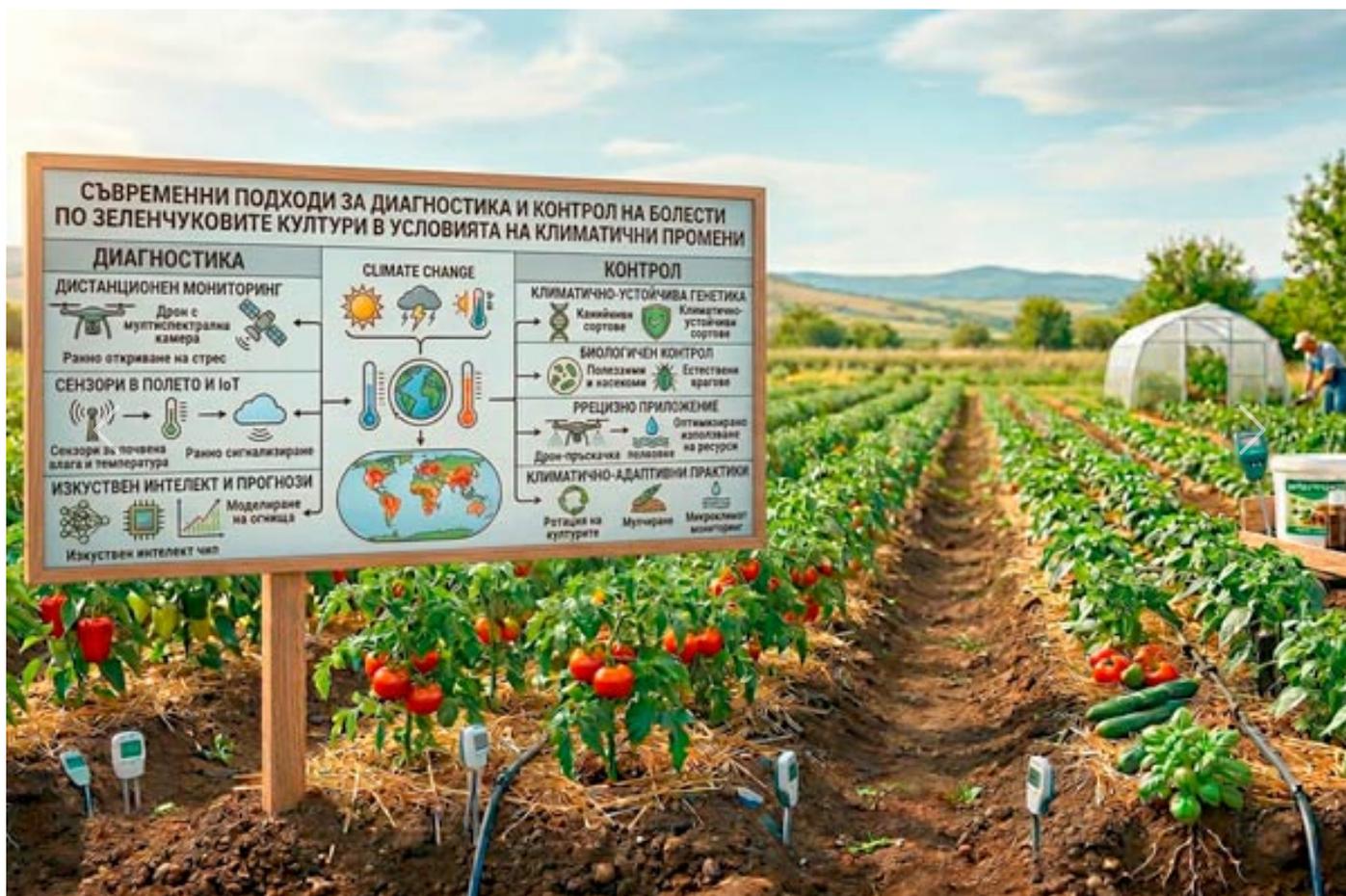


Σύγχρονες Προσεγγίσεις για τη Διάγνωση και τον Έλεγχο Ασθενειών των Φυτών Λαχανικών υπό Συνθήκες Κλιματικής Αλλαγής

