

ΒΙΟΔΙΕΓΕΡΤΕΣ

Είναι ή όχι ενισχυτές θρέψης, άμυνας σε αβιοτικές καταπονήσεις και παραγωγικότητας των φυτών;

Στο άρθρο αυτό παρουσιάζονται οι επιδράσεις των βιοδιεγερτών (biostimulants) στις καλλιέργειες και στο περιβάλλον (έδαφος, θρεπτικά στοιχεία, νερό, μικροοργανισμοί) από διάφορες οπτικές γωνίες και αναδεικνύονται οι μελλοντικές δράσεις που απαιτούνται να αναληφθούν από τις ρυθμιστικές αρχές, τις ερευνητικές ομάδες και τη βιομηχανία παραγωγής, ώστε να βελτιωθεί η εμπιστοσύνη και η αξιοπιστία ως προς τη σύνθεση, την αποτελεσματικότητα και την ασφαλή χρήση τους. Ειδικότερα, με βάση την έρευνα διεθνώς και τις εμπειρίες από την πράξη, προσεγγίζεται το μεγάλο ερώτημα εάν και κατά πόσο η εφαρμογή βιοδιεγερτών μπορεί να επηρεάσει γενετικές, βιοχημικές και φυσιολογικές διεργασίες που αλλάζουν τη συμπεριφορά των φυτών και συμβάλλουν: α) στην αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των θρεπτικών στοιχείων και στην κατ' επέκταση μείωση της χρήσης λιπασμάτων, β) στον μετριασμό ή και στην αντιμετώπιση των επιδράσεων των φυτών από αβιοτικές καταπονήσεις (ξηρασία, πλημμύρα, υψηλή θερμοκρασία, ψύχος, αλατότητα, έλλειψη θρεπτικών στοιχείων, βαρέα μέταλλα) που προκαλούνται από την κλιματική κρίση, γ) στην αύξηση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών και στην ως εκ τούτου διασφάλιση της μελλοντικής επιστημονικής ασφάλειας.

ΗΛΙΑΣ Γ. ΕΛΕΥΘΕΡΟΧΩΡΙΝΟΣ

Ομότιμος Καθηγητής Α.Π.Θ., Μέλος Ελληνικής Γεωργικής Ακαδημίας, Εξωτερικό μέλος Συμβουλίου Διοίκησης Γ.Π.Α.

Η μεγαλύτερη πρόκληση της σύγχρονης γεωργίας είναι η απειλούμενη δυνατότητα κάλυψης των μελλοντικών διατροφικών αναγκών της ανθρωπότητας εξαιτίας του συνεχώς αυξανόμενου πληθυσμού, της μεταβολής του κλίματος, της αλλαγής της συχνότητας, της έντασης και της διάρκειας ακραίων φαινομένων (υψηλή θερμοκρασία, ψύχος, ξηρασία, πλημμύρα, υπερϊώδης ακτινοβολία), της υποβάθμισης των εδαφών από διάβρωση, ερημοποίηση, συμπίεση ή αλατότητα, της ρύπανσης του περιβάλλοντος από λιπάσματα και φυτοπροστατευτικά προϊόντα, καθώς και του ανεπαρκούς αριθμού ποικιλιών φυτών με μηχανισμούς άμυνας σε βιοτικές ή/και αβιοτικές καταπονήσεις (Colla και Rouphael, 2015; Jiang κ.ά., 2024; Li κ.ά., 2022; Nephali κ.ά., 2020; Yakhin κ.ά., 2017). Η πρόκληση αυτή **μπορεί να αναχαιπιστεί** ή/και να αντιμετωπιστεί μέσω της λήψης δράσεων μετριασμού της μεταβολής του κλίματος, της βελτίωσης των γεωργικών υποδομών και του επιπέδου ετοιμότητας των ασχολούμενων με τη γεωργία, της δημιουργίας νέων ποικιλιών φυτών με μηχανισμούς άμυνας σε βιοτικές ή/και αβιοτικές καταπονήσεις, της χρήσης βιοεισορών (βιοδιεγερτών, βιολιπασμάτων, ορμονών, φυτορυθμιστικών ουσιών, βιοφυτοπροστατευτικών προϊόντων, επαγωγέων-διεγερτών επίκτητης συστηματικής ανοσίας των φυτών σε παθογόνα ή/και ανοχής σε αβιοτικές καταπονήσεις) και σύγχρονου εξοπλισμού ψηφιακής γεωργίας, καθώς και της εφαρμογής φιλοπεριβαλλοντικών γεωργικών πρακτικών. Το **ερευνητικό** και το **εμπορικό ενδια-**



φέρων των βιοδιεγερτών είναι αυξανόμενο παγκοσμίως με ταχύ ρυθμό κατά τις δύο τελευταίες δεκαετίες (Cristofano κ.ά., 2021; du Jardin, 2015; Lardos κ.ά., 2024; Yakhin κ.ά. (2017). Συγκεκριμένα, το πρόσφατο ερευνητικό ενδιαφέρον τεκμαίρεται από τη χρονική κατανομή των δημοσιευμένων ερευνητικών εργασιών στην επιστημονική βάση Web of Science, η οποία δείχνει ότι 37 εργασίες με τη λέξη-κλειδί «biostimulant (βιοδι-

γέρτης)» είχαν δημοσιευθεί την περίοδο 1975-2005, ενώ αυξήθηκαν ακολούθως σε 50, 154, 692 και 1796 κατά τις περιόδους 2006-10, 2011-15, 2016-20 και 2021-24-November, αντίστοιχα. Επίσης, το εμπορικό ενδιαφέρον των βιοδιεγερτών επιβεβαιώνεται από τη συνολική παγκόσμια εμπορική αξία, η οποία το 2014 ήταν 2,0 δισεκ. δολάρια (\$), ενώ το 2024 και το 2032 αναμένεται να ανέλθει στα 4,0 και 9,75 δισεκ. \$, αντίστοι-

χα (Kisvarga κ.ά., 2022; <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/biostimulants-market-100414>).

