

Οι μικροβιακοί βιοδιεγερτές εφαρμόζονται σε σπόρους, στο έδαφος (άμεσα ή μέσω άρδευσης και γονιμοποίησης) ή σε αναπτυσσόμενα φυτά. Αν και οι μηχανισμοί δράσης των μικροβιακών βιοδιεγερτών στα φυτά δεν έχουν αποσαφηνιστεί πλήρως, υπάρχουν πειστικά στοιχεία για τη θετική τους επίδραση στην ανάπτυξη των φυτών. Είναι πλέον αποδεκτό ότι τα αποτελέσματά τους οφείλονται στον ερεθισμό διαφόρων διεργασιών, οι κυριότερες από τις οποίες είναι οι εξής:

- βιολογική στερέωση αζώτου
- εκπόρωση αδιάλυτων φωσφορικών αλάτων;
- παραγωγή χηλικών ενώσεων σιδήρου;
- παραγωγή ορμονών και έλεγχος της φυτοορμονικής κατάστασης.

Ευεργετικές επιδράσεις βακτηρίων και ριζοβακτηρίων στα φυτά

Η **βιολογική στερέωση αζώτου** είναι μια από τις πιο γνωστές επιδράσεις συμβιωτικών (*Rhizobium* spp.) και κάποιων άλλων μικροοργανισμών (*Azotobacter* spp., *Azospirillum* spp., *Bacillus polymyxa*, *Gluconoacetobacter diazotrophicus*, *Burkholderia* spp., κ.λπ.). Το ατμοσφαιρικό άζωτο (N_2 , 78%) είναι απρόσιτο για τα φυτά λόγω του εξαιρετικά σταθερού τριπλού δεσμού μεταξύ των δύο ατόμων αζώτου. Οι παραπάνω μικροοργανισμοί, μέσω του ενζύμου νιτρογενάση, έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν το ατμοσφαιρικό άζωτο σε αμμωνιακή μορφή (NH_4^+) προσβάσιμη για τα φυτά.

Ο ρόλος της **συμβιωτικής στερέωσης αζώτου** στη διατροφή με άζωτο των οσπριοφόρων καλλιεργειών είναι από καιρό γνωστός. Μεγαλύτερο ενδιαφέρον σήμερα παρουσιάζει η ικανότητα των ελεύθερων μικροοργανισμών να υποστηρίζουν τη διατροφή με άζωτο άλλων αγροτικών καλλιεργειών. Οι διαθέσιμες πληροφορίες σε αυτό το σημείο είναι ακόμη περιορισμένες, αλλά υποτίθεται ότι υπό ευνοϊκές συνθήκες οι μικροβιακοί βιοδιεγερτές που περιέχουν ελεύθερους στερεωτές αζώτου μπορούν να εμπλουτίσουν το έδαφος με 2–3 κιλά αζώτου ανά στρέμμα.

Ένας άλλος μηχανισμός με τον οποίο τα βακτήρια της ριζόσφαιρας (PGPR) διεγείρουν την ανάπτυξη των φυτών είναι η αύξηση της διαθεσιμότητας του φωσφόρου και του σιδήρου στο έδαφος. Αν και η συνολική περιεκτικότητα σε φώσφορο στο έδαφος είναι συνήθως υψηλή, μόνο το 0,1% αυτής είναι διαθέσιμο για τα φυτά λόγω χημικής στερέωσης και χαμηλής διαλυτότητας. Οι μικροοργανισμοί επιτρέπουν τη βιολογική μετατροπή αδιάλυτων ανόργανων και οργανικών φωσφορικών αλάτων σε μορφές προσβάσιμες για τα φυτά. Συνθέτουν και απελευθερώνουν στο περιβάλλον του εδάφους οργανικά οξέα και φωσφατικά ένζυμα (φωσφατάση και φυτάση). Τα οργανικά οξέα αυξάνουν τη διαθεσιμότητα των ανόργανων φωσφορικών αλάτων, ενώ τα φωσφατικά ένζυμα αυξάνουν τη διαθεσιμότητα των οργανικών φωσφορικών αλάτων. Τα κυριότερα PGPR που έχουν αυτή την

ικανότητα ανήκουν στα γένη Burkholderia, Pseudomonas, Bacillus, Rhizobium, Agrobacterium, Achromobacter, Streptomyces, Micrococcus, Erwinia, κ.λπ. Αυτοί οι μικροοργανισμοί συλλογικά παράγουν οργανικά οξέα χαμηλού μοριακού βάρους που οξινίζουν το διάλυμα του εδάφους και έτσι αυξάνουν τη διαλυτότητα των φωσφορικών ιόντων από τις ενώσεις που περιέχουν φώσφορο. Με τη διάλυση αδιάλυτων φωσφορικών αλάτων, οι μικροοργανισμοί μπορούν έμμεσα να αφομοιώσουν ένα σημαντικό μέρος του P από το διάλυμα του εδάφους. Μετά το θάνατο των μικροβιακών κυττάρων, ο φώσφορος που περιέχεται σε αυτά απελευθερώνεται, γεγονός που επιτρέπει την απορρόφησή του τόσο από τα φυτά όσο και από άλλους οργανισμούς του εδάφους.

