

Η ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΧΗΜΙΚΗΣ ΕΝΑΥΣΗΣ

Ως εργαλείο για την προστασία της πατάτας από τον παγετό

Το άρθρο εξετάζει τη χημική έναυση ως στρατηγική ενίσχυσης της αντοχής της πατάτας στον παγετό, μέσω της εφαρμογής φυσικών ενώσεων που ενεργοποιούν τους ενδογενείς μηχανισμούς άμυνας των φυτών. Στο πλαίσιο του έργου FreePot, αξιολογήθηκαν οι επιδράσεις της μελατονίνης και της γλυκίνης-μπεταΐνης σε φυτά πατάτας υπό συνθήκες ψύχους. Τα πειραματικά δεδομένα ανέδειξαν σημαντική προστατευτική δράση της μελατονίνης, η οποία συσχετίστηκε με ενίσχυση της αντιοξειδωτικής απόκρισης και ρύθμιση γονιδιακών και μεταβολικών οδών. Η χημική έναυση προτείνεται ως βιώσιμη προσέγγιση διαχείρισης αβιοτικών καταπονήσεων.

ΙΦΙΓΕΝΙΑ ΜΕΛΛΙΔΟΥ¹, ΙΩΑΝΝΗΣ ΓΑΝΟΠΟΥΛΟΣ¹, ΑΛΙΚΗ ΞΑΝΘΟΠΟΥΛΟΥ¹

¹ Ινστιτούτο Γενετικής Βελτίωσης και Φυτογενετικών Πόρων, ΕΛ.Γ.Ο.-ΔΗΜΗΤΡΑ

Τι είναι η χημική έναυση;

Τα φυτά, ως ακίνητοι οργανισμοί, εκτίθενται καθημερινά σε μια σειρά από δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες για την ανάπτυξή τους, που μπορεί να περιλαμβάνουν την ξηρασία και την αλατότητα στο έδαφος, τις υψηλές θερμοκρασίες και τον παγετό. Για να μπορέσουν να επιβιώσουν, έχουν αναπτύξει διάφορους μηχανισμούς προσαρμογής, ώστε να αντεπεξέρχονται σε αυτές τις μεταβαλλόμενες και συχνά ακραίες συνθήκες.

Ένα εντυπωσιακό χαρακτηριστικό τους είναι αυτό που οι επιστήμονες ονομάζουν «μνήμη» καταπόνησης. Με απλά λόγια, όταν ένα φυτό εκτεθεί σε μια αντίξοες συνθήκες (π.χ. χαμηλή θερμοκρασία), έχει την ικανότητα να θυμάται αυτή την εμπειρία και όταν ξανασυμβεί, αντιδρώντας ταχύτερα και πιο αποτελεσματικά. Αυτό επιτυγχάνεται μέσα από την παραγωγή ειδικών φυσικών ουσιών που διαμεταγωγούν το σήμα του «στρες» και ενεργοποιούν τους μηχανισμούς άμυνας των φυτών.

Τα τελευταία χρόνια, η επιστήμη έχει προχωρήσει σημαντικά στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο τα φυτά ανταποκρίνονται σε τέτοιου είδους καταπονήσεις. Παράλληλα, οι ερευνητές έχουν δοκιμάσει την εφαρμογή συγκεκριμένων φυσικών ή συνθετικών χημικών ουσιών που λειτουργούν ως “εκπαιδευτικά ερεθίσματα” για τα φυτά. Η πρακτική αυτή ονομάζεται χημική έναυση (chemical priming), και βασίζεται στο γεγονός ότι ένα φυτό που έχει «ενεργοποιηθεί» εκ των προτέρων, μπορεί να αντιμετωπίσει πιο αποτελεσματικά την επικείμενη κα-