Ο όρος **βιοδιεγέρτης** χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1997 από τους Zhang και Schmidt για να περιγράψουν «**υλικά που προάγουν την ανάπτυξη των φυτών** όταν εφαρμόζονται σε ελάχιστες ποσότητες», ενώ οι Traon κ.ά. (2014) για «**ουσίες ή/και μικροοργανισμούς που εφαρμόζονται σε σπόρους, φύλλωμα ή ριζόσφαιρα με σκοπό την τόνωση φυσικών διεργασιών των φυτών, οι οποίες ενισχύουν την αποτελεσματικότητα χρήσης θρεπτικών συστατικών ή/και την άμυνα σε αβιοτικές καταπονήσεις, ανεξάρτητα από την περιεκτικότητά τους σε θρεπτικά στοιχεία ή συνδυασμό άλλων ουσιών και μικροοργανισμών**». Ο du Jardin (2015) όρισε τους βιοδιεγέρτες ως «**μείγμα ουσιών ή/και μικροοργανισμών που εφαρμόζονται στα φυτά με σκοπό τη βελτίωση της θρέψης, της άμυνας σε αβιοτικές καταπονήσεις και των ποιοτικών τους χαρακτηριστικών, ανεξάρτητα από την περιεκτικότητά τους σε θρεπτικά συστατικά**», ενώ οι Halpern κ.ά. (2015) ως «**ουσίες ή υλικά, με εξαίρεση τα θρεπτικά στοιχεία και τα φυτοπροστατευτικά προϊόντα, τα οποία, όταν εφαρμόζονται με τη μορφή σκευασμάτων σε φυτά, σπόρους, υποστρώματα, έχουν την ικανότητα να τροποποιούν τις φυσιολογικές διεργασίες των φυτών και να παρέχουν ως εκ τούτου πιθανά οφέλη για την αύξηση, την ανάπτυξη ή την απόκριση σε αβιοτικές καταπονήσεις**». Οι βιοδιεγέρτες, κατά τους Yakhiin κ.ά. (2017), είναι «**προϊόντα βιολογικής προέλευσης που βελτιώνουν την παραγωγικότητα των φυτών μέσω της επαγωγής νέων ή αναδυόμενων ιδιοτήτων των συστατικών των φυτών και όχι ως αποκλειστική συνέπεια της παρουσίας και δράσης βασικών θρεπτικών συστατικών, φυτικών ορμονών, ρυθμιστών ανάπτυξης φυτών ή βιοφυτοπροστατευτικών προϊόντων που πιθανώς εμπεριέχονται σε ελάχιστες ποσότητες στα σκευάσματα**» ή είναι «**βιολογικά μόρια και μικροοργανισμοί με μη επαρκώς τεκμηριωμένο τρόπο δράσης, αλλά με θετική επίδραση σε βιολογικές λειτουργίες των φυτών**», ενώ, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (2019) [Κανονισμός (ΕΕ) 2019/1009], είναι «**προϊόντα λίπανσης που έχουν ως λειτουργία να διεγείρουν τις διαδικασίες θρέψης των φυτών ανεξάρτητα από την περιεκτικότητα των προϊόντων σε θρεπτικά στοιχεία, με μοναδικό σκοπό τη βελτίωση ενός ή περισσότερων από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά του φυτού ή της ριζόσφαιράς του (α) αποτελεσματικότητα-αποδοτικότητα της χρήσης των**



θρεπτικών στοιχείων, β) άμυνα-ανοχή σε αβιοτικές καταπονήσεις, γ) χαρακτηριστικά ποιότητας, δ) διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων που συγκρατούνται στο έδαφος ή στη ριζόσφαιρα]». Το Environmental Protection Agency (EPA, 2020) όρισε τους βιοδιεγέρτες ως «**ουσίες, μικροοργανισμοί ή μείγματα αυτών, που όταν εφαρμόζονται σε σπόρους, φυτά, ριζόσφαιρα, έδαφος ή άλλα μέσα ανάπτυξης, υποστηρίζουν τις φυσικές διεργασίες θρέψης ανεξάρτητα από την περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά του βιοδιεγέρτη, βελτιώνουν τη διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων, την αποδοτικότητα πρόσληψης-χρήσης τους και νερού, την άμυνα σε αβιοτικές καταπονήσεις, και την κατ'επίκταση αύξηση, ανάπτυξη, ποιότητα και απόδοση των καλλιεργειών**», ενώ το European Biostimulants Industry Council (EBIC, 2024) ως «**ουσίες ή/και μικροοργανισμοί που, όταν εφαρμόζονται στο φύλλωμα ή στη ριζόσφαιρα, ενισχύουν την αύξηση και την ανάπτυξη των φυτών σε όλη τη διάρκεια του βιολογικού τους κύκλου μέσω της βελτίωσης του μεταβολισμού, της αύξησης της άμυνας σε αβιοτικές καταπονήσεις, της διευκόλυνσης της απορρόφησης και αφομοίωσης θρεπτικών στοιχείων, της βελτίωσης φυσιολογικών ιδιοτήτων του εδάφους, της αύξησης ωφέλιμων μικροοργανισμών του εδάφους και της αποτελεσματικότητας χρήσης νερού**».

Τα όσα προαναφέρθηκαν καταδεικνύουν την **ανυπαρξία** διεθνώς **αποδεκτού ορισμού** των βιοδιεγερτών και, μάλιστα, οι περισσότεροι ορισμοί περιγράφουν

τους βιοδιεγέρτες ως «**αυτό που επηρεάζουν γενικώς παρά αυτό που είναι (συστατικά) και πώς επηρεάζουν τα φυτά σε μοριακό επίπεδο**». Η διαπίστωση αυτή καθιστά αναγκαία την κατάταξή τους βάσει των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των δραστικών τους συστατικών ώστε να βελτιωθεί η δυνατότητα πληρέστερου ορισμού τους βάσει αυτού που είναι και των επιδράσεών τους στα φυτά και στο περιβάλλον.