Автор(и): гл. ас. д-р Катя Василева, ИЗК "Марица" - Пловдив
Дата: 25.03.2026 Брой: 3/2026



Περίληψη

Η κλιματική αλλαγή αλλάζει σημαντικά τη δυναμική των ασθενειών των λαχανικών, οδηγώντας σε ταχύτερη ανάπτυξη των παθογόνων, υψηλότερη επιβίωση του ενοφθαλμιακού υλικού και πιο συχνές επιδημιακές εκρήξεις. Οι αυξημένες θερμοκρασίες, οι ακραίες βροχοπτώσεις και οι περίοδοι ξηρασίας δημιουργούν συνθήκες που διευκολύνουν τις λοιμώξεις από ιούς, βακτήρια και

μυκητιακούς παθογόνους. Υπό αυτές τις συνθήκες, οι παραδοσιακές μέθοδοι διάγνωσης είναι συχνά ανεπαρκείς λόγω επικαλυπτόμενων συμπτωμάτων και αλλαγών που προκαλούνται από στρες. Οι σύγχρονες προσεγγίσεις περιλαμβάνουν γρήγορες ανοσοχρωματογραφικές δοκιμές, μοριακές μεθόδους, υπερφασματική διάγνωση, τεχνολογίες drone και προγνωστικά μοντέλα. Η αποτελεσματική διαχείριση των ασθενειών απαιτεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που περιλαμβάνει ανθεκτικές ποικιλίες, βιοφυγγοσιδικά, βιοδιεγέρτες και βελτιστοποιημένες αγρονομικές πρακτικές. Ο συνδυασμός παραδοσιακών και σύγχρονων διαγνωστικών εργαλείων, υποστηριζόμενος από εμπειρογνωμοσύνη φυτοπαθολογικής αξιολόγησης, είναι το κλειδί για μια βιώσιμη παραγωγή υπό τις συνθήκες της κλιματικής αλλαγής.

Οι ασθένειες των φυτών συνεχίζουν να αποτελούν μια από τις πιο σοβαρές προκλήσεις για τη σύγχρονη γεωργία, προκαλώντας σημαντικές ετήσιες απώλειες στην απόδοση, την ποιότητα και την ανθεκτικότητα του αγροοικοσυστήματος. Σύμφωνα με τους Fang και Ramasamy (2015), οι απώλειες που προκαλούνται από παθογόνα «κυμαίνονται μεταξύ 20% και 40%» και αποτελούν βασικό παράγοντα που απειλεί την παγκόσμια ασφάλεια τροφίμων. Υπό συνθήκες κλιματικής αλλαγής, εντατικών συστημάτων παραγωγής και παγκοσμιοποιημένων ροών εμπορίου, ο κίνδυνος επιδημιών, εμφάνισης νέων φυλών και εξάπλωσης εισβολικών παθογόνων αυξάνεται σημαντικά (Juroszek & von Tiedemann, 2011).

Η αποτελεσματική διαχείριση ασθενειών απαιτεί δύο αλληλένδετες κατευθύνσεις: ακριβή και έγκαιρη διάγνωση και βιώσιμες στρατηγικές ελέγχου που ενσωματώνουν βιολογικές, αγρονομικές, χημικές και ψηφιακές προσεγγίσεις. Τις τελευταίες δεκαετίες, η διάγνωση έχει υποστεί μια βαθιά μεταμόρφωση – από οπτική αξιολόγηση και μικροσκοπία σε μοριακές μεθόδους, πλατφόρμες υψηλής απόδοσης φαινοτύπωσης, απομακρυσμένους αισθητήρες και αλγόριθμους βαθιάς μάθησης. Όπως σημειώνουν οι Balodi et al. (2017), «η επιστήμη της διάγνωσης ασθενειών έχει εξελιχθεί από την οπτική επιθεώρηση σε εξαιρετικά ευαίσθητες σερολογικές και μοριακές τεχνικές», αυξάνοντας σημαντικά την ακρίβεια και την ταχύτητα ανίχνευσης.

