που ζουν σε ακραία περιβάλλοντα».

**ΤΟ ENZYMO ΣΤΟ ΤΕΣΤ PCR ΓΙΑ ΤΟΝ ΚΟΡΩΝΟΪΟ**

Η μέθοδος PCR (Polymerase Chain Reaction), η οποία έγινε ευρέως γνωστή τα τελευταία χρόνια λόγω των διαγνωστικών τεστ για κορωνοϊό, αναπτύχθηκε χάρη σε ένα ένζυμο το οποίο ανακαλύφθηκε σε ακραίφιλους μικροοργανισμούς που ζουν σε θερμές πηγές.

#### ΠΩΣ «ΚΑΘΑΡΙΖΟΥΝ» ΜΟΛΥΣΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

Τα ακραίφιλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν, μεταξύ άλλων, για την εξυγίανση περιοχών οι οποίες έχουν μολυνθεί από την ανθρώπινη δραστηριότητα. Σε αυτές τις περιοχές συμπεριλαμβάνονται, παραδείγματος χάριν, τα ορυχεία που κλείνουν ή περιοχές όπου υπάρχουν πυρωνικά απόβλητα.

Τα τελευταία χρόνια έχει δημιουργηθεί ένας μικρός αριθμός βιομηχανιών στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής οι οποίες αξιοποιούν αυτόν τον μικροβιακό πλούτο για να πραγματοποίησουν χημικές αντιδράσεις οι οποίες θα ήταν εξαιρετικά δύσκολο να πραγματοποιηθούν με τις κλασικές χημικές μεθόδους. «Οι βιομηχανίες αυτές χρησιμοποιούν μικροοργανισμούς για να συλλέγουν διοξείδιο του άνθρακα από πηγές που παράγουν υψηλές

ποσότητες αυτής της ένωσης – όπως, παραδείγματος χάριν, από βιομηχανίες που παράγουν απόσαλι ή τοιμέντο. Αφού συλλεχθεί, το διοξείδιο του άνθρακα προστίθεται σε βιοαντιδραστήρες, όπου πραγματοποιείται ζύμωση με τη συμβολή μικροοργανισμών. Στο τέλος αυτής της διαδικασίας προκύπτει αιθανόλη» αναφέρει ο καθηγητής. Με τον τρόπο αυτόν, ο άνθρακας που περιέχεται στο διοξείδιο του άνθρακα αξιοποιείται για την παραγωγή μιας χημικής ένωσης η οποία αποτελεί την πρώτη ύλη των καυσίμων αλλά και μιας πληθώρας πολυμερών υλικών. «Πρόκειται για μια διαδικασία η οποία, χωρίς τη διαμεσολάβηση των μικροοργανισμών, είναι εξαιρετικά δύσκολο να πραγματοποιηθεί» σημειώνει ο δρ. Βοργιάς.

#### Μικρόβια-εργοστάσια

Οι βάσεις λοιπόν για την ευρεία αξιοποίηση των μικροοργανισμών σε βιομηχανική κλίμακα έχουν τεθεί. Η περαιτέρω μελέτη του μεταβολισμού οργανισμών όπως τα ακραίφιλα θα επιτρέψει στους επιστήμονες να αναπαράγουν τις ιδιαίτερες χημικές αντιδράσεις σε τεχνητό περιβάλλον. Αυτό μπορεί να γίνει με τη χρήση τροποποιημένων κυττάρων, τα οποία θα περιέχουν όλα τα απαραίτητα ένζυμα που θα επιτρέψουν την πραγματοποίηση μαζικών χημικών αντιδράσεων για την παραγωγή ενώσεων. «Πρόκειται για κύτταρα τα οποία δεν υπάρχουν στη φύση αλλά τα δημιουργούμε στο εργαστήριο. Το πλεονέκτημα είναι ότι μπορούμε να τα «προγραμματίσουμε» έτσι ώστε να πραγματοποιούν τις αντιδράσεις που επιθυμούμε. Τέτοιους είδους κύτταρα μπορούν, παραδείγματος χάριν, να παράγουν μεθάνιο ή να κατανάλων μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα. Με αυτόν τον τρόπο είμαστε σε θέση να φτιάξουμε εκατομμύρια μικρά «εργοστάσια» τα οποία μπορούν να παράγουν δι, τι επιθυμούμε». Τα μικροσκοπικά αυτά «εργοστάσια» θα μπορούν να συλλέξουν μια μεγάλη ποσότητα ενώσεων οι οποίες εκπέμπονται στην απόστραφα από τη βιομηχανική δραστηρότητα και να τις αξιοποιήσουν στην παραγωγή νέων ενώσεων.