ταπόνηση. Οι ουσίες αυτές, γνωστές και ως παράγοντες έναυσης, μπορούν να είναι ενεργές μορφές οξυγόνου (όπως το υπεροξειδίο του υδρογόνου και το νιτρικό οξειδίο), φυτοορμόνες (όπως το σαλικυλικό ή το αποκοπτικό οξύ), πτητικές ουσίες, αμινοξέα, και η μελατονίνη. Η χημική έναυση είναι μια σύγχρονη και πολλά υποσχόμενη γεωργική πρακτική, κατά την οποία χρησιμοποιούνται φυσικές ή συνθετικές χημικές ενώσεις για να “εκπαιδεύσουν” τα φυτά ώστε να αποκτούν αυξημένη αντοχή σε αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες, πριν ακόμα αυτές εμφανιστούν. Μέσα από την εφαρμογή ορισμένων ουσιών, τα φυτά ενεργοποιούν τους μηχανισμούς άμυνας τους, όπως την παραγωγή αντιοξειδωτικών ουσιών, την ενίσχυση της κυτταρικής μεμβράνης ή τη ρύθμιση των ορμονών τους, καθιστώντας τα πιο έτοιμα να αντιμετωπίσουν ακραίες και απρόβλεπτες καταστάσεις, όπως τα αιφνίδια επεισόδια παγετού, ή τις υψηλές θερμοκρασίες.

Πώς οι μεταβολίτες και οι φυτο-ορμόνες «ξυπνούν» τις άμυνες των φυτών

Όπως ο άνθρωπος έχει το ανοσοποιητικό του σύστημα, έτσι και τα φυτά διαθέτουν εξαιρετικά πολύπλοκους μηχανισμούς άμυνας απέναντι στις περιβαλλοντικές καταπονήσεις. Μία από τις πιο σημαντικές «γραμμές άμυνας» είναι οι ίδιες οι φυσικές ουσίες που παράγονται από τα φυτά, όπως είναι οι **πρωτογενείς και οι δευτερογενείς μεταβολίτες** και οι **φυτοορμόνες**. Οι μεταβολίτες είναι οργανικά μόρια που βοηθούν το φυτό να ανταπεξέλθει σε συνθήκες καταπόνησης, όπως είναι ο παγετός. Ορισμένες από αυτές, όπως το **προλίνη**, η **γλυκίνη-μπεταΐνη** ή η **τρεχαλόζη**, προστατεύουν τα κύτταρα του φυτού διατηρώντας τη συνεκτικότητα των κυτταρικών μεμβρανών και μειώνοντας τις ζημιές από το ψύχος. Οι **φυτο-ορμόνες**, από την άλλη, είναι ουσίες που ρυθμίζουν τις ζωτικές λειτουργίες του φυτού. Μερικές από τις πιο γνωστές, όπως το **σα-**

Πίνακας 1. Συνοπτική επισκόπηση των ουσιών χημικής έναυσης που έχουν δοκιμαστεί για την ενίσχυση της προσαρμογής των φυτών σε διάφορες αβιοτικές καταπονήσεις.

