

Coordonator: Mirela Florina Călinescu

Autori: Mirela Florina Călinescu, Ivona Cristina Mazilu, Florin Stănică, Mihaela Lungu, Damian Dragomir, Emil Chițu, Ana Cornelia Butcaru, Cosmin Alexandru Mihai, Florin Plăiașu, Lavinia Mihaela Udrea (Iliescu), Ioana Mihălcioiu, Luis Gabriel Olteanu, Cătălin Viorel Oltenacu, Cristian Căliniță

IMPLEMENTAREA SISTEMELOR FOTOVOLTAICE ÎN PLANTAȚIILE POMICOLE

Ghid practic pentru utilizarea duală a terenului



Pitești, 2026





**INSTITUTUL DE CERCETARE-DEZVOLTARE
PENTRU POMICULTURĂ PITEȘTI-MĂRĂCINENI**

Coordonator: CĂLINESCU Mirela Florina

**Autori: CĂLINESCU Mirela Florina, MAZILU Ivona Cristina, STĂNICĂ Florin,
LUNGU Mihaela, DRAGOMIR Damian, CHIȚU Emil, BUTCARU Ana Cornelia,
MIHAI Cosmin Alexandru, PLĂIAȘU Florin, UDREA (ILIESCU) Lavinia Mihaela,
MIHĂLCIOIU Ioana, OLTEANU Luis Gabriel, OLTENACU Cătălin Viorel,
CĂLINIȚĂ Cristian**

**IMPLEMENTAREA SISTEMELOR
FOTOVOLTAICE
ÎN PLANTAȚIILE POMICOLE**

**Ghid practic
pentru utilizarea duală a terenului**

**Editura Invel Multimedia
2026**

Lucrare elaborată în cadrul Planului Sectorial de Cercetare ADER 2023-2026, Ministerul Agriculturii și Dezvoltării Rurale, prin contractul de finanțare 6.3.23/18.07.2023

Proiectul ADER 6.3.23 „Utilizarea sistemelor autonome energetic pentru digitalizarea unor secvențe tehnologice specifice pomiculturii de precizie”

Perioada de derulare: 2023 – 2026

Director de proiect: Dr. ing. Mirela Florina Călinescu

Coordonator: Institutul de Cercetare-Dezvoltare pentru pomicultură Pitești-Mărăcineni

Parteneri:

1. Universitatea de Științe Agronomice și Medicină Veterinară București
2. Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Pedologie, Agrochimie și Protecția Mediului București
3. Stațiunea de Cercetare Dezvoltare pentru Pomicultură Băneasa

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României

Implementarea sistemelor fotovoltaice în plantațiile pomicole : ghid practic pentru utilizarea duală a terenului / Călinescu Mirela

Florina (coord.), Mazilu Ivona Cristina, Stănică Florin, - Otopeni :

Invel Multimedia, 2026

Conține bibliografie

ISBN 978-606-764-102-8

I. Călinescu, Mirela Florina

II. Mazilu, Ivona Cristina

III. Stănică, Florin

63

62

Tehnoredactare, foto și copertă: Popescu Marian

Editura Invel Multimedia



invelmultimedia@yahoo.ro

ISBN: 978-606-764-102-8



Cuprins

Capitolul 1. Contextul dezvoltării sistemelor hortivoltaice	7
1.1. Schimbările climatice, tranziția energetică și presiunea asupra terenurilor agricole	7
1.2. Complexitatea integrării sistemelor fotovoltaice în culturile horticole	7
1.3. Sistemele hortivoltaice ca extensie specializată a sistemelor agrivoltaice	8
1.4. Relevanța sistemelor hortivoltaice pentru horticultura românească	9
Capitolul 2. Principii generale ale sistemelor agrivoltaice și hortivoltaice	10
2.1. Utilizarea duală a terenului în sistemele hortivoltaice	10
2.2. Diferențierea conceptuală între principalele tipuri de sisteme agro-fotovoltaice	10
2.3. Particularitățile sistemelor hortivoltaice	11
2.4. Principalele componente ale unui sistem hortivoltaic	12
2.5. Clasificarea sistemelor agrivoltaice și hortivoltaice	14
2.6. Efectul sistemelor hortivoltaice asupra microclimatului	16
2.7. Relația dintre producția energetică și producția horticolă	16
Capitolul 3. Metodologia generală de evaluare a sistemelor hortivoltaice	18
3.1. Principii generale de evaluare	18
3.2. Organizarea platformelor experimentale	18
3.3. Monitorizarea microclimatului	19
3.4. Evaluarea răspunsului agronomic și fiziologic	20
3.5. Evaluarea solului și a nutriției minerale	20
3.6. Monitorizarea producției energetice	21
3.7. Prelucrarea, integrarea și prezentarea datelor	21
3.8. Metodologia de evaluare energetică și economică	22
3.9. Interpretarea metodologică a rezultatelor	22
Capitolul 4. Compatibilitatea speciilor horticole cu sistemele hortivoltaice	23
4.1. Compatibilitatea biologică a culturilor horticole	23
4.2. Rolul luminii în fiziologia culturilor horticole	23
4.3. Umbrirea favorabilă și umbrirea excesivă	25
4.4. Clasificarea speciilor pomice după compatibilitatea cu sistemele hortivoltaice	25
4.5. Specii cu potențial ridicat pentru sistemele hortivoltaice	26
4.6. Specii și soiuri sensibile la umbră excesivă	27
4.7. Influența soiului, portului și a formei de coroană	28
4.8. Relația dintre climat, topoclimat și răspunsul biologic al culturii	29
4.9. Principii practice pentru alegerea culturii	29
Capitolul 5. Proiectarea și configurarea sistemelor hortivoltaice	31
5.1. Importanța proiectării în sistemele hortivoltaice	31
5.2. Parametrii principali care trebuie stabiliți în proiectare	31
5.3. Alegerea amplasamentului	32
5.4. Configurația panourilor fotovoltaice	34
5.5. Orientarea panourilor fotovoltaice	36
5.6. Înălțimea structurilor și distanțarea panourilor	37

5.7. Efectele configurației constructive asupra luminii, aerului și apei	39
5.8. Alegerea tipului de modul în funcție de cultură și obiectivul proiectării	40
5.9. Integrarea sistemelor hortivoltaice cu tehnologia de cultură pomicolă.....	41
5.10. Considerații structurale și de rezistență	41
5.11. Compromisul dintre eficiența energetică și compatibilitatea agricolă	41
5.12. Perspective de dezvoltare în proiectarea sistemelor hortivoltaice	42
Capitolul 6. Tehnologii și echipamente utilizate în sistemele hortivoltaice	43
6.1. Rolul tehnologiilor în implementarea sistemelor hortivoltaice	43
6.2. Module fotovoltaice utilizate în horticultură	43
6.3. Structuri de susținere și sisteme constructive	45
6.4. Sisteme de control al poziției panourilor.....	46
6.5. Sisteme de monitorizare climatică și agrometeorologică	47
6.6. Senzori pentru monitorizarea stării fiziologice a plantelor	48
6.7. Sisteme de irigare și fertirigare integrate.....	48
6.8. Sisteme de stocare și management energetic	48
6.9. Tehnologii digitale și agricultură inteligentă	49
6.10. Corelarea echipamentelor cu tipul culturii	49
6.11. Exploatarea sigură și mentenanța autorizată a sistemului hortivoltaic	50
6.12. Limitări tehnologice și provocări actuale	51
6.13. Perspective de dezvoltare tehnologică.....	52
Capitolul 7. Efectele sistemelor hortivoltaice asupra microclimatului și fiziologiei culturilor.....	53
7.1. Microclimatul în sistemele hortivoltaice	53
7.2. Modificarea distribuției radiației și a luminii	53
7.3. Temperatura aerului, a solului și a fructelor.....	53
7.4. Umiditatea relativă, ventilația și deficitul de presiune a vaporilor	55
7.5. Evapotranspirația și eficiența utilizării apei.....	56
7.6. Răspunsul fiziologic al culturilor	56
7.7. Variabilitatea răspunsului în funcție de specie și climat	56
7.8. Monitorizarea microclimatului în sistemele moderne	57
7.9. Sistemele hortivoltaice și adaptarea la schimbările climatice.....	57
Capitolul 8. Impactul asupra producției horticole.....	58
8.1. Producția horticolă în sistemele hortivoltaice	58
8.2. Calitatea fructelor și valoarea comercială	59
8.3. Stabilitatea producției și reducerea pierderilor climatice	60
8.4. Diferențe între specii horticole.....	60
8.5. Studii experimentale și interpretarea rezultatelor	60
Capitolul 9. Managementul culturii sub panouri	62
9.1. Managementul apei și fertirigării	62
9.2. Formarea coroanei, efectuarea tăierilor de întreținere și managementul luminii	64
9.3. Managementul fitosanitar și monitorizarea biologică	64
9.4. Adaptarea tehnologiei horticole și integrarea operațională	65