Κατάταξη βιοδιεγερτών

Οι **βιοδιεγέρτες**, σύμφωνα με τους du Jardin (2015), Ευρωπαϊκή Επιτροπή (2019), Jiang κ.ά. (2024), Kisvarga κ.ά. (2022), μπορούν να **καταταγούν** με βάση το είδος, την πηγή προέλευσης και τις φυσικοχημικές ιδιότητες των δραστικών τους συστατικών, τη συχνότητα, τον χρόνο (στάδιο καλλιέργειας) και τον τρόπο εφαρμογής (φύλλωμα, έδαφος, σπόρο, λιπάσματα), τις επιδράσεις στα φυτά, καθώς και τον μηχανισμό και τρόπο δράσης σε μοριακό επίπεδο. Ειδικότερα, βάσει του είδους και της πηγής προέλευσης των συστατικών, οι βιοδιεγέρτες διακρίνονται σε **μικροβιακούς** (περιέχουν βακτήρια, μύκητες, ζύμες) ή **μη μικροβιακούς** [περιέχουν διάφορα χημικά συστατικά όπως χουμικές ουσίες, εκχυλίσματα φυκών και φυτών, πρωτεΐνες, πεπτίδια, αμινοξέα, χιτοζάνη και άλλα βιοπολυμερή, σάκχαρα (ολιγο-/πολυ-σακχαρίτες), λιπίδια, βιταμίνες, φυτικές ορμόνες, ορμονικές ουσίες, φαινολικές ενώσεις, στερόλες, εκχυλίσματα υπολειμμάτων υδατοκαλλιεργειών και τροφίμων, υλικά κομποστο-



ποίησης, ανόργανα στοιχεία].

Ο du Jardin (2015) διακρίνει τους βιοδιεγέρτες σε χουμικές ουσίες, υδρολύματα πρωτεϊνών και άλλες αζωτούχες ουσίες, εκκυλίσματα φυκών και φυτών, χιτοζάνη και άλλα βιοπολυμερή, ανόργανα στοιχεία, ευεργετικοί μύκητες και ευεργετικά βακτήρια, ενώ η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (2019) [Κανονισμός (ΕΕ) 2019/1009, 2019] κατατάσσει τους βιοδιεγέρτες στα προϊόντα λίπανσης, τα οποία περιλαμβάνουν λιπάσματα (ανόργανα, οργανικά, οργανο-ανόργανα), σύμμεικτα προϊόντα λίπανσης, υλικά ασβέστωσης, βελτιωτικά εδάφους, υποστρώματα καλλιέργειας, λιπάσματα με αναστολείς νιτροποίησης, απονίτρωσης ή ουρεάσης, καθώς και βιοδιεγέρτες (μικροβιακοί, μη μικροβιακοί). Οι Kisvarga κ.ά. (2022) διακρίνουν τους βιοδιεγέρτες σε υδρολύματα πρωτεϊνών, χιτοζάνη, εκκυλίσματα φυκών, χουμικές ουσίες, βακτήρια (συμβιωτικά ριζοβακτήρια και μη συμβιωτικά-ριζοσφαιρικά) και μύκητες, ενώ οι Jiang κ.ά. (2024) σε χουμικές ουσίες, πρωτεΐνες, ολιγοσακχαρίτες, μεταβολίτες, ανόργανες ουσίες, οργανικές ουσίες και μικροοργανισμούς.

Τα όσα προαναφέρθηκαν τεκμαίρουν ότι, εκτός από την προαναφερθείσα αναπαρέξια κοινά αποδεκτού ορισμού, **δεν υπάρχει κοινά αποδεκτός τρόπος κατάταξης των βιοδιεγερτών**. Αυτό όμως που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι οι κυριότερες ομάδες δραστικών συστατικών που εμπεριέχονται στους περισσότερους **μη μικροβιακούς βιοδιεγέρτες**

είναι τα **εκκυλίσματα φυκών** [προέρχονται από τα είδη *Ascophyllum nodosum*, *Ecklonia maxima*, *Macrocystis pyrifera*, *Durvillea potatorum*, *Fucus serratus* και *Laminaria digitata* που περιέχουν βεταΐνες, ολιγοσακχαρίτες, πολυσακχαρίτες, φαινολικές ουσίες, στερόλες, πολυαμίνες και θρεπτικά στοιχεία (Battacharyya κ.ά., 2015)], οι **χουμικές ουσίες** [χουμικά και φουλβικά οξέα της οργανικής ουσίας του εδάφους που προκύπτουν από την αποδόμηση φυτικών, ζωικών και μικροβιακών υπολειμμάτων (Jiang κ.ά., 2024)] και τα **υδρολύματα πρωτεϊνών** [μείγματα πεπτιδίων και αμινοξέων που προέρχονται από χημική ή/και ενζυμική υδρόλυση φυτικών και ζωικών πρωτεϊνών, χωρίς όμως να αποκλείονται και κάποια χημικώς συντηθέμενα βασικά αμινοξέα, βεταΐνες, πολυαμίνες και μη πρωτεϊνικά αμινοξέα (Colla κ.ά., 2015)]. Όσον αφορά τους **μικροβιακούς βιοδιεγέρτες**, οι κυριότεροι μικροοργανισμοί που εμπεριέχονται στα σκευάσματα είναι το ενδοσυμβιωτικό βακτήριο *Rhizobium* και τα ριζοσφαιρικά μη συμβιωτικά βακτήρια *Azotobacter* και *Azospirillum* (διατίθενται κυρίως για τη δέσμευση αζώτου από την ατμόσφαιρα), καθώς και ο ευρύτερα διαδεδομένος τύπος ενδομυκορριζας *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF). Τέλος, αρκετοί βιοδιεγέρτες είναι μείγματα χημικών ουσιών και μικροοργανισμών, ενώ ορισμένοι από αυτούς εμπεριέχουν και άλλες ουσίες που δεν αναγράφονται στην ετικέτα των σκευασμάτων (Vessey, 2003).

