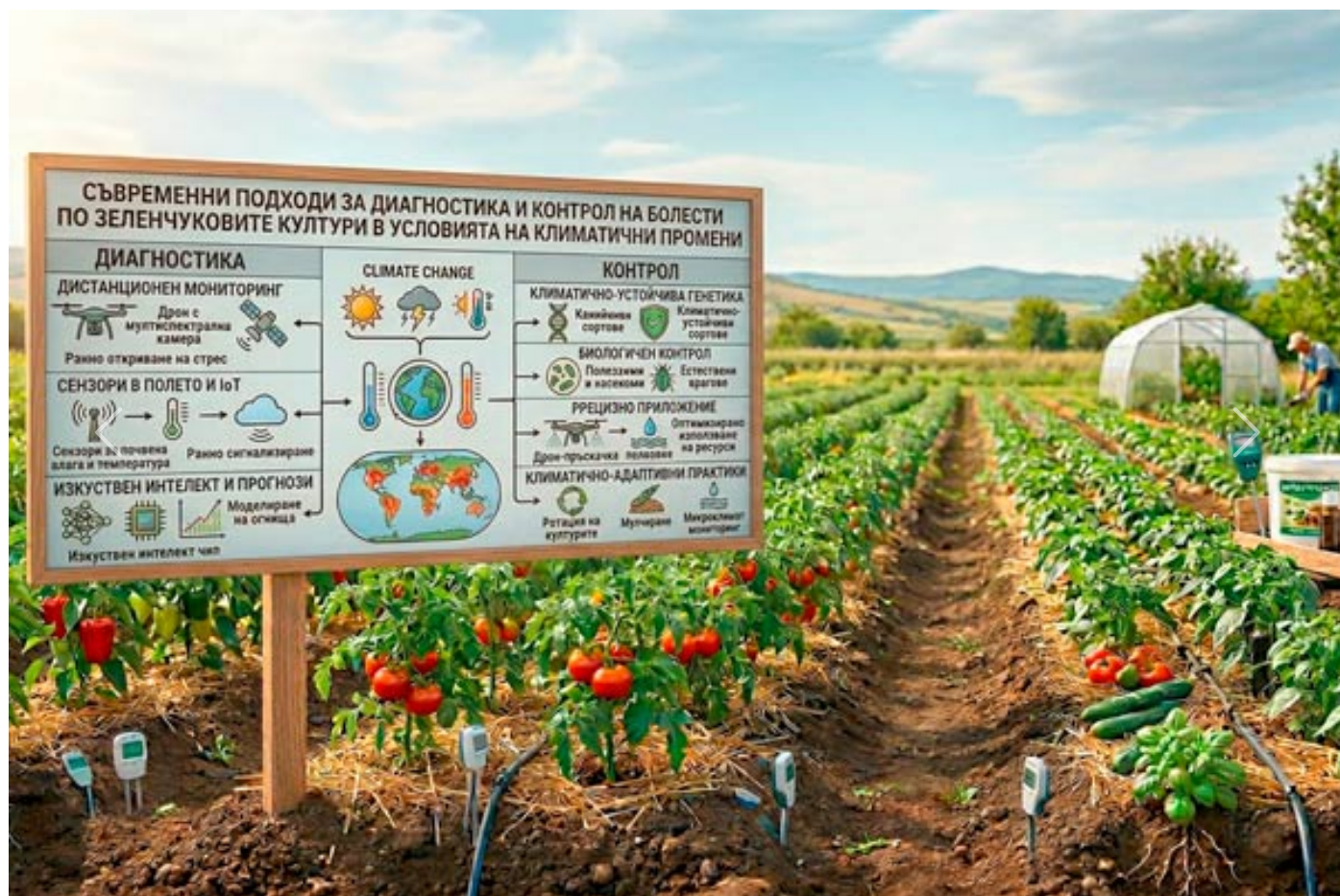


"Suvremeni pristupi dijagnostici i suzbijanju bolesti povrtnih kultura u uvjetima klimatskih promjena"

Автор(и): гл. ас. д-р Катя Василева, ИЗК "Марица" - Пловдив

Дата: 25.03.2026 Брой: 3/2026



Sažetak

Klimatske promjene značajno mijenjaju dinamiku bolesti povrtarskih kultura, što dovodi do bržeg razvoja patogena, većeg preživljavanja inokuluma i češćih epidemijskih izbijanja. Povišene temperature, ekstremne oborine i razdoblja suše stvaraju uvjete koji pogoduju infekcijama virusima, bakterijama i gljivičnim patogenima. U takvim uvjetima tradicionalne dijagnostičke metode često su nedostatne zbog preklapajućih simptoma i promjena uzrokovanih stresom.