Capitolul 10. Componenta energetică	67
10.1. Rolul componentei energetice în sistemele hortivoltaice	67
10.2. Estimarea producției energetice	67
10.3. Autoconsum și integrarea energetică în fermă	69
10.4. Dimensionarea sistemului energetic.....	70
10.5. Temperatura modulelor și interacțiunea cu microclimatul	71
10.6. Integrarea cu alte sisteme energetice și cu agricultura de precizie	72
Capitolul 11. Analiza economică	73
11.1. Sursele de valoare economică ale unui sistem hortivoltaic	73
11.2. Costurile inițiale ale investiției	74
11.3. Alternative de amplasare a panourilor în fermele horticole.....	76
11.4. Costuri de operare și mentenanță.....	78
11.5. Venituri și economii generate de sistem	79
11.6. Modele de afaceri	80
11.7. Perioada de amortizare și analiza scenariilor	80
11.8. Când este justificat economic un sistem hortivoltaic?.....	82
Capitolul 12. Reglementări și aspecte legale	84
12.1. Relația dintre agricultură și producția de energie	84
12.2. Contextul european al dezvoltării sistemelor agrivoltaice.....	84
12.3. Aspecte generale privind cadrul legislativ din România	85
12.4. Parcurusul administrativ al proiectelor hortivoltaice	86
12.5. Menținerea funcției agricole a terenului.....	88
12.6. Finanțări și eligibilitate	88
Capitolul 13. Sustenabilitate și impact asupra mediului	89
13.1. Sustenabilitatea sistemelor hortivoltaice.....	89
13.2. Reducerea amprente de carbon și eficiența utilizării terenului	89
13.3. Biodiversitatea și funcțiile ecologice ale sistemelor hortivoltaice.....	90
13.4. Solul și gestionarea resurselor de apă	91
13.5. Durata de viață a sistemului și economia circulară	92
Capitolul 14. Studii de caz și lecții practice.....	95
14.1. Interpretarea studiilor de caz și limitele transferului tehnologic	95
14.2. Rezultate internaționale relevante	95
14.3. Lecții comparative pentru proiectarea sistemelor hortivoltaice	97
14.4. Relevanța pentru România și legătura cu studiile proprii	98
Capitolul 15. Studii de caz și observații experimentale în cadrul proiectului ADER	
6.3.23	100
15.1. Studiu de caz – Sistemele hortivoltaice în cultura de coacăz roșu, soiul ‘Rovada’	101
15.2. Studiu de caz – SHV pentru asimina (<i>Asimina triloba</i>).....	121
15.3. Studiu de caz P3 – Panouri semitransparente în cultura de căpșun.....	133
15.4. Rolul analizelor suport realizate prin P2–ICPA București	145
15.5. Analiza comparativă a celor trei studii de caz.....	146

15.6. Lecții practice, limite și recomandări pentru proiectare	149
Capitolul 16. Perspective și inovații.....	153
16.1. Factori care susțin dezvoltarea sistemelor hortivoltaice.....	153
16.2. De la panouri fixe la sisteme adaptive.....	153
16.3. Digitalizare, senzori și automatizare.....	154
16.4. Tehnologii fotovoltaice adaptate cerințelor culturilor horticole	155
16.5. Exploatarea hortivoltaică a viitorului	158
16.6. Perspective pentru horticultura din România	158
Anexă – Instrumente practice pentru evaluarea și implementarea unui SHV.....	160
Fișă de evaluare preliminară – Este potrivit un sistem hortivoltaic pentru ferma mea?	160
Fișă rapidă de siguranță pentru lucrul în apropierea sistemului hortivoltaic.....	162
Monitorizare minimă recomandată pentru un lot pilot hortivoltaic	163
Interpretarea datelor de umiditate în sistemele hortivoltaice: limitări și riscuri de interpretare	164
Greșeli frecvente de evitat la implementarea unui sistem hortivoltaic.....	164
Set minim de indicatori tehnico-economici pentru evaluarea unui SHV la nivel de fermă	165
Calendar minim de evaluare a unui lot hortivoltaic pilot.....	166
Bibliografie	167

Capitolul 1.

Contextul dezvoltării sistemelor hortivoltaice

1.1. Schimbările climatice, tranziția energetică și presiunea asupra terenurilor agricole

Agricultura și sectorul energetic intră tot mai des în competiție pentru aceeași resursă: terenul. Presiunea vine din două direcții. Pe de o parte, agricultura trebuie să mențină producția alimentară în condițiile intensificării stresului climatic, ale deficitului hidric și ale unei variabilități meteorologice tot mai pronunțate. Pe de altă parte, tranziția energetică cere extinderea rapidă a capacităților fotovoltaice, pentru reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră și pentru creșterea securității energetice (IPCC, 2022; European Commission, 2019, 2022). Această suprapunere de nevoi schimbă modul în care este privit terenul agricol, care nu mai este doar suport pentru producția vegetală, ci devine și spațiu potențial pentru infrastructură energetică.

Atât producția agricolă, cât și producția de energie fotovoltaică depind de terenul disponibil. Parcurile fotovoltaice convenționale pot contribui la producerea de energie regenerabilă, dar, atunci când sunt instalate pe terenuri agricole, pot reduce suprafețele folosite pentru hrană. Din acest motiv, în multe regiuni, extinderea sistemelor fotovoltaice pe terenurile agricole a devenit o problemă de planificare, nu doar una tehnologică (Dupraz și colab., 2011; Weselek și colab., 2019). Sistemele agrivoltaice au apărut ca alternativă la separarea strictă dintre terenurile destinate agriculturii și cele destinate producerii de energie. Principiul lor este simplu: aceeași suprafață rămâne activă din punct de vedere agricol și produce, în același timp, energie electrică prin panouri fotovoltaice.

Diferența esențială față de un parc fotovoltaic clasic este menținerea funcției agricole active. Terenul nu este scos din circuitul agricol, ci utilizat dual. De aceea, proiectarea sistemului trebuie să țină cont simultan de performanța energetică și de performanța culturii (Dupraz și colab., 2011; Fraunhofer ISE, 2022).

În literatura de specialitate, sistemele agrivoltaice sunt analizate ca infrastructuri agro-energetice integrate, care nu presupun doar amplasarea unor panouri deasupra sau lângă culturi, ci proiectarea integrată a configurației fotovoltaice, a culturii agricole, a microclimatului, a accesului tehnologic, precum și a managementului exploatației.

Obiectivul nu este doar maximizarea producției de energie. Scopul este găsirea unui echilibru între energia produsă, menținerea funcției agricole și utilizarea eficientă a resurselor (Weselek și colab., 2019; Fraunhofer ISE, 2022).

1.2. Complexitatea integrării sistemelor fotovoltaice în culturile horticole

Horticultura este un caz special. Integrarea panourilor fotovoltaice este mai complexă aici decât în multe culturi extensive, deoarece culturile horticole ocupă terenul pe termen lung și au cerințe ridicate față de lumină, apă și microclimat. În plus, valoarea producției nu este dată doar de cantitate. Contează aspectul, uniformitatea, fermitatea, culoarea, gustul și capacitatea de păstrare. O producție stabilă, dar cu fructe slab colorate sau neuniforme, poate avea o valoare comercială redusă.

În horticultură, lumina nu influențează doar fotosinteza și acumularea de biomasă, ci intervine în procesele de inducție și diferențiere a mugurilor de rod, în distribuția și utilizarea asimilatelor, în colorarea fructelor, în acumularea zaharurilor și în uniformitatea maturării. Reducerea radiației solare prin acoperirea culturilor cu panouri fotovoltaice nu poate fi judecată simplu, ca efect pozitiv sau negativ (Marrou și colab., 2013; Barron-Gafford și colab., 2019; Weselek și colab., 2019). Răspunsul

depinde de specie, de soi, de sistemul de conducere, de densitatea plantației, de fenofază, de climatul local și, nu în ultimul rând, de configurația sistemului hortivoltaic (Wünsche și Lakso, 2000; Weselek și colab., 2019).

Speciile fructifere sunt vulnerabile la schimbările climatice, mai ales sub acțiunea cumulată a mai multor factori de stres. Temperaturile ridicate, radiația solară excesivă, seceta, fenomenele extreme și variabilitatea sezonieră pot afecta în același timp fiziologia plantei, calitatea fructelor, stabilitatea producției și costurile tehnologice (Marrou și colab., 2013).