Οι μικροοργανισμοί που διαλύουν φωσφορικά άλατα παρουσιάζουν ένα ευρύ φάσμα μεταβολικών λειτουργιών σε διαφορετικά περιβάλλοντα, γεγονός που οδηγεί σε σημαντικά υψηλότερη ανάπτυξη των φυτών, βελτιωμένες ιδιότητες του εδάφους και αυξημένη βιολογική δραστηριότητα. Αυτοί οι μικροοργανισμοί συμμετέχουν επίσης στη στερέωση του ατμοσφαιρικού αζώτου, επιταχύνουν τη διαθεσιμότητα άλλων μικροθρεπτικών συστατικών, παράγουν φυτοορμόνες όπως οι ωξίνες, οι κυτοκίνινες και οι γιβερελλίνες· απελευθερώνουν σιδηροφόρες, υδροκυάνιο, ένζυμα και/ή μυκητοκτόνες ενώσεις όπως χιτινάση, κυτταρινάση, πρωτεάση, οι οποίες παρέχουν ανταγωνισμό έναντι φυτοπαθογόνων μικροοργανισμών.

Ένα μεγάλο μέρος του σιδήρου σε εδάφη με ουδέτερη ή αλκαλική αντίδραση βρίσκεται σε μορφή μη διαθέσιμη για τα φυτά, όπως το ιόν σιδήρου Fe(III). Τα φυτά έχουν δύο στρατηγικές για την απορρόφηση σιδήρου: **στρατηγική 1** με αύξηση της διαλυτότητάς του, ακολουθούμενη από αναγωγή στο ιόν σιδήρου Fe(II) στις μεμβράνες των κυττάρων της ρίζας, και **στρατηγική 2** (κυρίως σε σιτηρά είδη) με έκκριση φυτοσιδηροφόρων που σχηματίζουν χηλικούς συμπλόκους με το Fe(III). Οι μικροοργανισμοί της ριζόσφαιρας, παρόμοια με τις σιτηρές καλλιέργειες, μπορούν να διευκολύνουν την απορρόφηση σιδήρου από τα φυτά μέσω της σύνθεσης μικροβιακών σιδηροφόρων (χηλικών ενώσεων χαμηλού μοριακού βάρους). Τα βακτήρια παράγουν κυρίως τρεις ομάδες σιδηροφόρων – κατεχολικές, υδροξαμικές και καρβοξυλικές, ενώ οι μύκητες του εδάφους παράγουν τέσσερις ομάδες: φερριχρόμες, κοπρογένες, φουσαρινίνες και ροδοτορουλικό οξύ. Ανεξάρτητα από τη φύση τους, σχηματίζουν διαλυτούς συμπλόκους σιδήρου που συμμετέχουν στην αφομοίωση του σιδήρου και στην απορρόφησή του από τα φυτά. Υποτίθεται ότι ο σύμπλοκος Fe(III)–σιδηροφόρος σχηματίζεται στην επιφάνεια του ορυκτού, μεταφέρεται στο διάλυμα του εδάφους και γίνεται διαθέσιμος για απορρόφηση από άλλους οργανισμούς. Ο ρόλος των σιδηροφόρων δεν περιορίζεται μόνο στην αύξηση της βιοδιαθεσιμότητας του Fe, αλλά περιλαμβάνει επίσης την ικανότητα να σχηματίζουν συμπλόκους με άλλα απαραίτητα στοιχεία (δηλαδή Mo, Mn, Co και Ni) στο περιβάλλον, βελτιώνοντας τη μικροβιακή τους απορρόφηση.

Ένας τρίτος μηχανισμός με τον οποίο οι μικροοργανισμοί επηρεάζουν τα φυτά σχετίζεται με την παραγωγή φυτοορμονών (ή αυξητικών ρυθμιστών), καθώς και με τον έλεγχο της ορμονικής κατάστασης των φυτών. Είναι

γνωστό ότι φυτοορμόνες όπως οι ωξίνες, οι γιβερελλίνες, οι κυτοκινίνες, η αιθυλένιο, το αβσισικό οξύ και άλλες ρυθμίζουν μια σειρά φυσιολογικών και μορφολογικών διεργασιών στα φυτά.

Έχει επανειλημμένα διαπιστωθεί ότι η εκπομπή αιθυλενίου μειώνεται σε εμβολιασμένα φυτά. Η αιθυλένιο είναι γνωστή ως η ορμόνη της γήρανσης. Ο πρόδρομός της στα φυτά είναι το 1-αμινοκυκλοπροπάνιο-1-καρβοξυλικό οξύ (ACC). Υπό συνθήκες στρες, η παραγωγή αιθυλενίου αυξάνεται, περιορίζει την ανάπτυξη και διεγείρει τη γήρανση στα φυτά. Η ACC δεαμινάση, που παράγεται από μικροοργανισμούς, έχει την ικανότητα να μειώνει τα επίπεδα αιθυλενίου σε εμβολιασμένα φυτά και να αποκαθιστά τις διεργασίες ανάπτυξης.

Ευεργετικές επιδράσεις των ενδομυκορριζικών μυκήτων στα φυτά

Η **μυκόρριζα** (εκτο- και ενδο-) είναι μια συμβίωση μεταξύ των ριζών του 80% των χερσαίων φυτών και των μυκορριζικών μυκήτων. Η ενδομυκόρριζα μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στη μεταλλική διατροφή των φυτών επειδή σχηματίζει ένα δίκτυο υφών που αυξάνει σημαντικά τον όγκο και την επιφάνεια επαφής των ριζών στο έδαφος.



Δημιουργία μιας μυκορριζόσφαιρας γύρω από τις ρίζες με την προσθήκη μυκορριζικών προϊόντων στο έδαφος

Είναι γνωστό ότι οι ρίζες των φυτών καταλαμβάνουν όχι περισσότερο από 5–10% του εσωτερικού όγκου του εδάφους· επομένως, ένα μεγάλο μέρος των θρεπτ