Suvremeni pristupi uključuju brze imunokromatografske testove, molekularne metode, hiperspektralnu dijagnostiku, tehnologije dronova i prediktivne modele. Učinkovito upravljanje bolestima zahtijeva integrirani pristup koji uključuje otporne sorte, biofungicide, biostimulanse i optimizirane agronomske prakse. Kombinacija tradicionalnih i modernih dijagnostičkih alata, uz podršku stručne fitopatološke procjene, ključna je za održivu proizvodnju u uvjetima klimatskih promjena.

Biljne bolesti i dalje su jedan od najozbiljnijih izazova za suvremenu poljoprivredu, uzrokujući značajne godišnje gubitke u prinosu, kvaliteti i otpornosti agroekosustava. Prema Fangu i Ramasamyju (2015), gubici uzrokovani patogenima "kreću se između 20% i 40%" i predstavljaju ključni čimbenik koji ugrožava globalnu sigurnost hrane. U uvjetima klimatskih promjena, intenzivnih proizvodnih sustava i globaliziranih tokova trgovine, rizik od epidemija, pojave novih rasa i širenja invazivnih patogena značajno raste (Jurossek & von Tiedemann, 2011).

Učinkovito upravljanje bolestima zahtijeva dva međusobno povezana smjera: preciznu i pravovremenu dijagnozu te održive strategije suzbijanja koje integriraju biološke, agronomske, kemijske i digitalne pristupe. Posljednjih desetljeća dijagnoza je prošla duboku transformaciju – od vizualne procjene i mikroskopije do molekularnih metoda, platformi za fenotipizaciju visoke propusnosti, daljinskih senzora i algoritama dubokog učenja. Kako ističu Balodi i sur. (2017), "znanost o dijagnozi bolesti evoluirala je od vizualne inspekcije do visoko osjetljivih seroloških i molekularnih tehnika," što je značajno povećalo točnost i brzinu detekcije.

Usporedo s tim, koncept suzbijanja bolesti pomiče se s jednostranih kemijskih rješenja prema integriranom, ekološki i evolucijski utemeljenom upravljanju. He i sur. (2016) naglašavaju da održivo upravljanje mora "stvoriti uvjete povoljne za rast biljaka i nepovoljne za razmnožavanje i evoluciju patogena," kombinirajući Otpornost (Resistance), Izbjegavanje (Avoidance), Uklanjanje (Elimination) i Sanaciju (Remediation) (RAER). Novi trendovi uključuju biološku kontrolu, biljne ekstrakte, genetske pristupe, prediktivne modele i digitalne sustave za potporu odlučivanju (Mukhtar i sur., 2023).

U tom kontekstu sažeti su suvremeni znanstveni napredak u dva ključna smjera:

(1) dijagnoza biljnih bolesti, uključujući klasične, optičke i metode temeljene na umjetnoj inteligenciji;

(2) suzbijanje i integrirano upravljanje, uzimajući u obzir ekološke, biološke, genetske i tehnološke pristupe.

Ovaj dvostruki fokus omogućuje praćenje kako napredak u dijagnozi podržava preciznije, održivije i prilagodljivije upravljanje bolestima u kontekstu dinamički promjenjivih agroekosustava.

Učinkovita dijagnoza temelj je svake strategije upravljanja bolestima. Ona određuje ispravnu odluku, minimizira gubitke i omogućuje ranu intervenciju za suzbijanje. Kako ističu Balodi i sur., (2017), "znanost o dijagnozi bolesti evoluirala je od vizualne inspekcije... do visoko osjetljivih seroloških i molekularnih tehnika." Suvremene pristupe možemo grupirati u tri glavna smjera: klasične laboratorijske metode, optičke i daljinske tehnologije te umjetnu inteligenciju.

Serološke tehnike poput ELISA, imuno fluorescencije i brzih imunokromatografskih testova i dalje se široko koriste zbog svoje specifičnosti i primjenjivosti u terenskim uvjetima. ELISA je jedna od najraširenijih metoda, gdje "vizualna promjena boje omogućuje jednostavnu detekciju" (Fang & Ramasamy, 2015). Međutim, osjetljivost za bakterijske patogene je ograničena.

Molekularne metode, posebno PCR i njegove varijante (ugniježđeni, multipleks, real-time), nude najveću točnost. Balodi i sur., (2017) napominju da su PCR analize "specifične, osjetljive, učinkovite, brze i relativno ekonomične." Real-time PCR omogućuje kvantitativnu procjenu i posebno je vrijedna za testiranje sjemena i karantenske patogene.

Fenotipizacijske platforme (fluorescencija klorofila, hiperspektralno i termalno snimanje) pružaju nedestruktivno i ponovljivo promatranje. Prema Balodiju i sur., (2017) "ove metode su nedestruktivne... i omogućuju vizualizaciju lokaliziranih reakcija." Hiperspektralna dijagnostika posebno je obećavajuća za ranu detekciju, jer bilježi fiziološke promjene prije nego što se pojave vidljivi simptomi.