În condițiile schimbărilor climatice, adaptarea nu mai poate fi privită doar din perspectiva suplimentării irigației sau a protecției, ci trebuie să integreze managementul factorilor climatici, managementul apei, protecția culturii și eficiența energetică (IPCC, 2022).

În regiunile calde sau în anii cu episoade de arșiță, o reducere moderată a radiației directe poate fi utilă. Ea poate diminua stresul termic, poate reduce temperatura fructelor, poate limita riscul de arsuri solare și poate scădea evapotranspirația. Astfel de efecte au fost observate în diferite sisteme agrivoltaice, mai ales în condiții de stres termic și hidric accentuat. În aceste situații, umbrirea parțială poate reduce presiunea asupra plantelor și poate îmbunătăți eficiența utilizării apei (Barron-Gafford și colab., 2019; Marrou și colab., 2013).

Totuși, același mecanism poate deveni nefavorabil dacă lumina disponibilă este redusă excesiv. Riscul este mai mare în climate în care radiația este deja limitativă sau la specii și soiuri cu cerințe ridicate față de lumină (Marrou și colab., 2013).

În aceste cazuri, umbrirea poate afecta inducția florală, fotosinteza, acumularea zaharurilor, maturarea și colorarea fructelor. Prin urmare, în horticultură, problema centrală nu este doar protecția culturii prin umbrire. Mai important este controlul cantității, distribuției și dinamicii radiației solare în raport cu cerințele fiziologice ale plantei (Marrou și colab., 2013; Weselek și colab., 2019).

1.3. Sistemele hortivoltaice ca extensie specializată a sistemelor agrivoltaice

Sistemele hortivoltaice (SHV) reprezintă aplicații ale conceptului agrivoltaic în culturile horticole. Ele pot fi integrate în livezi, plantații de arbuști fructiferi, viță-de-vie, căpșun, culturi legumicole specializate și spații protejate. Ceea ce le individualizează, însă, este sensibilitatea mai mare a culturilor horticole la distribuția luminii și la modificările microclimatului, deoarece, într-o cultură horticolă, o schimbare relativ mică a intensității luminii poate influența nu doar creșterea vegetativă și producția de fructe, ci și calitatea produsului final.

Într-un sistem hortivoltaic, panourile fotovoltaice au o dublă funcție. Prima este producerea de energie electrică. A doua, esențială pentru cultură, este modificarea mediului de creștere prin interceptarea, filtrarea și redistribuirea radiației solare. Aceste modificări pot influența temperatura aerului și a solului, temperatura frunzelor și fructelor, umiditatea relativă, deficitul de presiune a vaporilor de apă din atmosferă, evapotranspirația și disponibilitatea apei în sol (Barron-Gafford și colab., 2019; Weselek și colab., 2019).

Relația dintre configurația sistemului hortivoltaic, distribuția luminii și răspunsul fiziologic al culturii este esențială deoarece efectul asupra plantelor nu este determinat doar de prezența panourilor, ci de modul în care acestea modifică regimul luminos și microclimatic.

Orientarea panourilor, înălțimea structurii, densitatea modulelor, gradul de transparentă, distanța dintre rânduri și mobilitatea panourilor influențează cantitatea și calitatea luminii care ajunge la coronament (Fraunhofer ISE, 2022; Weselek și colab., 2019).

Din această perspectivă, proiectarea unui SHV este diferită de proiectarea unui sistem fotovoltaic convențional. Într-un parc fotovoltaic obișnuit, criteriul principal este producția de energie raportată la costuri și la suprafață. Într-un SHV, criteriile de proiectare iau în calcul și accesul utilajelor, efectuarea tăierilor de întreținere și de fructificare, recoltarea, fertilizarea, tratamentele

fitosanitare, circulația aerului, dimensiunea coronamentului și asigurarea unei producții de calitate. De exemplu, o structură eficientă energetic, dar prea joasă sau prea densă, poate deveni dificil de folosit într-o livadă. La fel, o configurație acceptabilă pentru o cultură joasă poate fi nepotrivită pentru o plantație pomicolă intensivă.

Literatura de specialitate arată că nu există o configurație optimă pentru toate sistemele agrivoltaice sau hortivoltaice. Rezultatele diferă în funcție de specie, climat, tehnologie și obiective de proiectare (Weselek și colab., 2019; Fraunhofer ISE, 2022).

Un sistem care funcționează bine pentru o cultură tolerantă la umbră, într-o regiune caldă și aridă, poate fi nepotrivit pentru o specie sensibilă la deficit de lumină sau pentru o zonă cu radiație solară mai redusă. De aceea, modelele dezvoltate în alte țări trebuie transferate cu prudență și validate cu date obținute în condiții locale.

1.4. Relevanța sistemelor hortivoltaice pentru horticultura românească

Horticultura românească se află într-un proces de transformare. Modernizarea tehnologiilor de cultură, creșterea costurilor energetice și intensificarea riscurilor climatice schimbă modul în care sunt proiectate și gestionate plantațiile. În livezi și în culturile de arbuști fructiferi, trecerea de la sisteme extensive la plantații intensive sau superintensive a crescut productivitatea, dar și dependența de irigare, fertirigare, mecanizare, depozitare, refrigerare și monitorizare climatică.

Pompele de irigare, echipamentele de fertirigare, sistemele de răcire, sistemele de depozitare frigorifică, echipamentele de sortare, cele de monitorizare și de automatizare consumă energie. În acest context, costul energiei poate influența direct rentabilitatea culturii. În aceste condiții, integrarea producției fotovoltaice în exploatațile horticole poate contribui la autonomia energetică. Condiția esențială este ca infrastructura energetică să nu compromită performanța culturii (Dinesh și Pearce, 2016; Fraunhofer ISE, 2022).

Pentru România, potențialul SHV trebuie analizat diferențiat: în funcție de specie, regiune, tipul plantației și obiectivul exploatației. În zonele expuse la temperaturi ridicate, arșiță și deficit hidric, sistemele hortivoltaice pot fi utile ca instrumente de reducere a stresului radiativ și termic.

În schimb, în zonele mai răcoroase, în plantațiile dense sau la speciile cu cerințe ridicate față de lumină, umbrirea trebuie evaluată cu atenție.

În astfel de cazuri, efectele negative asupra proceselor fiziologice pot depăși beneficiile microclimatice (Marrou și colab., 2013; Weselek și colab., 2019).

Un caz aparte îl reprezintă speciile emergente sau subtropicale cultivate experimental ori comercial în anumite regiuni ale țării, cum sunt kiwi (*Actinidia* sp.), kaki (*Diospyros kaki* L.), asimina sau banana nordului (*Asimina triloba*), jujube sau curmalul chinezesc (*Ziziphus jujuba*) și smochinul (*Ficus carica*). Pentru aceste culturi, integrarea în SHV nu trebuie presupusă automat ca fiind favorabilă. Unele specii pot tolera sau valorifica o anumită reducere a radiației în perioadele foarte calde, dar limitările climatice majore rămân adesea temperaturile minime de iarnă, gerurile severe și înghețurile târzii de primăvară. Prin urmare, sistemele hortivoltaice trebuie evaluate ca soluții de management adaptativ, nu ca răspuns unic la toate constrângerile climatice.

Dezvoltarea SHV în România este influențată și de factori care țin de structură și context: fragmentarea exploatațiilor agricole, costurile ridicate ale infrastructurii, incertitudinile privind reglementările, lipsa unor modele locale validate pe termen lung și necesitatea adaptării tehnologiilor la condițiile pedoclimatice regionale. Aceste limitări nu reduc interesul pentru SHV. Ele arată însă că introducerea lor trebuie să fie graduală și fundamentată pe proiecte-pilot, pe monitorizare și pe o evaluare economică realistă.

Pentru horticultura românească, etapa esențială nu este copierea unor modele dezvoltate în alte țări, ci testarea controlată a configurațiilor SHV în condiții locale. Evaluarea trebuie să urmărească simultan cultura, microclimatul, apa, energia și costurile.

Capitolul 2.

Principii generale ale sistemelor agrivoltaice și hortivoltaice

2.1. Utilizarea duală a terenului în sistemele hortivoltaice

Principiul fundamental al sistemelor agrivoltaice este utilizarea duală a terenului. Aceeași suprafață nu mai este rezervată exclusiv agriculturii sau exclusiv producerii de energie, ci este proiectată astfel încât cele două funcții să coexiste. În acest fel, sistemul agrivoltaic răspunde unei probleme tot mai importante: competiția pentru terenuri agricole productive, într-un context în care societatea are nevoie simultan de hrană, energie regenerabilă și adaptare la schimbările climatice (Dupraz și colab., 2011; Weselek și colab., 2019).