Επιδράσεις βιοδιεγερτών σε φυτά και περιβάλλον

Οι επιδράσεις των βιοδιεγερτών σε φυτά και περιβάλλον σχετίζονται με τη βελτίωση της θρέψης, την ενίσχυση της άμυνας-ανοχής σε αβιοτικές καταπονήσεις, καθώς και την αύξηση της παραγωγικότητας [εκροή (απόδοση, ποιότητα, αξία)/ εισροές]] των καλλιεργειών. Όσον αφορά τις **επιδράσεις βιοδιεγερτών** στη θρέψη φυτών, αυτές περιλαμβάνουν :

- 1) Επαγωγή έκφρασης γονιδίων κωδικοποίησης ενζύμων - πρωτεϊνών που συμμετέχουν σε βιοχημικές και φυσιολογικές διεργασίες,
- 2) Δέσμευση του αζώτου (N₂) της ατμόσφαιρας (βακτήρια),
- 3) Βιοσύνθεση χλωροφύλλης, καροτενοειδών, πρωτεϊνών, υδατανθράκων και ορμονών (κυτοκινίνες, αυξίνες, αβισικό οξύ, γιββερελλίνες),
- 4) Μεταβολισμό λιπών, υδατανθράκων και πρωτεϊνών,
- 5) Αύξηση διαπερατότητας κυτταρικών τοιχωμάτων και κυτταρικών μεμβρανών με αποτέλεσμα τη βελτίωση της απορρόφησης, μετακίνησης και αφομοίωσης θρεπτικών στοιχείων, συστατικών βιοδιεγερτών και νερού,
- 6) Αύξηση διαθεσιμότητας θρεπτικών στοιχείων του εδάφους,
- 7) Τροποποίηση οξειδοαναγωγικού δυναμικού του εδάφους,
- 8) Μείωση του pH εδάφους μέσω της επαγωγής των ριζών των φυτών για απελευθέρωση ιόντων H⁺ και οξέων (κιτρικό, οξαλικό, μηλικό) στη ριζόσφαιρα,
- 9) Δυνατότητα σχηματισμού συμπλόκων με ιχνοστοιχεία (δράση σαν κηλικές ενώσεις),
- 10) Δέσμευση-απομάκρυνση βαρέων μετάλλων,
- 11) Βιοσύνθεση ή δράση σαν ωσμωλύτες που μετριάζουν φαινόμενα ώσμωσης υπό συνθήκες αλατότητας και ξηρασίας,
- 12) Βελτίωση δομής, γονιμότητας, αερισμού εδάφους,
- 13) Ενίσχυση μικροβιακής δραστηριότητας του εδάφους, και
- 14) Αύξηση ριζικού συστήματος (Bulgari κ.ά., 2015; du Jardin, 2015; Jiang κ.ά., 2024; Yakhin κ.ά., 2017; Zhang και Schmidt, 2000).

Οι βιοδιεγέρτες, σύμφωνα με τις προαναφερθείσες επιδράσεις στη θρέψη φυτών, θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως «προϊόντα διέγερσης διεργασιών που βελτιώνουν τη συμπεριφορά των φυτών ως προς τη δυνατότητα χρήσης - αποδοτικότητας θρεπτικών στοιχείων» ή ως «ενισχυτές αποδοτικότητας λιπασμάτων (fertilizers efficiency enhancers)».

Οι επιδράσεις των βιοδιεγερτών στην άμυνα και προσαρμογή των φυτών σε αβιοτικές καταπονήσεις περιλαμβάνουν αρχικά την απορρόφηση (ρίζες, φύλλωμα) και μετακίνηση συστατικών βιοδιεγερτών στον χώρο δράσης (κυτταρόπλασμα, κλωροπλάστη, μιτοχόνδριο, πυρήνας), ενώ στη συνέχεια τη ρύθμιση φυτικών ορμονών, οι οποίες δρουν σαν πρωτογενή μόρια σηματοδότησης που πυροδοτούν έκφραση γονιδίων αντιοξειδωτικού μηχανισμού, ενεργοποίησης δευτερογενούς μεταβολισμού, ρύθμισης ώσμωσης, ορμονικής σηματοδότησης, καθώς και άλλων φυσιολογικών και μορφολογικών αλλαγών των φυτών (Nephali κ.ά., 2020). Ειδικότερα, οι βιοδιεγέρτες (μετά την απορρόφηση και μετακίνηση στον χώρο δράσης) :



- 1) Επάγουν την έκφραση γονιδίων α) κωδικοποίησης αντιοξειδωτικών ενζύμων [δισμουτάση υπεροξειδίου (SOD), ασκορβική υπεροξειδάση (APX), καταλάση (CAT), υπεροξειδάση γλουταθειόνης (GPX), υπεροξειδάση (POX) και αναγωγάση της γλουταθειόνης (GR)], τα οποία καταλύουν αντιδράσεις αποδιέγερσης ενεργών μορφών οξυγόνου [μονήρες οξυγόνο (1O_2), ρίζα ανιόντος υπεροξειδίου ($O_2^{\cdot-}$), ρίζα υδροξυλίου ($\bullet OH$), υπεροξειδίου του υδρογόνου (H_2O_2)], β) παραγωγής μη ενζυμικών αντιοξειδωτικών ουσιών [φαινολικές ενώσεις, αμινοξέα, καροτενοειδή, γλουταθειόνη, ασκορβικό οξύ και α-τοκοφερόλη (βιταμίνη E)], γ) κωδικοποίησης προστατευτικών πρωτεϊνών (δέσμευσης mRNA, συνοδές, όψιμες εμβρυογένεσης, ωσμωρύθμισης, θερμικής καταπόνησης, μεταφορείς, υδατοπορίνες, ρύθμισης μεταγραφής γονιδίων),
- 2) Αναστολή της ανάπτυξης πλαγίων ριζών με αποτέλεσμα την κατακόρυφη σε βάθος επιμήκυνση της πρωτογενούς ρίζας,
- 3) Κλείσιμο στοματίων και συστροφή φύλλων για μείωση της απώλειας νερού μέσω της διαπνοής,
- 4) Μείωση περιεκτικότητας κλωροφύλλης και κατ' επέκταση της φωτοσύνθεσης,
- 5) Αποκοπή και μείωση της επιφάνειας φύλλων,
- 6) Μείωση ρυθμού ανάπτυξης των φυτών,
- 7) Αύξηση βιοσύνθεσης μεταβολικών που σχετίζονται με την άμυνα των φυτών, και
- 8) Μετριασμός ώσμωσης μέσω ωσμωλυτών (βεταΐνες, αμινοξέα, πολυύλες και μη αναγωγικά σάκχαρα).