Ουσία	Κατηγορία	Αβιοτική καταπόνηση	Μηχανισμός Δράσης
Υπεροξειδίο του υδρογόνου (H ₂ O ₂)	Ενεργή μορφή οξυγόνου (ROS)	Ξηρασία, Αλατότητα, Θερμικό στρες	Σηματοδότηση για ενεργοποίηση γονιδίων άμυνας, ενίσχυση αντιοξειδωτικής απόκρισης.
Ασκορβικό οξύ	Αντιοξειδωτικό	Αλατότητα	Ενίσχυση αντιοξειδωτικής (ενζυματικής και μη-) απόκρισης
Νιτρικό οξειδίο (NO)	Αέριο σηματοδότησης	Ξηρασία, Αλατότητα, Θερμικό στρες	Ρύθμιση ορμονικών και αντιοξειδωτικών αποκρίσεων, βελτίωση φωτοσύνθεσης.
Μελατονίνη	Φυτοορμόνη / Αντιοξειδωτικό	Παγετός, Ξηρασία, Αλατότητα	Ενίσχυση αντιοξειδωτικών ενζύμων, ρύθμιση γονιδίων άμυνας, βελτίωση φωτοσυνθετικής απόδοσης.
Ιασηνικό οξύ	Φυτοορμόνη	Ξηρασία, Θερμικό στρες, Αλατότητα, Παγετός	Ενεργοποίηση γονιδίων άμυνας, ενίσχυση αντιοξειδωτικών ενζύμων, ρύθμιση μεταβολισμού.
Σαλικυλικό οξύ (SA)	Φυτοορμόνη	Παγετός, Αλατότητα, Ξηρασία	Ενεργοποίηση γονιδίων άμυνας, ενίσχυση αντιοξειδωτικών ενζύμων.
Αμπισαϊκό οξύ (ABA)	Φυτοορμόνη	Ξηρασία, Παγετός, Αλατότητα	Ρύθμιση κλεισίματος στομάτων, διατήρηση υδατικού ισοζυγίου, ενεργοποίηση γονιδίων άμυνας.
Στριγκολακτόνες	Φυτοορμόνη	Αλατότητα	Ενίσχυση αντιοξειδωτικού μηχανισμού, μείωση υπεροξειδωσής λιπιδίων.
Προλίνη	Οσμωπροστατευτικό/αμινοξύ	Ξηρασία, Αλατότητα, Παγετός	Σταθεροποίηση πρωτεϊνών και μεμβρανών, ρύθμιση ωσμωτικής πίεσης.
Γλυκίνη-μπεταΐνη	Οσμολύτης	Ξηρασία, Αλατότητα, Παγετός	Προστασία μεμβρανών, διατήρηση ενζυμικής δραστηριότητας.
Τρεχαλόζη	Οσμωπροστατευτικό/σάκχαρο	Ξηρασία, Παγετός, Αλατότητα	Σταθεροποίηση πρωτεϊνών και μεμβρανών, ρύθμιση μεταβολισμού σακχάρων.
Σπερμίνη/οπερμιδίνη	Οσμωπροστατευτικό/πολυαμίνες	Αλατότητα, Ξηρασία, Θερμικό στρες	Ενίσχυση αντιοξειδωτικών ενζύμων, σταθεροποίηση μεμβρανών.
Νανοσωματίδια πυριτίου	Νανοσωματίδια	Αλατότητα, Ξηρασία, Θερμικό στρες	Ενίσχυση αντιοξειδωτικής άμυνας, βελτίωση πρόσληψης θρεπτικών στοιχείων.
Χουμικά οξέα	Βιοδιαγεργικά / Οργανικά μόρια	Αλατότητα, Ξηρασία, Τοξικότητα βαρέων μετάλλων	Ενίσχυση αντιοξειδωτικών ενζύμων, ρύθμιση ορμονικών σημάτων, βελτίωση πρόσληψης θρεπτικών στοιχείων.

λικυλικό οξύ και το αποκοπτικό **οξύ**, έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικές στο να προετοιμάζουν τα φυτά για αντίξοες καταστάσεις. Για παράδειγμα, όταν εφαρμόζονται στο φυτό – συνήθως με διαφυλλικούς ψεκασμούς - πριν από ένα αναμενόμενο κύμα παγετού, ενεργοποιούν ειδικά γονίδια και ενισχύουν τα αντιοξειδωτικά του συστήματα, βελτιώνοντας την προσαρμογή τους στις χαμηλές θερμοκρασίες.

Η εφαρμογή της χημικής έναυσης για την αντιμετώπιση των αιφνίδιων συμβάντων παγετού στην πατάτα

Η πατάτα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη σε χαμηλές θερμοκρασίες, ιδιαίτερα όταν ο παγετός πλήττει νεαρά φυτά ή κατά την περίοδο ανάπτυξης των κονδύλων. Ο παγετός προκαλεί σοβαρές φυσιολογικές βλάβες, όπως νέκρωση των ιστών, αναστολή της φωτοσύνθεσης και διαταραχή στη μεταφορά νερού και θρεπτικών στοιχείων. Ακόμα και μικρής διάρκειας παγετοί, με θερμοκρασίες κοντά ή λίγο κάτω από το μηδέν, μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές απώλειες στην απόδοση και την ποιότητα της παραγωγής.

Με την κλιματική αλλαγή, οι ασυνήθιστες και απότομες θερμοκρασιακές

μεταβολές τείνουν να αυξάνονται κάθε χρόνο, καθιστώντας τα καλλιεργούμενα φυτά ακόμα πιο ευάλωτα. Η ανάγκη για αποτελεσματικές, φιλικές προς το περιβάλλον και εύκολα εφαρμόσιμες λύσεις προστασίας είναι πιο επίκαιρη από ποτέ. Ένα ενδιαφέρον παράδειγμα είναι η **μελατονίνη**, μια φυσική ουσία που βρίσκεται σε διάφορα φυτά. Σε πειράματα με κερασιές, η μελατονίνη μείωσε τη φθορά από παγετό, ενισχύοντας την αντιοξειδωτική άμυνα των ανθοφόρων οφθαλμών (Ruiz-Aracil et al., 2024). Αν και οι δοκιμές στην πατάτα είναι πιο περιορισμένες, τέτοιες ενώσεις ανοίγουν νέους ορίζοντες για την εφαρμογή της χημικής έναυσης και σε αυτήν την καλλιέργεια.