Într-un parc fotovoltaic convențional, obiectivul principal este producerea de energie. Solul de sub panouri are, de regulă, o funcție agricolă redusă sau secundară. Într-un sistem agrivoltaic, logica se schimbă: energia este integrată cu menținerea funcției agricole a terenului și cu posibilitatea desfășurării activităților de cultură (Fraunhofer ISE, 2022; Toledo și Scognamiglio, 2021).

Conceptul de utilizare simultană a terenului pentru cultivarea plantelor și pentru conversia energiei solare a fost formulat timpuriu de Goetzberger și Zastrow (1982). Ulterior, Dupraz și colab. (2011) l-au dezvoltat experimental și au propus termenul de sistem agrivoltaic. Valoarea sistemului nu provine doar din adăugarea panourilor peste o cultură, ci din funcționarea simultană a celor două componente: cultura agricolă și producția de energie.

În termeni practici, indicatorul LER (Land Equivalent Ratio) ajută la compararea unui sistem combinat de producție agricolă și de energie cu situația în care agricultura și producția fotovoltaică ar ocupa suprafețe separate.

În horticultură, utilizarea duală a terenului capătă o dimensiune suplimentară. Panourile fotovoltaice nu produc doar energie, ci modifică și mediul de cultură prin reducerea radiației directe, a temperaturii aerului și a solului, a umidității relative și a circulației aerului la nivelul coronamentului. De aceea, în sistemele hortivoltaice, componenta energetică nu poate fi separată de componenta fiziologică și tehnologică a plantației (Barron-Gafford și colab., 2019; Weselek și colab., 2019).

2.2. Diferențierea conceptuală între principalele tipuri de sisteme agro-fotovoltaice

În literatura de specialitate, termenii utilizați pentru sistemele care combină energia solară cu agricultura nu au întotdeauna același sens. De aceea, înainte de clasificarea tehnică a sistemelor, este necesară o diferențiere conceptuală (tabelul 2.1).

Nu orice sistem fotovoltaic amplasat pe teren agricol este agrivoltaic și nu orice sistem agrivoltaic este hortivoltaic (Fraunhofer ISE, 2022; Weselek și colab., 2019).

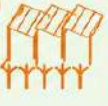
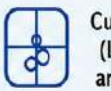
Un parc fotovoltaic clasic amplasat pe teren agricol urmărește în principal producția de energie. Chiar dacă între rândurile de panouri poate exista vegetație spontană, pășunat sau întreținere minimă, funcția agricolă nu este, de regulă, criteriul central de proiectare.

Sistemul agrivoltaic presupune, însă, menținerea deliberată a unei activități agricole productive, iar panourile sunt proiectate astfel încât cultura să poată fi cultivată, îngrijită și recoltată.

Sistemele hortivoltaice reprezintă o categorie specializată de sisteme agrivoltaice aplicate culturilor horticole: livezi, plantații de arbuști fructiferi, viță-de-vie, căpșun, culturi legumicole specializate și unele spații protejate. Specificul lor este dat de sensibilitatea ridicată a acestor culturi la lumină și la microclimat, precum și de importanța calității producției, obiectiv la fel de important

pentru domeniul horticol precum productivitatea. Această clarificare este importantă deoarece nu orice investiție fotovoltaică pe teren agricol aduce automat beneficii culturii.

Tabelul 2.1 – Diferențierea conceptuală între principalele tipuri de sisteme agro-fotovoltaice (sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

Tip de sistem	Obiectiv dominant	Tip de culturi	Nivelul de control al microclimatului	Importanța managementului luminii
1  Parc fotovoltaic convențional pe teren agricol	Obiectiv energetic (maximizarea producției de energie)	 Culturi de câmp sau utilizare agricolă limitată (sub panouri sau între rânduri)	 Redus	 Moderată
2  Sistem agrivoltaic	Producție agricolă și energetică pe aceeași suprafață	 Culturi de câmp, leguminoase, plante furajere, pajiști	 Ridicat	 Foarte importantă
3  Sistem hortivoltaic (SHV)	Management microclimatic și producție energetică	 Specii horticole (pomi, viță-de-vie, legume, fructe de pădure)	 Ridicat	 Foarte importantă
4  Seră fotovoltaică	Producție agricolă protejată și producție energetică	 Culturi protejate (legume, flori, aromatice etc.)	 Foarte ridicat	 Critică
5  Sistem vertical / inter-rând	Producție agricolă cu protecție parțială și producție energetică	 Viță-de-vie, livade, culturi specializate	 Moderat - ridicat	 Importantă - foarte importantă
i Nivelul de control al microclimatului: capacitatea sistemului de a modula factorii microclimatici (lumină, temperatură, umiditate, vânt). Importanța managementului luminii: rolul proiectării și gestionării luminii în obținerea simultană a producțiilor agricole și energetice.				

2.3. Particularitățile sistemelor hortivoltaice

Sistemele hortivoltaice trebuie privite ca sisteme agrivoltaice adaptate particularităților culturilor horticole. Spre deosebire de multe culturi de câmp, culturile horticole au cerințe mai stricte față de distribuția luminii, microclimat, accesul tehnologic și calitatea finală a producției.

În livezi și plantații de arbuști fructiferi, radiația solară influențează simultan fotosinteza, inducția și diferențierea mugurilor de rod, dezvoltarea coronamentului, acumularea substanțelor de rezervă, acumularea zaharurilor, colorarea fructelor și uniformitatea maturării. Din acest motiv, reducerea nivelului de radiație solară incidentă într-un sistem de panouri fotovoltaice poate fi, după context, fie un avantaj, fie un dezavantaj.

În anumite condiții, o reducere moderată a radiației directe poate diminua stresul termic și radiativ, poate reduce supraîncălzirea fructelor și poate limita pierderile de apă. În alte condiții, mai ales la specii cu cerințe ridicate față de lumină sau în climate mai puțin însorite, aceeași reducere poate împiedica desfășurarea unor procese fiziologice importante (Marrou și colab., 2013; Weselek și colab., 2019). Răspunsul culturii depinde de specie, soi, portaltol, sistem de conducere, densitatea plantației, stadiul fenologic, nivelul de încărcare cu rod, gradul de umbrire și condițiile climatice locale.

O livadă intensivă, o plantație de arbuști fructiferi și o cultură erbacee de talie joasă nu vor răspunde identic la aceeași reducere a luminii. De aceea, proiectarea unui SHV trebuie să

pornească de la cerințele plantei, nu doar de la randamentul fotovoltaic. În horticultură, performanța sistemului se măsoară printr-un ansamblu de indicatori: producția agricolă, calitatea fructelor, stabilitatea producției, consumul de apă, producția de energie și compatibilitatea cu lucrările tehnologice (Fraunhofer ISE, 2022; Toledo și Scognamiglio, 2021).

O particularitate importantă a SHV este modul în care panourile modifică lumina disponibilă la nivelul coronamentului (Dragomir și colab., 2024). Lumina directă poate produce supraîncălzirea țesuturilor și arsuri solare, mai ales în perioadele foarte calde. Lumina difuză, în schimb, poate pătrunde mai uniform în interiorul coroanei și poate contribui la o distribuție mai echilibrată a radiației între frunzele expuse și cele aflate în zonele inferioare sau interioare.

Acest efect nu trebuie însă presupus automat. El trebuie verificat prin măsurători și susținut printr-o proiectare adaptată culturii.

Pe lângă lumină, sistemele hortivoltaice trebuie să țină cont de cerințele tehnologice ale plantației (Dragomir și colab., 2024). Înălțimea structurii, distanța dintre stâlpi, spațiul de întoarcere, accesul utilajelor, efectuarea tratamentelor fitosanitare și a tăierilor de întreținere și de fructificare, recoltarea, irigarea și fertilizarea pot decide dacă sistemul este funcțional sau nu. Un SHV bine proiectat nu trebuie doar să protejeze cultura împotriva riscurilor climatice, ci trebuie să permită și desfășurarea lucrărilor specifice livezii sau plantației.

2.4. Principalele componente ale unui sistem hortivoltaic

Un sistem hortivoltaic este alcătuit dintr-o combinație de componente energetice, structurale, horticole și de monitorizare și management. Acestea trebuie proiectate împreună, pentru a susține simultan producția agricolă și producția de energie electrică (figura 2.1).

Spre deosebire de o instalație fotovoltaică amplasată separat de cultură, sistemul hortivoltaic trebuie evaluat ca infrastructură integrată. Fiecare componentă influențează atât funcționarea energetică, cât și microclimatul și tehnologia de cultură.

Componenta fotovoltaică include panourile, invertorul, cablurile, sistemele de protecție, contorizarea, eventualele baterii de stocare și conexiunea la consumatorii exploatației sau la rețea. Ea determină producția de energie, dar influențează și cantitatea, distribuția și variabilitatea radiației solare care ajunge la nivelul coroanei.