Οι προαναφερθείσες επιδράσεις των βιοδιεγερτών στη θρέψη και στην άμυνα των φυτών σε καταπονήσεις, σύμφωνα με τους Akhter κ.ά. (2021), Lephatsi κ.ά. (2021), Nephali κ.ά. (2020) και Sum κ.ά. (2022), είναι αποτέλεσμα της ικανότητάς τους να ενεργοποιούν μηχανισμούς ανίχνευσης σημάτων εξωγενούς κινδύνου που ενσωματώθηκαν στο γονιδίωμα των φυτών κατά τη διάρκεια της εξέλιξης με τη μορφή γονιδίων μνήμης για απόκριση σε ερεθίσματα-σήματα περιβαλλοντικών πιέσεων. Οι κυριότεροι μηχανισμοί υποστήριξης της μνήμης των φυτών για απόκριση και προσαρμογή σε επακόλουθες καταπονήσεις είναι :

- 1) Η **επαγόμενη έκφραση γονιδίων** κωδικοποίησης των απαραίτητων μεταβολικών, ενζύμων και πρωτεϊνών που συμμετέχουν σε βιοχημικές και φυσιολογικές αναπροσαρμογές,
- 2) Η **δυνατότητα** συνεχών **αλλαγών** των **επιπέδων έκφρασης** των γονιδίων κωδικοποίησης βασικών παραγόντων σηματοδότησης, και
- 3) Η **επιγενετική ρύθμιση** (epigenetic regulation) της **έκφρασης των γονιδίων** που καθοδηγείται από :
 - 1) Μεθυλίωση ή απομεθυλίωση του DNA,
 - 2) Τροποποίηση ιστονών,
 - 3) Βιογένεση RNA παρεμβολής (RNA interference) που προκαλεί σίγαση έκφρασης γονιδίων.



Οι βιοδιεγέρτες, βάσει των προαναφερθεισών επιδράσεων σε φυτά υπό συνθήκες καταπόνησης, θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως «*χημικοί ή/και μικροβιακοί προετοιμαστές άμυνας και προσαρμογής των φυτών (defence priming ή pre-conditioning agents ή plant defences and adaptive mechanisms) σε επακόλουθες αβιοτικές καταπονήσεις*» (Nerhali κ.ά. 2020) ή ως «*χημικά ή/και μικροβιακά μέσα διέγερσης διεργασιών μεταβολισμού, αναδιάρθρωσης της βιοχημείας και φυσιολογικής λειτουργίας που προετοιμάζουν τα φυτά για απόκριση και προσαρμογή σε αβιοτικές πιέσεις*».

Οι επιδράσεις βιοδιεγερτών σε **χαρακτηριστικά παραγωγικότητας** φυτών περιλαμβάνουν αύξηση φυλλικής επιφάνειας, βιομάζας, ριζικού συστήματος, καρπόδεσης, βάρους και μεγέθους καρπού, απόδοσης και ποιότητας των προϊόντων (περιεκτικότητας σε μακρο- και μικρο-θρεπτικά στοιχεία, χλωροφύλλης και καροτενοειδών) των λαχανοκομικών καλλιεργειών μπρόκολου, μαρουλιού, σπανακιού, πιπεριάς, τομάτας και πατάτας, καθώς και μείωση της συσσώρευσης νιτρικών και ξηράς ουσίας σε φυλλώδη λαχανικά (Bulgari κ.ά., 2015). Επίσης, οι Li κ.ά. (2022) αναφέρουν ότι η εφαρμογή βιοδιεγερτών αύξησε την απόδοση σιτηρών, ψυχανθών, φρούτων και λαχανοκομικών καλλιεργειών έως 18% (11-23%), και μάλιστα η ποσοστιαία αύξηση της απόδοσης των λαχανοκομικών καλλιεργειών ήταν μεγαλύτερη υπό συνθήκες ξηρασίας, αμυνωδών ή αλατούχων ή χαμηλής περιεκτικότητας σε οργανική ουσία και θρεπτικά στοιχεία εδάφους. Επιπρόσθετα, οι Lardos κ.ά. (2024) βρήκαν ότι βιοδιεγέρτες με υδρολύματα πρωτεϊνών αύξησαν την απόδοση σόγιας και πιπεριάς κατά 32% και 22%, αντίστοιχα, ενώ οι Sun κ.ά. (2024) κατέγραψαν σημαντική αύξηση αιθέριων ελαίων και φαινολών

σε αρωματικά φυτά.

Οι προαναφερθείσες βιολογικές **επιδράσεις** των βιοδιεγερτών στα φυτά και στο περιβάλλον είναι **πάρα πολλές**, ενώ ορισμένες εξ αυτών είναι **εικαζόμενες ή δεν εκδηλώνονται παντού και πάντοτε** κατά τον ίδιο τρόπο. Αυτό είναι αποτέλεσμα δυσερμίνευτων αλληλεπιδράσεων λόγω συνεργισμού ή ανταγωνισμού μεταξύ των πολλών παραγόντων κατά την εφαρμογή των βιοδιεγερτών όπως :

- 1) Τα συστατικά των σκευασμάτων,
- 2) Ο τρόπος εφαρμογής (επένδυση σπόρων, επικάλυψη λιπασμάτων, ριζοπτιση-υδρολίπανση στο έδαφος ή ψεκασμός στο φύλλωμα των καλλιεργειών),
- 3) Η συχνότητα, ο χρόνος (στάδιο καλλιέργειας) και η δόση εφαρμογής,
- 4) Το είδος και η ποικιλία (γενότυπος) της καλλιέργειας,
- 5) Η σύσταση και η γονιμότητα του εδάφους,
- 6) Ο βαθμός διαθεσιμότητας των απαραίτητων θρεπτικών στοιχείων του εδάφους για την καλλιέργεια,
- 7) Οι κλιματολογικές συνθήκες πριν, κατά και μετά την εφαρμογή των βιοδιεγερτών, και
- 8) Οι γεωργικές πρακτικές (Bulgari κ.ά., 2015; Cristofano κ.ά., 2021 Hildebrandt κ.ά., 2015; Roychoudhury και Tripathy, 2020).