Η χρήση της χημικής έναυσης έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας οδηγώντας σε πολυάριθμες δημοσιεύσεις που επικεντρώνονται στη δημιουργία πρωτοκόλλων εφαρμογής. Στο πλαίσιο της Δράσης 2 του Υπομέτρου 16.1 – 16.2 «Υλοποίηση του επιχειρησιακού σχεδίου (project) των Επιχειρησιακών Ομάδων της ΕΣΚ για την παραγωγικότητα και βιωσιμότητα της γεωργίας», η ερευνητική ομάδα του Ινστιτούτου Γενετικής Βελτίωσης και Φυτογενετικών Πόρων του ΕΛΓΟ ΔΗΜΗΤΡΑ (Επιστημονικά Υπεύθυνη - Δρ. Αλίκη

Ξανθοπούλου), σε συνεργασία με την ΕΑΣ Δράμας (Επιστημονικά Υπεύθυνος- Γεώργιος Σωτηρέλης), το Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο της Κύπρου (Επιστημονικά Υπεύθυνος - Δρ. Βασίλειος Φωτόπουλος) και την εταιρεία NOVACERT (Επιστημονικά Υπεύθυνος και Συντονιστής - Ιωάννης Ευαγγελόπουλος) υλοποίησε το ερευνητικό έργο με τίτλο «Ενίσχυση της ανθεκτικότητας της πατάτας στον παγετό με την χρήση της χημικής έναυσης» (FreePot, M16ΣΥΝ2-00083, 2023-2025), ενσωματώνοντας τις τελευταίες επιστημονικές εξελίξεις και τις καινοτομίες στον τομέα της χημικής έναυσης, ενάντια στον παγετό.

Ειδικότερα, μελετήθηκαν δύο χημικοί παράγοντες (μελατονίνη, MEL; γλυκίνη μπεταΐνη, GB) ως υποψήφιοι “ενισχυτές” της αντοχής των φυτών πατάτας σε συνθήκες παγετού (-2°C). Σε φυτά πατάτας, στο στάδιο βλαστικής ανάπτυξης τεσσάρων (4) εβδομάδων, εφαρμόστηκαν οι υπό μελέτη ουσίες με ψεκασμό σε συγκέντρωση 100 μΜ και 25 mM, αντίστοιχα. Μετά από 24 h, τα φυτά τοποθετήθηκαν σε θάλαμο ανάπτυξης υπό ελεγχόμενες συνθήκες παγετού (-2°C) και σκοτάδι, για διαστήματα 2, 4 και 6 h, συνθήκες που προσομοιάζουν τα αιφνίδια επεισόδια παγετού που παρατηρούνται στον αγρό. Μετά την έκθεσή τους