Alegerea panourilor și modul lor de amplasare trebuie analizate nu numai din perspectiva randamentului electric, ci și din perspectiva efectului asupra luminii disponibile pentru plante. Tipurile de module și implicațiile lor asupra luminii sunt discutate separat, în subcapitolul 2.5, în cadrul clasificării sistemelor.

Componenta structurală include stâlpii, grinzile, elementele de susținere, fundațiile (inclusiv cele realizate cu șuruburi elicoidale) și, după caz, mecanismele de reglare a poziției panourilor. Structura stabilește înălțimea liberă, distanțele utile, accesul la cultură și compatibilitatea cu lucrările tehnologice. În livezi, sistemele prea joase sau prea dense pot crea dificultăți la efectuarea tăierilor de întreținere și de fructificare, a tratamentelor fitosanitare, precum și la recoltare și la întreținerea solului. În funcție de specie și sistemul de cultură, cerințele sunt diferite. Principiul rămâne însă același: structura fotovoltaică trebuie adaptată culturii, nu invers. Înaintea alegerii soluției de fundare, este recomandată verificarea cerințelor legale aplicabile investiției, inclusiv a celor privind urbanismul, autorizarea și regimul construcțiilor, deoarece acestea pot diferi în funcție de amplasament, de caracterul permanent sau temporar al structurii și de reglementările locale.

În plus, alegerea tipului de fundare trebuie să țină seama de flexibilitatea exploatarei și de cadrul legislativ aplicabil. Fundațiile permanente din beton pot implica cerințe suplimentare privind autorizarea lucrărilor de construcții și pot constitui obstacole permanente în teren. Soluțiile demontabile, precum fundațiile cu șuruburi elicoidale, reduc de regulă intervențiile asupra solului și pot facilita reconfigurarea sau relocarea sistemului, atunci când condițiile geotehnice, structurale și de amplasament permit utilizarea lor.

Componenta horticola include cultura propriu-zisă, sistemul de conducere, distanțele de plantare, sistemul de irigare și de fertirigare, la care se adaugă activități precum lucrările solului, protecția fitosanitară și recoltarea. În SHV, aceste elemente trebuie corelate cu poziția și densitatea panourilor. O plantație cu coronament înalt și deschis poate răspunde diferit la umbră comparativ cu o plantație densă. De asemenea, o cultură sensibilă la boli poate necesita o atenție suplimentară în ceea ce privește ventilația, umiditatea relativă și durata de umezire a frunzelor și fructelor.

Componenta de monitorizare și management include senzori de radiație, temperatură, umiditate relativă și senzori pentru umiditatea solului, stații meteorologice, camere sau senzori multispectrali, precum și sisteme de colectare și interpretare a datelor. Aceste instrumente sunt importante mai ales în fazele de testare, proiectare și optimizare, deoarece ele permit evaluarea efectului real al panourilor asupra culturii, nu doar estimarea teoretică a umbririi (Barron-Gafford și colab., 2019; Fraunhofer ISE, 2022).

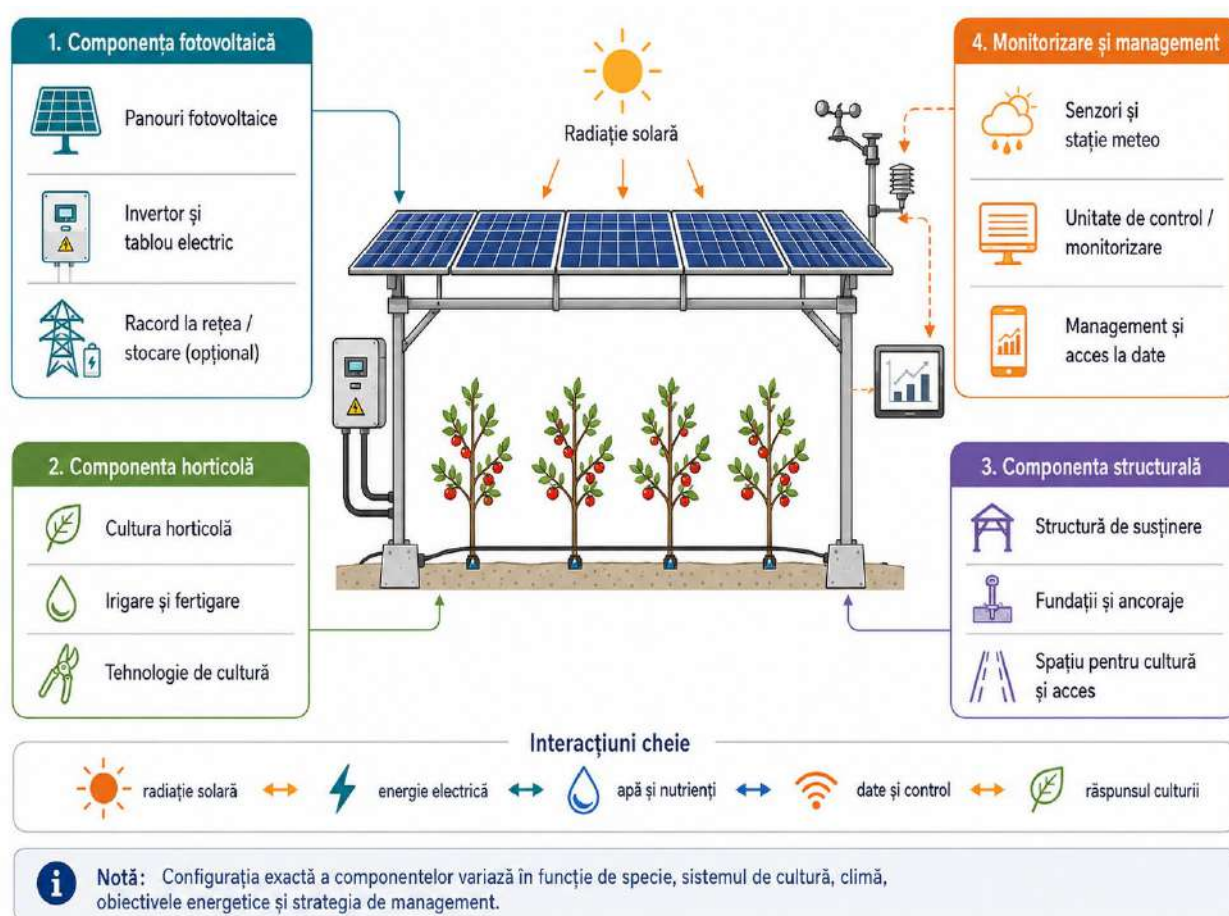


Figura 2.1 – Componentele principale ale unui SHV (sursa: elaborare proprie)

Energia produsă poate fi utilizată direct în exploatare, stocată sau valorificată prin livrare în rețea, în funcție de legislație, configurația tehnică și modelul economic. În plantațiile horticole există mai mulți consumatori importanți: pompele de irigare, sistemele de fertirigare, sortarea, prerăcirea și răcirea rapidă, refrigerarea, depozitarea în condiții controlate (sau semicontrolate), monitorizarea și automatizarea, precum și procesarea produselor care nu pot fi valorificate în stare proaspătă, contribuind astfel la reducerea pierderilor și la creșterea valorii adăugate a producției.

În aceste condiții, evaluarea unui SHV trebuie să includă nu numai energia produsă anual, ci și posibilitățile reale de utilizare sau valorificare a acesteia.

2.5. Clasificarea sistemelor agrivoltaice și hortivoltaice

Clasificarea sistemelor agrivoltaice și hortivoltaice nu trebuie înțeleasă ca o simplă listă de tipuri constructive. Ea este un instrument practic, care ajută la înțelegerea deciziilor ce trebuie luate.

În practică, întrebarea importantă nu este doar „ce tip de sistem există?”, ci „unde sunt amplasate panourile, cum sunt orientate, ce tip de modul se folosește, cât de mult modifică lumina și ce obiectiv urmărește exploatarea?” Performanța unui SHV depinde simultan de configurația sistemului de panouri, de cultura agricolă, de microclimat, de disponibilitatea apei, de accesul tehnologic, precum și de obiectivul economic al exploatarea (Dupraz și colab., 2011; Weselek și colab., 2019; Fraunhofer ISE, 2022).

O primă clasificare se referă la amplasarea panourilor în raport cu cultura. Sistemele pot avea panouri deasupra culturii sau deasupra rândurilor, panouri între rânduri, panouri pe marginea parcelei sau în zone tehnologice, panouri plutitoare pe bazine ori acumulări de apă, panouri integrate în sere sau solarii și configurații hibride. Întrebarea practică este simplă: unde se află panourile față de plante și față de lucrările agricole? În horticultură, răspunsul este esențial, deoarece poziția panourilor influențează accesul utilajelor, efectuarea lucrărilor de întreținere, a tratamentelor fitosanitare, recoltarea, irigarea și distribuția luminii în coronament.