Η παραδοχή των πολλών προαναφερθεισών επιδράσεων των **βιοδιεγερτών** εξηγεί και τη δυνατότητα **χαρακτηρισμού** τους με **άλλους όρους** όπως βιογενείς διεγέρτες (biogenic stimulators/stimulants), φυτοδιεγέρτες (phytostimulators), βιοενεργοποιητές (bioeffectors), ενισχυτικές φυτών (plant strengtheners, fitofortificants), θετικό ρυθμιστές ανάπτυξης φυτών (positive plant growth regulators), φυτορυθμιστές ουσίες (plant conditioners), ρυθμιστές αύξησης (growth regulators), βιορυθμιστές (bioregulators), ενισχυτές μεταβολισμού (metabolic enhancers), ενισχυτές επίκτητης άμυνας φυτών (plant defense elicitors), προστατευτικοί χημικοί παράγοντες (protective chemical agents), ορμονικά προϊόντα (hormone-containing products), ενισχυτές συμπεριφοράς λιπασμάτων (enhancers of fertilisers performance), ενισχυτές αποδοτικότητας λιπασμάτων (fertilisers efficiency enhancers), άλλα λιπάσματα (other fertilizers), πρακτικές βελτίωσης της υγείας του εδάφους (soil health-promoting practices), ουσίες βελτίωσης εδάφους (soil improvers) ή συμπληρώματα (supplements) (Kisvarga κ.ά., 2022; Roychoudhury και Tripathy, 2020; Yakhin κ.ά., 2017). Αξίζει να αναφερθεί ότι στην εργασία των Yakhin κ.ά. (2017) εμπεριέχονται 18 ορισμοί με τους προαναφερθέντες όρους και περισσότεροι από 30 ορισμοί με τον όρο biostimulant/ plant biostimulant/ biostimulant microorganisms/ organic

biostimulants/ agricultural biostimulant/ biostimulant plant growth.

Οι **βιοδιεγέρτες**, εκτός από τη μη εκδήλωση των ευεργετικών επιδράσεων κατά τον ίδιο τρόπο παντού και πάντοτε, σε ορισμένες περιπτώσεις, προκαλούν και **αρνητικές επιδράσεις** σε καλλιέργειες. Για παράδειγμα, οι Kocira κ.ά. (2019) βρήκαν ότι η εφαρμογή ενός βιοδιεγέρτη από αμινοξέα και εκχυλίσματα φυκών **μείωσε** την πρόσληψη, την πεπτικότητα και την ενεργειακή αξία τριών ποικιλιών σόγιας μέσω της αύξησης της περιεκτικότητας των σπόρων σε λιγνίνη, κυτταρίνη και ημικυτταρίνη. Επίσης, ο Turan (2021) παρατήρησε ότι η εφαρμογή τεσσάρων βιοδιεγερτών σε καλλιέργεια τομάτας **μείωσε** τη δράση των αντιοξειδωτικών ενζύμων καταλάση (CAT), δι-σμουτάση του υπεροξειδίου (SOD) και υπεροξειδάση (POD), καθώς και την περιεκτικότητα σε υπεροξειδίο υδρογόνου (H₂O₂), μπλονική διαδεύδη (MDA) και προλίνη. Επιπρόσθετα, οι Grabowska κ.ά. (2015) αναφέρουν ότι η εφαρμογή τριών βιοδιεγερτών **μείωσε** το ξηρό βάρος, την περιεκτικότητα σε β-καροτένιο, βιταμίνη C, διαλυτά σάκχαρα, διαλυτά στερεά (Brix), θρεπτικά στοιχεία (K, P, Mg, Zn) και τη συνολική αντιοξειδωτική δράση των καρπών δύο ποικιλιών τομάτας. Η μείωση των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών της σόγιας και της τομάτας επηρεάστηκε σημαντικά από το είδος, τη δόση και τη συχνότητα εφαρμογής των βιοδιεγερτών, την ποικιλία της καλλιέργειας, τη γονιμότητα του εδάφους και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Τέλος, οι Bouranis κ.ά. (2023)

βρήκαν ότι το σελήνιο βιοδιεγερτών, σε χαμηλές συγκεντρώσεις, προστατεύει τα φυτά από αβιοτικές καταπονήσεις, ενώ, σε υψηλές συγκεντρώσεις, επάγει **οξειδωτική καταπόνηση**, η οποία τροποποιεί πρωτεΐνες και επηρεάζει αρνητικά βιοχημικές λειτουργίες των φυτών.

Μηχανισμός και τρόπος δράσης βιοδιεγερτών

Τα διεθνή δεδομένα δείχνουν ότι ο μηχανισμός και τρόπος δράσης των βιοδιεγερτών είναι **ανεπαρκώς τεκμηριωμένος** σε μοριακό επίπεδο (γενετικό, βιοχημικό, φυσιολογικό), γεγονός που δικαιολογεί την ανυπαρξία κοινά αποδεκτού ορισμού και τρόπου κατάταξης, καθώς και την ύπαρξη εικαζόμενων ευεργετικών επιδράσεων στα φυτά και στο περιβάλλον (du Jardin, 2015; Jiang κ.ά., 2024; Nephali κ.ά., 2020; Ulrich-Merzenich κ.ά., 2009; Yakhin κ.ά., 2017). Ειδικότερα για τον **μηχανισμό δράσης**, υπενθυμίζεται ότι ορίζεται ως «ο αρχικώς επηρεαζόμενος χώρος (πυρήνας, χλωροπλάστης, μιτοχόνδριο, κυτταροδιάλυμα) ή στόχος (ένζυμο-πρωτεΐνη) από κάποιο δραστικό συστατικό των βιοδιεγερτών με αποτέλεσμα την πυροδότηση γενετικών, φυσιολογικών και βιοχημικών διεργασιών του φυτού», ενώ ο τρόπος δράσης έχει ευρύτερη έννοια και περιγράφεται ως «αλληλουχία διεργασιών όπως επαφή, συγκράτηση, απορρόφηση, μετακίνηση και συσσώρευση βιοδιεγέρτη στον χώρο δράσης ή πρόσδεση στον στόχο δράσης, επαγωγή έκφρασης γονιδίων, παραγωγή ενζύμων/πρωτεϊνών, συμμετοχή σε φυ-