#### Κομβικός ο ρόλος στην κυκλική οικονομία

Οπως αντιλαμβάνεται κανείς, η αξιοποίηση των μικροοργανισμών στη βιομηχανία εγγράφεται στις αρχές της βιοοικονομίας, για τη ζύμωση πριν από 5.000 χρόνια. Ωστόσο, η βιοοικονομία έχει επανέλθει πλέον στο προσκήνιο με νέα τεχνολογία και καινούργια εργαλεία» σημει-

## ΑΚΡΑΙΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΖΩΗΣ ΣΤΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ

Οι οργανισμοί οι οποίοι έχουν προσαρμοστεί με τέτοιον τρόπο ώστε να ζουν σε ακραία περιβάλλοντα δίνουν την ευκαιρία στους ερευνητές να μελετήσουν τα «օριά» της ζωής. Η μελέτη των ακραίφιλων δείχνει υπό ποιες προϋποθέσεις μπορεί να υπάρξει ζωή σε άλλους πλανήτες, στους οποίους οι συνθήκες που επικρατούν χαρακτηρίζονται – σύμφωνα με τα δεδομένα της Γης – ακραίες. Οι γνώσεις που έχουν αποκομίσει οι ερευνητές από τέτοιους είδους μικροοργανισμούς έχουν επιτρέψει την καλλιέργεια μικροοργανισμών σε τεχνητά περιβάλλοντα, τα οποία προσομοιάζουν στις συνθήκες που επικρατούν στον Αρη και στον Εγκέλαδο, τον φυσικό δορυφόρο του Κρόνου. Εν όψει των μελλοντικών αποστολών στο Διάστημα, τέτοιου είδους ερευνες ενδέχεται να αποδειχθούν πολύτιμες για τη δημιουργία συνθηκών οι οποίες θα μπορούν να υποστηρίξουν την παραμονή του ανθρώπου σε αστρονομικά σώματα εκτός της Γης.

οργανική ύλη να ανακυκλώνεται και να μετασχηματίζεται σε πρότη ύλη για την παραγωγή προϊόντων».

#### Χωρίς στρατηγικό σχέδιο η Ελλάδα

Αν και ο στόχος φαίνεται ιδιαίτερα φιλόδοξος, στην πραγματικότητα έχουν γίνει ήδη σημαντικά βήματα για τη μετάβαση της οικονομίας σε αυτή την κατεύθυνση. Σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ενωσης, η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (Green Deal) έχει θέσει σαφείς στόχους για τη μετάβαση σε μια βιώσιμη βιομηχανία, οι οποίοι αναμένεται να επικαιροποιηθούν μέχρι το τέλος του τρέχοντος έτους. Παράλληλα, χώρες όπως η Ιταλία, η Γαλλία, η Αγγλία, η Γερμανία και η Φινλανδία έχουν σχεδιάσει συγκεκριμένες στρατηγικές σε αυτή την κατεύθυνση. «Αυτοί που λειπουν είναι οι βαλκανικές χώρες, οι οποίες δεν έχουν συντάξει καν συγκεκριμένες στρατηγικές. Αυτό θα πει ότι η πολιτική εξουσίας δεν έχει αντιληφθεί το μέγεθος του προβλήματος και δεν έχει βάλει τις αντίστοιχες προτεραιότητες» σημειώνει ο δρ. Βοργιάς. Αυτό το πρόβλημα επιχειρούν να αναδείξουν οι Ελληνικές ερευνητές, αναπόσοντας διεθνείς συμμαχίες. «Έχουμε οργανώσει τέσσερα διαδοχικά καλοκαιρινά σχολεία Κυκλικής Βιοοικονομίας και Βιώσιμης Ανάπτυξης στη Θεσσαλονίκη. Η βάση των δραστηριοτήτων μας είναι η Αμερικανική Γεωργική Σχολή - Κολλέγιο Περρωτής, η οποία είναι διεθνώς αναγνωρισμένη σε αυτόν τον τομέα, ενώ παράλληλα δίνει ιδιαίτερη έμφαση σε πρακτικές εφαρμογές. Επίσης, έχουμε αναπτύξει στενή συνεργασία με την Ιταλία, με σκοπό να δημιουργήσουμε έναν κόμβο Βιοοικονομίας στη Νοτιοανατολική Μεσόγειο. Προς το παρόν υπάρχουν αρκετοί κόμβοι στην Κεντρική Ευρώπη και ένας στις πρώτην ανατολικές χώρες (BIOEAST). Εμείς φιλοδοξούμε να συντησούμε και να αναδείξουμε έναν τρίτο ισχυρό πόλο». Λόγω της γεωλογικής ποικιλομορφίας της, η χώρα μας διαθέτει έναν εξαιρετικό πλούτο μικροοργανισμών, ο οποίος ωστόσο παραμένει αναξιοποίητος. Αν και οι πρωτοβουλίες των ερευνητών είναι αξιοθαύμαστες, είναι σήμουρο ότι οι επιλογές της Πολιτείας είναι αυτές που θα καθορίσουν εάν ο πλούτος αυτός θα αξιοποιηθεί για τη μετάβαση σε μια οικονομία που θα «έβεται» τους φυσικούς πόρους της Γης.

## Ο «ΧΡΥΣΟΣ ΚΑΝΟΝΑΣ» ΤΗΣ ΒΙΟΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ

Για να σχεδιαστεί ένα ολοκ