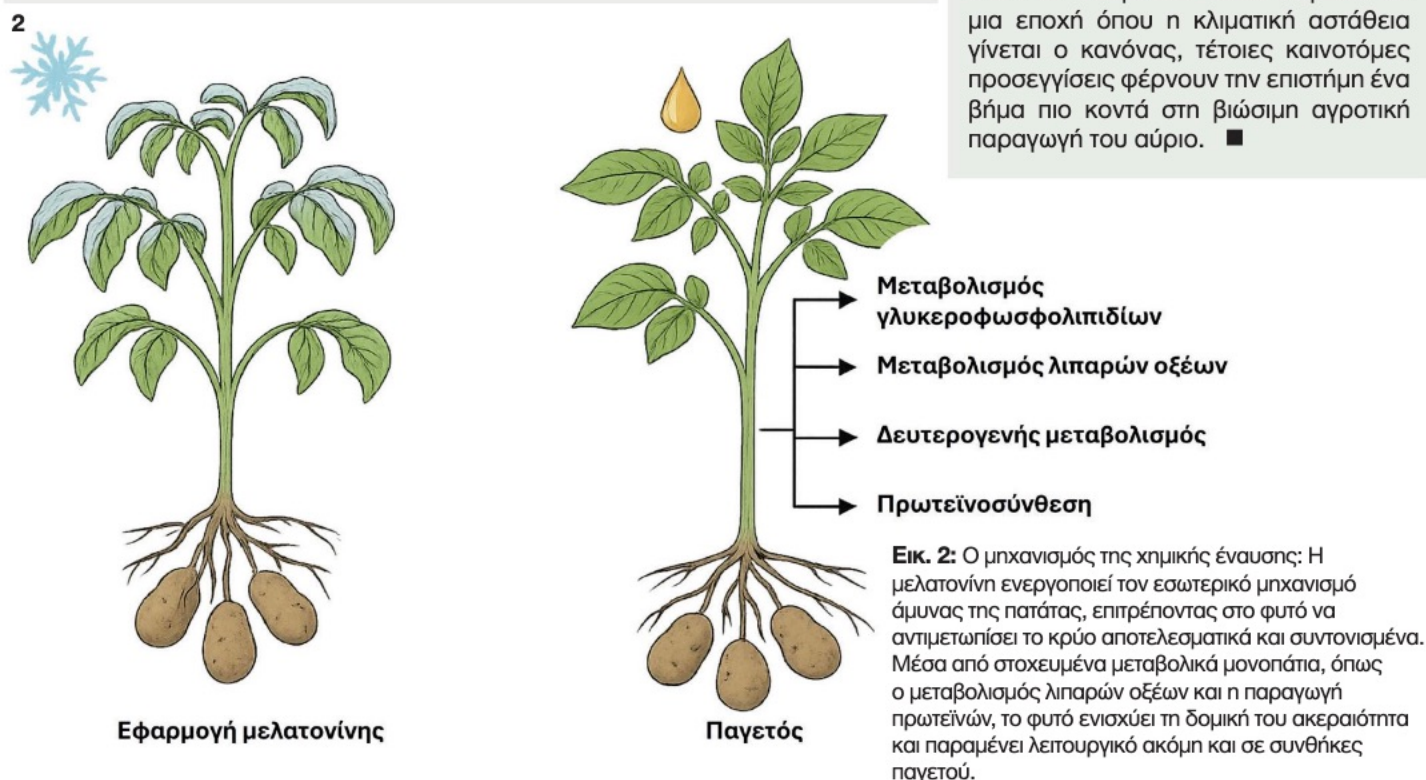
Εικ. 1: Φαινοτυπική απόκριση της εξωγενούς εφαρμογής της μελατονίνης και της γλυκίνης-μπεταΐνης σε συνθήκες παγετού (-2°C) για 6 h.

σε βραχυχρόνιο ψύχος, τα φυτά μεταφέρθηκαν σε θάλαμο ανάπτυξης υπό κανονικές συνθήκες και παρέμειναν εκεί για 72h ώστε να ανακάμψουν. Τόσο κατά την εφαρμογή της καταπόνησης, όσο και κατά την περίοδο ανάκαμψης, χρησιμοποιήθηκαν φυτά μάρτυρες που μεταχειρίστηκαν με νερό, αντί για τον χημικό παράγοντα. Τα προκαταρκτικά αποτελέσματα κατέδειξαν τη σαφή προστατευτική δράση της MEL έναντι του παγετού (**Εικ. 1**). Αντιθέτως, η εφαρμογή της GB είχε μόνο προσωρινή ευεργετική δράση ενάντια στον παγετό. Ειδικότερα, τα φυτά που είχαν μεταχειριστεί με μελατονίνη παρουσίασαν λιγότερες ορατές βλάβες και καλύτερη διατήρηση της σπαργής στα φύλλα σε σύγκριση με τα φυτά μάρτυρες. Με απλά λόγια, ανέχθηκαν καλύτερα το ψύχος, και κατάφεραν να συνεχίσουν την ανάπτυξή τους όταν επανήλθαν σε κανονικές συνθήκες. Τα θετικά αυτά αποτελέσματα υποστηρί-