σιολογικές ή/και βιοχημικές διεργασίες, βιοσύνθεση βιομορίων και μεταβολιτών, ενίσχυση θρέψης/άμυνας σε αβιοτικές καταπονήσεις/αύξησης/ανάπτυξης/απόδοσης/ποιότητας φυτών».

Η **μελέτη** του **μηχανισμού** και τρόπου **δράσης** των βιοδιεγερτών σε γενετικό, βιοχημικό, φυσιολογικό, κυτταρικό και φυτικό επίπεδο, αν και αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη βιομηχανία παραγωγής και τις ρυθμιστικές αρχές που θεσπίζουν κανόνες αξιολόγησης, έγκρισης, διάθεσης και χρήσης τους, παραμένει **στόχος προσέγγισης**. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη δυσκολία διερεύνησής του εξαιτίας της ανυπαρξίας κοινού πρωτοκόλλου έρευνας, των πολλών δραστικών συστατικών που εμπεριέχονται στα διάφορα σκευάσματα, των διαφορετικών πηγών προέλευσης των συστατικών (βακτήρια, μύκητες, ζύμες, φύκη, φυτά, ζώα), των πολλών βιομηχανικών διεργασιών (καλλιέργεια, ζύμω-

ση, επεξεργασία, εκκύλιση, υδρόλυση και καθαρισμός) που χρησιμοποιούνται κατά την παρασκευή τους, καθώς και των πολλών, πολλαπλών και ως εκ τούτου δυσερμήνευτων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των συστατικών των βιοδιεγερτών και των παραγόντων που επηρεάζουν τις συμμετέχουσες διεργασίες στον μηχανισμό-τρόπο δράσης τους σε φυτά (Yakhin κ.ά., 2017). Αυτό όμως που χρήζει ιδιαίτερης μνείας είναι ότι η επαρκής τεκμηρίωση του μηχανισμού και τρόπου δράσης των βιοδιεγερτών **δεν κατέστη δυνατή**, αν και χρησιμοποιήθηκαν όλες σχεδόν οι **σύγχρονες μέθοδοι**, όπως η φυσικοχημική ανάλυση των δραστικών συστατικών, η γενετική μηχανική, η επεξεργασία γονιδιώματος και η βιοπληροφορική, οι μοριακοί δείκτες, οι στρατηγικές-omics (γενωμική, μεταγραφωμική, πρωτεωμική, μεταβολωμική), η ανάλυση γενετικών, φυσιολογικών και βιοχημικών διεργασιών, καθώς και ο προσδιορισμός χαρακτηριστικών αύξησης, ανάπτυξης, απόδοσης και ποιότητας των καλλιεργειών (Bulgarí κ.ά., 2015; Nephali κ.ά., 2020; Ulrich-Merzenich κ.ά., 2009).

Η προαναφερθείσα μεγάλη δυσκολία διερεύνησης των ιδιοτήτων και των επιδράσεων των βιοδιεγερτών, σε συνδυασμό με την αναγκαιότητα για ασφαλή διάθεση και αποτελεσματική χρήση, οδήγησε τους Yakhin κ.ά. (2017) να προτείνουν την εστίαση της μελλοντικής έρευνας στην επιστημονική τεκμηρίωση των επιδράσεων των βιοδιεγερτών σε διεργασίες των φυτών όπως η φωτοσύνθεση, η παραγωγή ορμονών, η απορρόφηση-πρόσληψη-αφομοίωση θρεπτικών στοιχείων και νερού, και η ενεργοποίηση έκφρασης υπεύθυνων γονιδίων για την άμυνα σε αβιοτικές καταπονήσεις. Η μη αναγκαιότητα της ενδελεχούς μελέτης του μηχανισμού - τρόπου δράσης των **βιοδιεγερτών** δικαιολογείται και από το γεγονός ότι η **συνολική δράση** τους δεν είναι το άθροισμα των επιμέρους δράσεων των μεμονωμένων συστατικών αλλά **«αποτέλεσμα δυσερμήνευτης αλληλεπίδρασης μεταξύ των διαφόρων συστατικών που εμπεριέχονται στα σκευάσματα, του τρόπου εφαρμογής (επένδυση σπόρου, επικάλυψη λιπασμάτων, εφαρμογή στο φύλλωμα ή στο έδαφος), της συχνότητας, του χρόνου (στάδιο καλλιέργειας) και της δόσης εφαρμογής, του είδους και της ποικιλίας των καλλιεργειών, των κλιματικών παραγόντων, της γονιμότητας του εδάφους και των γεωργικών πρακτικών»**. Επομένως, αν γίνει αποδεκτό ότι ένας



βιοδιεγέρτης είναι προϊόν επιστημονικά τεκμηριωμένου οφέλους αλλά με μη πλήρως καθορισμένους μηχανισμούς και τρόπους δράσης, η έγκρισή του από τις ρυθμιστικές αρχές γίνεται ευκολότερη διότι θα περιορίζεται μόνο στην τεκμηρίωση της αποτελεσματικής χρήσης του.