Παράλληλα, η έννοια του ελέγχου των ασθενειών μετατοπίζεται από μονόπλευρες χημικές λύσεις σε ολοκληρωμένη, οικολογικά και εξελικτικά ορθή διαχείριση. Οι He et al. (2016) τονίζουν ότι η βιώσιμη διαχείριση πρέπει να «δημιουργεί συνθήκες ευνοϊκές για την ανάπτυξη των φυτών και δυσμενείς για την αναπαραγωγή και εξέλιξη των παθογόνων», συνδυάζοντας την Αντίσταση, την Αποφυγή, την Εξάλειψη, την Αποκατάσταση (RAER). Νέες τάσεις περιλαμβάνουν τον βιολογικό

έλεγχο, τα εκχυλίσματα φυτών, γενετικές προσεγγίσεις, προγνωστικά μοντέλα και ψηφιακά συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (Mukhtar et al., 2023).

Σε αυτό το πλαίσιο, συνοψίζονται οι σύγχρονες επιστημονικές εξελίξεις σε δύο βασικές κατευθύνσεις:

(1) διάγνωση των ασθενειών των φυτών, συμπεριλαμβανομένων κλασικών, οπτικών και μεθόδων βασισμένων στην TN.

(2) έλεγχος και ολοκληρωμένη διαχείριση, λαμβάνοντας υπόψη οικολογικές, βιολογικές, γενετικές και τεχνολογικές προσεγγίσεις.

Αυτή η διπλή εστίαση επιτρέπει να εντοπιστεί πώς οι προόδους στη διάγνωση υποστηρίζουν μια πιο ακριβή, βιώσιμη και προσαρμοστική διαχείριση ασθενειών στο πλαίσιο δυναμικά μεταβαλλόμενων αγροοικοσυστημάτων.

Η αποτελεσματική διάγνωση είναι το θεμέλιο οποιασδήποτε στρατηγικής διαχείρισης ασθενειών. Καθορίζει τη σωστή απόφαση, ελαχιστοποιεί τις απώλειες και επιτρέπει την έγκαιρη παρέμβαση για έλεγχο. Όπως τονίζουν οι Balodi et al., (2017), «η επιστήμη της διάγνωσης ασθενειών έχει εξελιχθεί από την οπτική επιθεώρηση... σε εξαιρετικά ευαίσθητες σερολογικές και μοριακές τεχνικές». Οι σύγχρονες προσεγγίσεις μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις κύριες κατευθύνσεις: κλασικές εργαστηριακές μεθόδους, οπτικές και απομακρυσμένες τεχνολογίες και τεχνητή νοημοσύνη.

Οι σερολογικές τεχνικές όπως το ELISA, η ανοσοφθορισμομετρία και οι γρήγορες ανοσοχρωματογραφικές δοκιμές παραμένουν ευρέως χρησιμοποιούμενες λόγω της ειδικότητας και της εφαρμοστικότητάς τους σε συνθήκες πεδίου. Το ELISA είναι μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους, όπου «η οπτική αλλαγή χρώματος επιτρέπει την εύκολη ανίχνευση» (Fang & Ramasamy, 2015). Ωστόσο, η ευαισθησία για βακτηριακούς παθογόνους είναι περιορισμένη.

Οι μοριακές μέθοδοι, ειδικά το PCR και οι παραλλαγές του (nested, multiplex, real time), προσφέρουν τη μεγαλύτερη ακρίβεια. Οι Balodi et al., (2017) σημειώνουν ότι οι αναλύσεις βασισμένες σε PCR είναι «ειδικές, ευαίσθητες, αποτελεσματικές, γρήγορες και σχετικά οικονομικές». Το PCR σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει την ποσοτική αξιολόγηση και είναι ιδιαίτερα πολύτιμο για τη δοκιμή σπόρων και τα παθογόνα καραντίνας.

Οι πλατφόρμες φαινοτύπωσης (χλωροφυλλική φθορισμομετρία, υπερφασματική και θερμική απεικόνιση) παρέχουν μη καταστροφική και επαναλαμβανόμενη παρατήρηση. Σύμφωνα με τους Balodi et al., (2017) «αυτές οι μέθοδοι είναι μη καταστροφικές... και επιτρέπουν την απεικόνιση εντοπισμένων αντιδράσεων». Η υπερφασματική διάγνωση είναι ιδιαίτερα υποσχόμενη για έγκαιρη ανίχνευση, καθώς καταγράφει φυσιολογικές αλλαγές πριν εμφανιστούν ορατά συμπτώματα.