A doua clasificare privește geometria și orientarea panourilor. Panourile pot fi dispuse orizontal sau aproape orizontal, oblic, vertical, orientate predominant spre sud, în configurații est-vest, în două ape sau pe sisteme cu urmărire solară (tracking). Aici întrebarea este: cum sunt așezate panourile în spațiu și cum se deplasează umbra în timpul zilei? Orientarea și înclinarea influențează producția energetică, dar și distribuția luminii directe și difuze, durata umbririi, temperatura culturii și uniformitatea maturării. Aceeași suprafață de panouri poate avea efecte diferite asupra culturii dacă este orientată spre sud, est-vest sau vertical.

O a treia clasificare se referă la tipul modulului fotovoltaic utilizat. În sistemele hortivoltaice pot fi folosite module opace monofaciale, module bifaciale, module semitransparente, module cu transmisie spectrală selectivă sau alte tehnologii fotovoltaice specializate.

Aceste caracteristici nu trebuie confundate cu poziția panoului. De exemplu, caracterul bifacial nu descrie amplasarea panoului, ci capacitatea modulului de a capta radiație pe ambele fețe. Modulele bifaciale pot fi valorificate în special în configurații în care fața posterioară primește radiație reflectată sau difuză, cum sunt unele sisteme verticale, est-vest, oblice sau amplasate între rânduri. Ele nu trebuie asimilate cu sistemele verticale (Guerrero-Lemus și colab., 2016; Fraunhofer ISE, 2022).

O altă clasificare utilă pentru horticultură se referă la gradul de acoperire, densitatea și transparența sistemului. Două sisteme pot folosi același tip de panou, dar pot produce efecte fiziologice foarte diferite dacă unul are module compacte și continue, iar celălalt are module distanțate, goluri între panouri sau panouri semitransparente (Dragomir și colab., 2025). Pentru plante nu contează doar procentul mediu de umbră. Contează și distribuția luminii în timp și spațiu: umbrirea poate fi uniformă sau neuniformă, temporară sau persistentă, concentrată în anumite ore ale zilei sau distribuită pe perioade mai lungi. În horticultură, aceste diferențe pot influența fotosinteza, inducția florală, diferențierea, colorarea fructelor, acumularea zaharurilor și uniformitatea maturării (Marrou și colab., 2013; Weselek și colab., 2019).

De exemplu, un panou opac continuu și un panou semitransparent pot avea aceeași suprafață instalată, dar efecte foarte diferite asupra frunzelor și fructelor.

Sistemele pot fi clasificate și după mobilitate și modul de control. Ele pot fi fixe, cu urmărire solară sau adaptive. Sistemele fixe au o geometrie constantă și sunt mai simple constructiv, dar oferă mai puțină flexibilitate în controlul distribuției luminii.

Sistemele cu urmărire solară (tracking) sunt cele care își modifică poziția în principal în funcție de poziția soarelui, pentru a crește producția energetică și pentru a modifica dinamica umbrei. Sistemele adaptive merg mai departe: pot ajusta poziția panourilor și în funcție de cerințele culturii,

temperatură, radiație, vânt, precipitații, risc de stres termic sau obiective de protecție microclimatică. Întrebarea devine astfel: sistemul are o poziție fixă sau poate reacționa la condițiile de mediu și la nevoile culturii? (Fraunhofer ISE, 2022; Toledo și Scognamiglio, 2021).

În final, o clasificare foarte importantă pentru cultivatori este cea după obiectivul dominant al proiectării. Unele sisteme sunt orientate predominant spre producția de energie, altele spre protecția culturii și managementul microclimatului, iar altele încearcă să mențină un echilibru între producția energetică și performanța horticola (figura 2.2).

Întrebarea practică	Axa de clasificare	Exemple de opțiuni	Efect principal în fermă
1  Unde sunt amplasate panourile?	Amplasarea față de cultură	deasupra culturii / între rânduri / pe margine / în seră	acces, lucrări, distribuția luminii
2  Cum sunt orientate?	Geometrie și orientare	sud / est-vest / vertical / tracking	umbră, producție de energie, uniformitatea luminii
3  Ce tip de modul se folosește?	Tipul modului	opac / bifacial / semitransparent / spectral selectiv	transmiterea luminii, compatibilitatea cu cultura
4  Câtă lumină este interceptată?	Grad de acoperire	redus / mediu / ridicat	umbră, fotosinteză, maturare
5  Sistemul este fix sau mobil?	Mobilitate și control	fix / tracking / adaptiv	flexibilitate, cost, răspuns la mediu
6  Care este obiectivul dominant?	Obiectivul proiectării	energie / cultură / echilibru	priorități de proiectare și exploatare

 Un sistem poate fi descris prin mai multe axe în același timp. Clasificările nu se exclud; ele descriu aspecte diferite ale aceluiași sistem.

Figura 2.2 – Axe principale de decizie pentru clasificarea sistemelor hortivoltaice (sursa: elaborare proprie)

Această clasificare răspunde la întrebarea: „ce problemă trebuie să rezolve sistemul?” Dacă obiectivul principal este energia, proiectarea poate favoriza densitatea panourilor și randamentul fotovoltaic. Dacă obiectivul principal este cultura, proiectarea trebuie să prioritizeze lumina disponibilă, ventilația, accesul tehnologic, apa și calitatea producției. Într-un SHV echilibrat, soluția trebuie să fie compatibilă simultan cu planta, cu lucrările agricole și cu producția de energie (Dupraz și colab., 2011; Dinesh și Pearce, 2016; Weselek și colab., 2019).

Aceste criterii nu se exclud. Ele sunt axe complementare de descriere a aceluiași sistem. Un sistem poate fi, în același timp, amplasat între rânduri, vertical, fix, cu module bifaciale și orientat predominant spre producția de energie.

Un alt sistem poate fi amplasat deasupra rândurilor, cu panouri semitransparente, mobil sau adaptiv și orientat spre protecția culturii. Prin urmare, clasificarea corectă trebuie să ajute cultivatorul să înțeleagă combinația de decizii, nu să memoreze denumiri izolate.

Pentru utilizarea practică a clasificării, este utilă o succesiune simplă de întrebări: ce obiectiv urmărește exploatarea (producție horticola, protecție împotriva stresului abiotic, producție de energie sau un echilibru între acestea); ce cerințe are cultura în raport cu lumina și microclimatul; unde vor fi amplasate panourile față de cultură; cum vor fi orientate; ce tip de modul va fi folosit; cât de densă va fi acoperirea; sistemul va fi fix sau mobil; ce efecte va avea soluția asupra luminii, apei, ventilației, accesului tehnologic, consumului energetic și costurilor de implementare și exploatare? Numai după aceste răspunsuri se poate spune dacă un anumit tip de SHV este potrivit pentru o specie, un amplasament și un model tehnologic concret. Astfel, clasificarea devine un instrument de proiectare, nu un exercițiu de terminologie.

2.6. Efectul sistemelor hortivoltaice asupra microclimatului

Sistemele hortivoltaice nu influențează cultura doar prin reducerea radiației solare. Ele modifică microclimatul din jurul plantei. Prin interceptarea și redistribuirea luminii, panourile pot schimba regimul radiativ, temperatura aerului, a solului și a fructelor, umiditatea relativă a aerului, evapotranspirația, umiditatea solului, deficitul de presiune a vaporilor de apă din atmosferă și circulația aerului (Barron-Gafford și colab., 2019; Weselek și colab., 2019).

Aceste efecte pot fi favorabile sau nefavorabile, în funcție de specie, soi, sistemul de cultură, climat, configurația sistemului hortivoltaic și momentul fenologic. Reducerea radiației directe poate limita supraîncălzirea frunzelor și fructelor, dar o umbră excesivă poate reduce lumina disponibilă pentru fotosinteză și maturare (Marrou și colab., 2013; Weselek și colab., 2019). În același timp, scăderea cererii evaporative poate contribui la conservarea apei în sol, însă umiditatea relativă mai ridicată și ventilația insuficientă pot crește riscul unor boli, mai ales în plantațiile dense sau în condiții de presiune fitosanitară ridicată (Barron-Gafford și colab., 2019; Fraunhofer ISE, 2022).

2.7. Relația dintre producția energetică și producția horticola

Una dintre cele mai importante provocări ale sistemelor agrivoltaice este găsirea echilibrului dintre performanța agricolă și producția energetică.