Η επαρκής τεκμηρίωση της **ασφαλούς χρήσης** είναι εξίσου σημαντική για την έγκριση των βιοδιεγερτών από τις ρυθμιστικές αρχές, διότι, κατά τους Yakhin κ.ά. (2017), οι περισσότεροι βιοδιεγέρτες θεωρούνται (αυτό δεν σημαίνει ότι είναι) ασφαλείς λόγω της βιολογικής προέλευσης των συστατικών τους (φυσικά συστατικά χερσαίων και υδάτινων οικοσυστημάτων ή/και μεταβολίτες φυτικής, ζωικής και μικροβιακής προέλευσης) και της εφαρμογής τους σε χαμηλές συγκεντρώσεις, με αποτέλεσμα να θεωρούνται βιοαποδομήσιμοι, μη τοξικοί, μη ρυπογόνοι και μη επικίνδυνοι για οργανισμούς μη στόχους.





Συμπεράσματα και προτάσεις

Η συνόψιση των επιδράσεων των βιοδιεγερτών στα φυτά παρέχει τη δυνατότητα να λεχθεί ως **απάντηση** στο αρχικό ερώτημα του άρθρου αυτού ότι οι **κατάλληλοι βιοδιεγέρτες**, «*αν και δεν είναι λιπάσματα (τα λιπάσματα εφαρμόζονται σε μεγάλες ποσότητες που παρέχουν θρεπτικά στοιχεία στα φυτά, ενώ οι βιοδιεγέρτες εφαρμόζονται σε ελάχιστες ποσότητες που αλλάζουν τη συμπεριφορά-απόκριση των φυτών στα θρεπτικά στοιχεία), φυτοπροστατευτικά προϊόντα (τα οποία έχουν άμεση επίδραση σε έντομα, μύκητες, ζιζάνια, ενώ ορισμένοι βιοδιεγέρτες διεγείρουν φυσιολογικές και βιοχημικές διεργασίες που ενισχύουν την άμυνα-ανοσία-αντίσταση των φυτών σε εκθρούς), ρυθμιστές ανάπτυξης φυτών (οι βιοδιεγέρτες δεν επιταχύνουν ή δεν επιβραδύνουν τον ρυθμό ανάπτυξης και ωρίμανσης φυτών), βελτιωτικά εδάφους ή φυτικές ορμόνες*», διεγείρουν - ρυθμίζουν - τροποποιούν **γενετικές** (έκφραση γονιδίων), **βιοχημικές** ή/και **φυσιολογικές διεργασίες**, οι οποίες ενισχύουν τη θρέψη, την άμυνα σε αβιοτικές καταπονήσεις και την παραγωγικότητα των φυτών, με επακόλουθο την αποτελεσματικότερη χρήση λιπασμάτων και νερού από τα φυτά, τη μείωση των αρνητικών επιδράσεων της γεωργίας στο περιβάλλον, τη μείωση του κόστους παραγωγής και τον μετριασμό της επισιτιστικής ανασφάλειας.

Η ανυπαρξία διεθνώς αποδεκτού ορισμού και τρόπου κατάταξης των βιοδιεγερτών, η μη επακριβής αναγραφή των συστατικών (**σύνθεση**) και των **ισχυρισμών αποτελεσματικότητας**, η ανεπαρκής επιστημονική τεκμηρίωση του **μηχανισμού και τρόπου δράσης** σε μοριακό επίπεδο, η **εικαζόμενη - μη τεκμηριωμένη ασφαλής χρήση** σε καταναλωτές, φυτά και περιβάλλον, η ασαφής κανονιστική ρύθμιση για έγκριση, επίβλεψη και έλεγχο από ρυθμιστικές αρχές ως προς τη σύνθεση, την αποτελεσματικότητα και την ασφάλεια χρήσης των βιοδιεγερτών, καθιστούν αναγκαία τη **διεπιστημονική συνεργασία** μεταξύ ρυθμιστικών αρχών, χημικών, φυσιολόγων, βιοχημικών, γενετιστών, οικολόγων, περιβαλλοντολόγων, στελεχών της βιομηχανίας, γεωπόνων γεωργικών φορέων και ειδικών συμβούλων της γεωργικής παραγωγής με σκοπό την ενδελεχή μελέτη τους βάσει **κοινά αποδεκτού πρωτοκόλλου**. Η συνεργασία αυτή,



εκτός από την απόκτηση απαραίτητων γνώσεων σχετικών με το κατά πόσο «*οι βιοδιεγέρτες ενισχύουν τη θρέψη, την άμυνα σε καταπονήσεις και την παραγωγικότητα των φυτών*», θα καταστήσει δυνατή την ανάπτυξη εργαλείων αποτελεσματικότερης και ασφαλέστερης χρήσης των βιοδιεγερτών σε καλλιέργειες και περιβάλλον, αλλά, επιπρόσθετα, θα διευκολύνει τον διαχωρισμό τους από τα βιολιπάσματα, τα βιοφυτοπροστατευτικά προϊόντα, τους ενισχυτές άμυνας φυτών, τις φυτορρυθμιστικές ουσίες, τις ορμόνες, τα λιπάσματα και τα βελτιωτικά εδάφους. Βέβαια, εκτός από την προαναφερθείσα αναγκαιότητα για διεπιστημονική συνεργασία, εξίσου αναγκαία είναι και η **σήμεση των μελλοντικών σκευασμάτων** των βιοδιεγερτών ως προς τη **σύνθεση** των εμπεριεχομένων συστατικών, την **αποτελεσματικότητα** και την **ασφάλεια** χρήσης τους. Η απαίτηση αυτή, αν και αποτελεί πρόσθετη οικονομική και χρονική επιβάρυνση για τις εταιρείες παραγωγής, είναι στοιχείο τεκμηρίωσης των ισχυριζόμενων επιδράσεων των βιοδιεγερτών που διευκολύνει την έγκρισή τους από τις ρυθμιστικές αρχές, αλλά επιπρόσθετα **ενισχύει την αξιοπιστία, την εμπιστοσύνη και την αποδοχή** της κοινωνίας και των χρηστών τους (BRIA, 2022; Ευρωπαϊκή Ένωση, 2019; Ricci κ.ά., 2019).

Η σχετική βιβλιογραφία βρίσκεται στη διεύθυνση : bibliography.agrotypos.gr, έτος 2025, τεύχος 01. ■