Fang i Ramasamy (2015) ističu da se hiperspektralne tehnike "široko koriste za identifikaciju bolesti kroz promjene u refleksiji." Termografija i fluorescencija nadopunjuju analizu, ali su osjetljive na vanjske uvjete i često zahtijevaju kombinaciju s drugim metodama.

Posljednjih godina duboko učenje postalo je ključni alat za automatsko prepoznavanje bolesti. Li i sur., (2021) napominju da "duboko učenje izbjegava nedostatke ručnog odabira značajki... i čini ekstrakciju značajki objektivnijom." CNN arhitekture poput AlexNet, GoogLeNet, ResNet i DenseNet

postizu točnost iznad 95–99% na kontroliranim skupovima podataka. Saleem i sur., (2019) pokazuju da GoogLeNet nadmašuje AlexNet na PlantVillage, a Demilie (2024) zaključuje da su CNN-evi "često preferirani izbor... zbog svoje sposobnosti hvatanja prostornih hijerarhija." Međutim, stvarni terenski uvjeti ostaju izazov i zahtijevaju složenije modele u kombinaciji s daljinskim senzorima i prediktivnim sustavima.

Moderne strategije suzbijanja razvijaju se od kemijski dominantnih pristupa prema integriranim, ekološki orijentiranim i evolucijski održivim sustavima. Glavni cilj je smanjiti pritisak patogena uz održavanje produktivnosti i ekološke ravnoteže.

Klimatske promjene mijenjaju epidemiologiju bolesti i zahtijevaju prilagodljive strategije. Juroszek i von Tiedemann (2011) napominju da "preventivne mjere... mogu postati posebno važne u budućnosti." Mukhtar i sur., (2023) ističu da je IPDM "najprikladnija i najrelevantnija metoda u trenutnim okolnostima." Novi trendovi uključuju: biljne ekstrakte – npr. *Lantana camara*, čiji ekstrakti "suprimiraju rast *Pyricularia oryzae* i *Xanthomonas* spp."; genetske pristupe – ekspresiju regulatora poput AtMYB12, koji "povećava razinu flavonoida i otpornost na nekoliko patogena"; otpornost izvedenu iz patogena (PDR) – transgene strategije protiv virusa.

Dijagnoza i sustavi temeljeni na umjetnoj inteligenciji podržavaju upravljanje kroz: ranu detekciju i lokalizaciju izbijanja; smanjenje nepotrebnih tretmana; integraciju s prediktivnim modelima; praćenje učinkovitosti i otpornosti.

Kako napominje Demilie (2024), strojno učenje i duboko učenje "poboljšavaju performanse i brzinu detekcije i klasifikacije," čineći ih ključnom komponentom modernih IPM sustava.

Sinergija između moderne dijagnoze i integriranog upravljanja stvara nove mogućnosti za preciznu, učinkovitu i ekološki održivu poljoprivredu. Ova kombinacija omogućuje ne samo smanjenje gubitaka, već i izgradnju otpornijih agroekosustava sposobnih odgovoriti na buduće izazove.

Materijali i metode

Glavni patogeni koji utječu na povrtarske kulture su virusi (TSWV, ToMV, PMMoV, PVY), bakterije (*Xanthomonas*, *Pseudomonas*, *Clavibacter*) i gljivični patogeni poput *Phytophthora*, *Fusarium*, *Verticillium*, *Alternaria* i *Botrytis* (Slika 1).



Slika 1. Simptomi plamenjače krumpira, verticilijskog venuća paprike, bakteriozne pjegavosti paprike, bakterioznog raka rajčice

Klimatske promjene dovode do "povišenih temperatura → bržeg razvoja patogena" i "dužih vegetacijskih sezona → više ciklusa infekcije." Za dijagnostičke svrhe korištene su i tradicionalne i moderne metode. Početna procjena bila je vizualna dijagnoza, koja je brza, ali subjektivna, jer se "simptomi mogu preklapati između različitih patogena ili abiotičkih čimbenika." Mikroskopija je primijenjena za promatranje morfoloških struktura, s određenim bojenjem korištenim u nekim slučajevima. Hranjive podloge korištene su za izolaciju bakterija i gljivica, dok su virusi dijagnosticirani imunokromatografskim testovima.

Korišteni brzi imunokromatografski testovi bili su: AgriStrip® (BIOREBA), Pocket Diagnostic® i LOEWE® FAST, koji omogućuju detekciju virusa, bakterija i nekih gljivičnih patogena unutar 5–10 minuta i "prikladni su za terenske i laboratorijske uvjete" (Slika 2).