În general, o densitate mai mare a panourilor poate crește producția de energie, dar poate reduce radiația solară disponibilă pentru cultură. Pe de altă parte, o densitate mai mică poate favoriza cultura, dar ar putea reduce capacitatea energetică instalată. Acest compromis este esențial în proiectarea oricărui SHV (Dupraz și colab., 2011; Dinesh și Pearce, 2016).

În horticultură, echilibrul este mai complex decât în culturile extensive. Obiectivul nu este doar menținerea producției cantitative.

Calitatea fructelor, procentul de producție comercială și costurile tehnologice sunt la fel de importante. În anumite condiții, o reducere moderată a radiației poate diminua pierderile cauzate de arsuri solare sau stres termic. În alte condiții, aceeași reducere poate limita acumularea zaharurilor sau colorarea fructelor.

Land Equivalent Ratio (LER) este un indicator utilizat frecvent pentru evaluarea eficienței utilizării terenului în sistemele agrivoltaice. O valoare a indicatorului LER mai mare decât 1 indică faptul că utilizarea combinată a terenului pentru agricultură și energie este mai eficientă decât utilizarea separată a terenului pentru cele două funcții (figura 2.3). Totuși, în horticultură, LER trebuie interpretat împreună cu indicatorii de calitate, costurile, riscurile tehnologice și compatibilitatea cu lucrările exploatației (Dupraz și colab., 2011; Fraunhofer ISE, 2022).

Zona optimă a unui SHV nu este identică pentru toate culturile. La speciile sensibile la arșiță, la stres radiativ sau la supraîncălzirea fructelor, umbrirea parțială poate avea valoare agronomică. La speciile sau soiurile care au nevoie de lumină abundentă pentru inducția florală, pentru acumularea zaharurilor sau pentru colorare, gradul de umbră trebuie limitat.

În practică, aceeași structură poate fi prea umbră pentru o specie și acceptabilă pentru alta. Contează nu doar câtă lumină este redusă, ci și momentul sezonului în care apare această reducere.

Relația dintre producția energetică și producția horticola trebuie înțeleasă ca o decizie de proiectare, nu ca o formulă universală. Procesul de proiectare trebuie să pornească de la analiza amplasamentului și a condițiilor locale și să includă evaluarea distribuției radiației solare, precum și realizarea unui studiu de umbră. Ulterior, trebuie analizate împreună densitatea panourilor, orientarea, înălțimea structurii, gradul de transparență, mobilitatea panourilor, sistemul de cultură și cerințele speciei. Un SHV eficient este acela în care energia produsă adaugă valoare exploatației fără a compromite funcția horticola pentru care terenul este utilizat.

Sistemele hortivoltaice trebuie înțelese ca sisteme integrate, aflate la intersecția dintre producția horticola, producția de energie, managementul microclimatului și utilizarea eficientă a terenului. De aceea, evaluarea lor nu poate fi redusă la prezența panourilor deasupra culturii sau la

cantitatea de energie produsă. Performanța unui SHV depinde de modul în care configurația fotovoltaică, cerințele biologice ale culturii, lucrările tehnologice și obiectivele exploatației sunt corelate într-un sistem funcțional. Această logică este dezvoltată în capitolele următoare prin criterii de evaluare, proiectare și management, prin analize energetice și economice și prin exemple de aplicare.

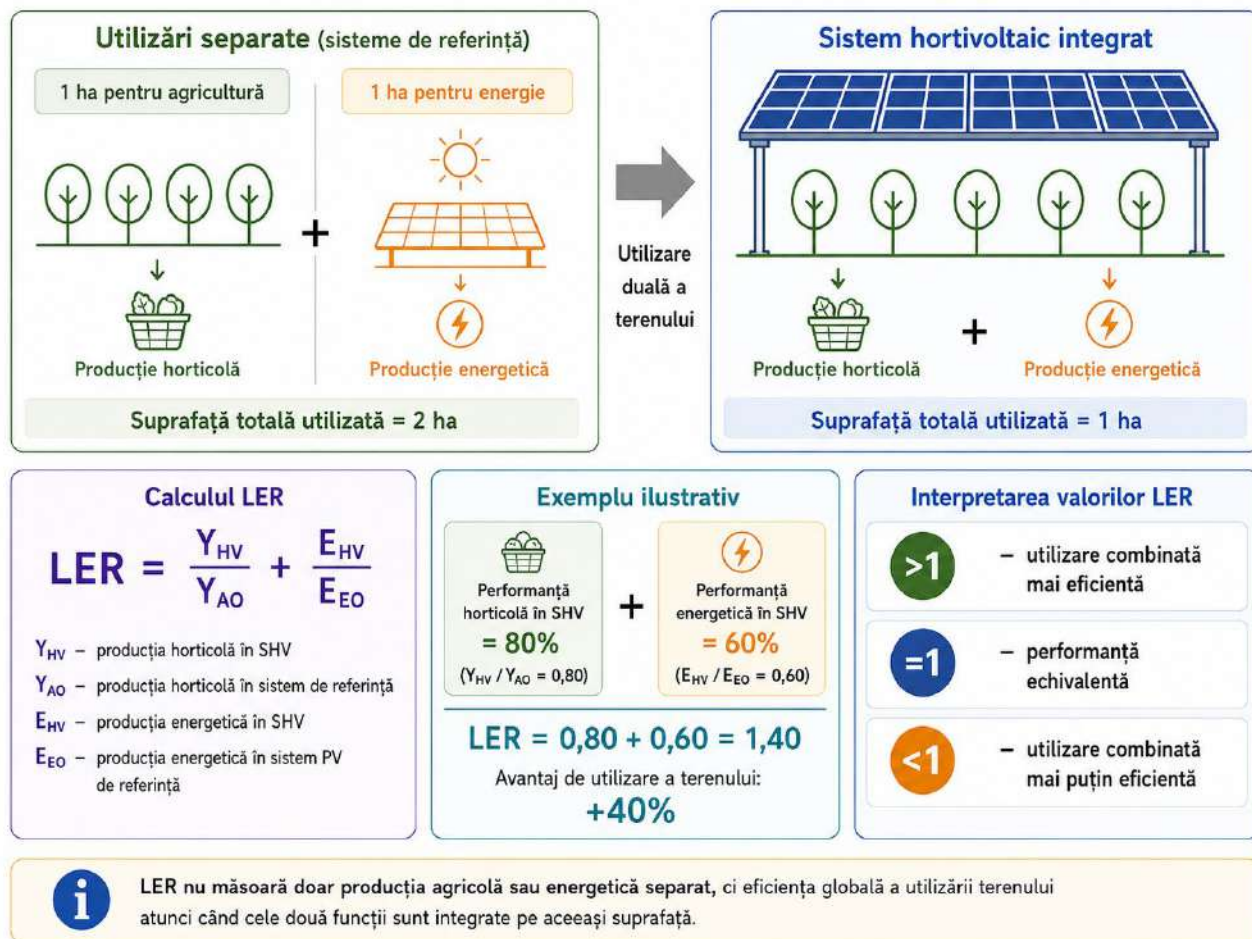


Figura 2.3 – Interpretarea conceptului Land Equivalent Ratio (LER) (sursa: elaborare proprie)

Mesajul principal al capitolului este simplu: sistemele hortivoltaice nu trebuie tratate ca soluții standardizate. Ele sunt infrastructuri agro-energetice care trebuie adaptate culturii, amplasamentului și obiectivelor exploatației. Valoarea lor reală apare atunci când producția de energie, funcția horticolă a terenului, microclimatul și tehnologia de cultură sunt proiectate și evaluate împreună.

Capitolul 3.

Metodologia generală de evaluare a sistemelor hortivoltaice

3.1. Principii generale de evaluare

Evaluarea sistemelor hortivoltaice trebuie făcută integrat. Un SHV nu este doar o instalație fotovoltaică și nici doar o cultură horticolă parțial acoperită, ci un sistem dual, în care infrastructura energetică, plantația și lucrările tehnologice se influențează reciproc.

Modificarea radiației schimbă temperatura aerului și a solului, evapotranspirația, umiditatea solului, starea fiziologică a plantelor și calitatea producției. În același timp, sistemul de cultură, densitatea coronamentului, accesul tehnologic și regimul de întreținere condiționează modul în care infrastructura fotovoltaică poate fi amplasată și exploatată (Dupraz și colab., 2011; Dinesh și Pearce, 2016; Weselek și colab., 2019; Fraunhofer ISE, 2022).

Metodologia utilizată în acest ghid urmărește să lege aceste componente într-o analiză comună: microclimat, sol, nutriție minerală, fiziologie, producție horticolă, calitate, producție de energie și eficiență economică (figura 3.1). Scopul nu este doar compararea variantelor, ci explicarea mecanismelor care produc diferențele observate (Barron-Gafford și colab., 2019).