Οι Fang και Ramasamy (2015) τονίζουν ότι οι υπερφασματικές τεχνικές «χρησιμοποιούνται ευρέως για τον προσδιορισμό ασθενειών μέσω αλλαγών στην ανάκλαση». Η θερμογραφία και ο φθορισμός συμπληρώνουν την ανάλυση, αλλά είναι ευαίσθητες σε εξωτερικές συνθήκες και συχνά απαιτούν συνδυασμό με άλλες μεθόδους.

Τα τελευταία χρόνια, η βαθιά μάθηση έχει γίνει ένα βασικό εργαλείο για την αυτόματη αναγνώριση ασθενειών. Οι Li et al., (2021) σημειώνουν ότι «η βαθιά μάθηση αποφεύγει τα μειονεκτήματα της χειροκίνητης επιλογής χαρακτηριστικών... και καθιστά την εξαγωγή χαρακτηριστικών πιο αντικειμενική». Αρχιτεκτονικές CNN όπως AlexNet, GoogLeNet, ResNet και DenseNet επιτυγχάνουν ακρίβειες πάνω από 95-99% σε ελεγχόμενα σύνολα δεδομένων. Οι Saleem et al., (2019) δείχνουν ότι το GoogLeNet ξεπερνά το AlexNet στο PlantVillage, και ο Demilie (2024) συμπεραίνει ότι τα CNN «συχνά είναι η προτιμώμενη επιλογή... λόγω της ικανότητάς τους να συλλαμβάνουν χωρικές ιεραρχίες». Ωστόσο, οι πραγματικές συνθήκες πεδίου παραμένουν μια πρόκληση και απαιτούν πιο πολύπλοκα μοντέλα σε συνδυασμό με απομακρυσμένους αισθητήρες και προγνωστικά συστήματα.

Οι σύγχρονες στρατηγικές ελέγχου εξελίσσονται από χημικά κυριαρχούμενες προσεγγίσεις σε ολοκληρωμένα, οικολογικά προσανατολισμένα και εξελικτικά βιώσιμα συστήματα. Ο κύριος στόχος είναι η μείωση της πίεσης των παθογόνων διατηρώντας παράλληλα την παραγωγικότητα και την οικολογική ισορροπία.

Η κλιματική αλλαγή αλλάζει την επιδημιολογία των ασθενειών και απαιτεί προσαρμοστικές στρατηγικές. Οι Juroszek και von Tiedemann (2011) σημειώνουν ότι «οι προληπτικά μέτρα... μπορεί να αποκτήσουν ιδιαίτερη σημασία στο μέλλον». Οι Mukhtar et al., (2023) τονίζουν ότι το ΟΔΔΑ είναι «η πιο κατάλληλη και σχετική μέθοδος υπό τις τρέχουσες συνθήκες». Νέες τάσεις περιλαμβάνουν: εκχυλίσματα φυτών - π.χ. *Lantana camara*, των οποίων τα εκχυλίσματα «καταστέλλουν την ανάπτυξη του *Pyricularia oryzae* και των *Xanthomonas spp.*»· γενετικές προσεγγίσεις - έκφραση ρυθμιστών όπως το AtMYB12, το οποίο «αυξάνει τα επίπεδα

φλαβονοειδών και την ανθεκτικότητα σε πολλά παθογόνα»· αντίσταση που προέρχεται από παθογόνα (PDR) – διαγονιδιακές στρατηγικές κατά ιών.

Η διάγνωση και τα συστήματα βασισμένα στην TN υποστηρίζουν τη διαχείριση μέσω: έγκαιρης ανίχνευσης και εντοπισμού των εκρήξεων· μείωσης άσκοπων θεραπειών· ενσωμάτωσης με προγνωστικά μοντέλα· παρακολούθησης της αποτελεσματικότητας και της ανθεκτικότητας.