χθηκαν από πληθώρα φυσιολογικών και βιοχημικών αναλύσεων. Ένας ακόμη στόχος του έργου ήταν η κατανόηση του μοριακού μηχανισμού της θετικής επίδρασης της μελατονίνης, σε επίπεδο έκφρασης γονιδίων και αφθονίας πρωτεϊνών (**Εικ. 2**). Σε επίπεδο γονιδίων, διαπιστώθηκε ότι η μεταχείριση με μελατονίνη ενεργοποίησε συστηματικά και συντονισμένα τα μεταβολικά μονοπάτια που σχετίζονται με τον γλυκεροφωσfolιπιδικό (σχετίζεται με την προστασία κυτταρικών μεμβρανών) και το δευτερογενή μεταβολισμό (σχετίζεται με τους μηχανισμούς άμυνας σε εξωγενή ερεθίσματα). Σε επίπεδο πρωτεόματος, διαπιστώθηκε ότι η εφαρμογή μελατονίνης οδήγησε σε σημαντικές αλλαγές στην αφθονία πρωτεϊνών που σχετίζονται με τις λειτουργίες ριβωσωμάτων (παραγωγή πρωτεϊνών) και τον μεταβολισμό του λινολεϊκού οξέος (προστασία από ψύχος).

Συμπέρασμα

Όπως ο εμβολιασμός προετοιμάζει το ανθρώπινο σώμα να αντιμετωπίσει ασθένειες, έτσι και η χημική έναυση προετοιμάζει τα φυτά να αντιδράσουν πιο αποτελεσματικά σε περιβαλλοντικές προκλήσεις όπως ο παγετός, η ξηρασία ή η αλατότητα. Μέσω της εφαρμογής φυσικών ουσιών, όπως η μελατονίνη, τα φυτά ενεργοποιούν «εκ των προτέρων» τους μηχανισμούς άμυνας τους, μειώνοντας τις βλάβες και αυξάνοντας την πιθανότητα επιβίωσης στις επικείμενες καταπονήσεις. Οι διάφοροι μεταβολίτες και οι φυτοορμόνες λειτουργούν ως εσωτερικοί συναγερμοί που «ξυπνούν» το μεταβολισμό, ενισχύουν την αντιοξειδωτική άμυνα και διατηρούν τη φυσιολογική ισορροπία σε περιόδους αντίξωων συνθηκών. Η χημική έναυση δεν αποτελεί απλώς μια πολλά υποσχόμενη στρατηγική για την αειφόρο γεωργία — είναι ήδη εδώ, με εφαρμογές σε καλλιέργειες όπως η πατάτα και το κεράσι να δείχνουν θεαματικά αποτελέσματα. Σε μια εποχή όπου η κλιματική αστάθεια γίνεται ο κανόνας, τέτοιες καινοτόμες προσεγγίσεις φέρνουν την επιστήμη ένα βήμα πιο κοντά στη βιώσιμη αγροτική παραγωγή του αύριο. ■



Εικ. 2: Ο μηχανισμός της χημικής έναυσης: Η μελατονίνη ενεργοποιεί τον εσωτερικό μηχανισμό άμυνας της πατάτας, επιτρέποντας στο φυτό να αντιμετωπίσει το κρύο αποτελεσματικά και συντονισμένα. Μέσα από στοχευμένα μεταβολικά μονοπάτια, όπως ο μεταβολισμός λιπαρών οξέων και η παραγωγή πρωτεϊνών, το φυτό ενισχύει τη δομική του ακεραιότητα και παραμένει λειτουργικό ακόμη και σε συνθήκες παγετού.

Τρία σκευάσματα, ένας στόχος: πιο συμπαγή, πιο εμφανίσιμα και μεγαλύτερης μετασυλλεκτικής διάρκειας κηπευτικά

• **DRY-K 30:** ενδυναμώνει τα καρποφόρα κηπευτικά στην ωρίμανση - χωρίς σχάσεις, απλά ποιότητα.

• **eK-Ion MAX:** 100% φυσικό εκχύλισμα φαιοφυκών για ενισχυμένη αντοχή των καλλιεργειών στο αβιοτικό στρες

• **KAMAB 26:** με την τεχνολογία ΚΚ για υψηλή ποιότητα παραγωγής και αύξηση μετασυλλεκτικής διάρκειας ζωής



Adriatica

ADRIATICA HELLAS ΕΠΕ
Λεωφόρος Πεντέλης 72, 15234, Χαλάνδρι
Αθήνα, Ελλάδα
+30 2106817700
info@k-adriatica.gr