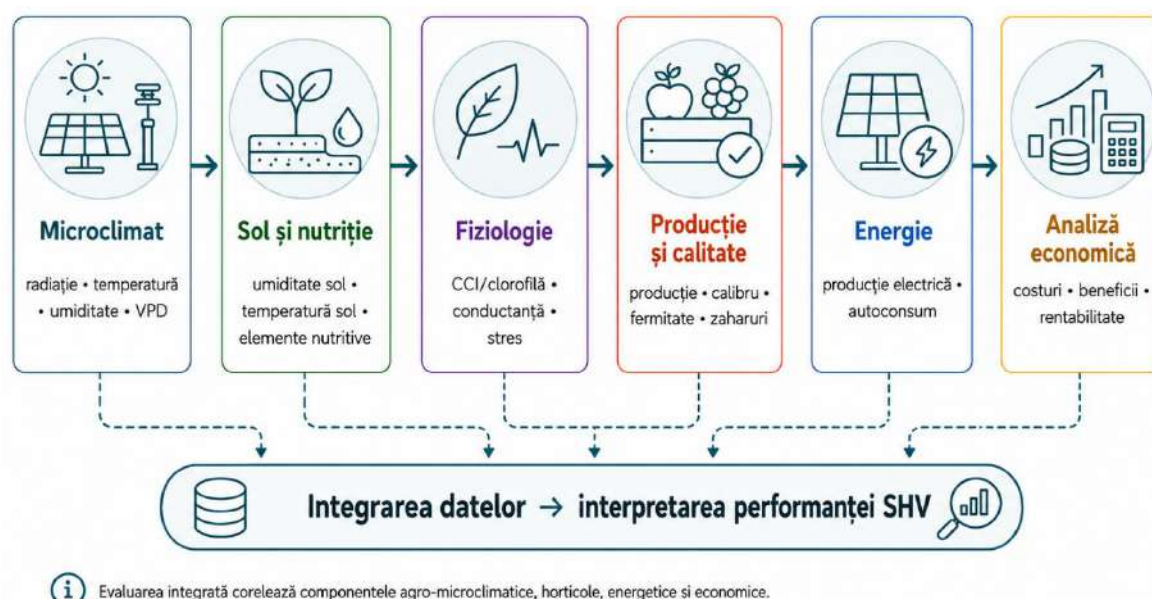


Figura 3.1 – Schema generală de evaluare integrată a sistemelor hortivoltaice (sursa: elaborare proprie)

3.2. Organizarea platformelor experimentale

Platformele experimentale au fost organizate pentru compararea variantelor neacoperite cu variante acoperite de panouri fotovoltaice. Această raportare este necesară deoarece efectele SHV pot fi interpretate corect numai atunci când cultura este comparată cu o variantă cultivată în condiții similare, dar fără influența directă a panourilor.

În funcție de studiul de caz, au fost evaluate configurații constructive diferite. La coacăzul roșu, soiul 'Rovada', experimentul desfășurat la ICDP Pitești-Mărăcineni a inclus panouri opace orientate spre sud, respectiv est-vest. Această comparație permite analiza efectului configurației asupra radiației, microclimatului și răspunsului culturii. Pentru asimina, evaluarea realizată la

partenerul USAMV București a urmărit rolul umbririi moderate la o specie sensibilă la expunerea directă în fazele juvenile, fără a porni de la ideea că reducerea luminii este automat favorabilă.

În cultura de căpșun, partenerul SCDP Băneasa a utilizat panouri fotovoltaice semitransparente, comparând o variantă neacoperită cu variante acoperite cu panouri de aproximativ 49% și 77% transparență. Aici, evaluarea se concentrează în principal asupra echilibrului dintre transmiterea luminii, protecția microclimatică și performanța culturii. Configurațiile generează modele diferite de umbrire și distribuție a radiației, iar efectele microclimatice și horticoale trebuie interpretate separat atunci când datele permit acest lucru.

Experiențele au fost organizate în variante și repetiții experimentale, pentru a permite compararea statistică a răspunsului culturilor. Monitorizarea pe mai multe sezoane este, de asemenea, importantă: efectele panourilor pot varia între ani, fenofaze și episoade meteorologice contrastante (Fraunhofer ISE, 2022).

3.3. Monitorizarea microclimatului

Monitorizarea microclimatului este una dintre componentele centrale ale evaluării unui SHV (tabelul 3.1). Panourile modifică în primul rând regimul radiației solare, iar această modificare se reflectă ulterior în modificarea temperaturii aerului, a temperaturii solului, a umidității relative, a umidității solului și a evapotranspirației (Barron-Gafford și colab., 2019; Weselek și colab., 2019).

*Tabelul 3.1 – Indicatori recomandați pentru monitorizarea microclimatică în SHV
(sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)*

	Indicator	Unitate	Loc de măsurare	Frecvență recomandată	Relevanță pentru cultură
	Radiație solară globală / PAR	W/m ² ; μmol m ⁻² s ⁻¹	La nivelul coronamentului, în variantele acoperite și în martorul neacoperit	Continuu, cu înregistrare la 10–30 min	Permite cuantificarea reducerii luminii disponibile pentru fotosinteză, maturare, colorare și diferențierea mugurilor de rod.
	Temperatură aer	°C	În zona coronamentului, la aceeași înălțime în toate variantele	Continuu, cu înregistrare la 10–30 min	Arată efectul SHV asupra stresului termic, ritmului de dezvoltare, fenologiei și riscului de supraîncălzire.
	Umiditate relativă a aerului și VPD	%; kPa	În zona coronamentului, în variantele SHV și martor	Continuu, cu înregistrare la 10–30 min; VPD calculat din temperatură și umiditate	Indică cererea evaporativă a atmosferei, presiunea asupra transpirației și riscul de microclimat favorabil bolilor.
	Temperatură sol	°C	În zona radiculară, la adâncime constantă	Continuu sau la intervale regulate	Evidențiază modificarea regimului termic al solului, cu efecte asupra activității radiculare, absorbției apei și ritmului de creștere.
	Umiditate sol	% volumetric; m ³ /m ³ sau kPa, în funcție de senzor	În zona radiculară, în puncte reprezentative pentru fiecare variantă	Continuu sau la intervale regulate	Ajută la evaluarea conservării apei sub panouri și la ajustarea irigației în funcție de condițiile reale din fiecare variantă.
	Temperatură fructe	°C	Pe fructe expuse și umbrite, la speciile sensibile	În perioadele calde și în fazele de creștere, părgă și maturare	Este utilă pentru evaluarea riscului de arsuri solare, supraîncălzire, deshidratare și depreciere calitativă.
	Viteza vântului / ventilație	m/s	Sub structură și în zona coronamentului	Continuu, dacă există senzori, sau prin campanii de măsurare	Permite interpretarea aerisirii coronamentului, uscării frunzelor și fructelor, acumulării de aer cald sau rece și riscului fitosanitar.
	Precipitații și apă ajunsă la sol	mm	În exteriorul sistemului și, dacă este posibil, sub panouri	La fiecare eveniment de precipitații sau continuu	Arată diferențele dintre precipitațiile atmosferice și apa care ajunge efectiv în zona radiculară, fiind relevantă pentru irigare și managementul solului.

Pentru un lot pilot, monitorizarea minimă ar trebui să includă radiația solară, temperatura aerului, umiditatea relativă, temperatura solului și umiditatea solului.

Senzorii trebuie amplasați atât în variantele acoperite, cât și în varianta neacoperită, pentru a permite compararea directă a mediului de cultură. Poziția lor se stabilește în funcție de înălțimea

culturii, zona de coronament, zona radiculară și dinamica umbrei. Parametrii urmăriți pot include radiația solară, temperatura aerului, umiditatea relativă, temperatura și umiditatea solului, precipitațiile, viteza vântului și evapotranspirația. La culturile sensibile la arsuri solare, temperatura fructelor poate oferi informații suplimentare utile.

Datele microclimatice nu trebuie citite doar ca medii anuale. În horticultură, sunt importante atât fenofazele critice precum înfloritul, legarea fructelor, inducția, creșterea și maturarea fructelor, cât și perioadele de modificare a colorației și, mai ales, episoadele de stres termic. Uneori, efectele decisive apar în intervale scurte, dar cu impact direct asupra producției și calității.

3.4. Evaluarea răspunsului agronomic și fiziologic

Evaluarea culturii trebuie să includă atât performanța agronomică, cât și răspunsul fiziologic. Producția finală este importantă, dar nu explică singură efectele SHV. Două variante pot avea producții de fructe apropiate prin mecanisme diferite: reducerea stresului termic, limitarea fotosintezei, modificarea fenologiei sau modificarea disponibilității apei.

Parametrii agronomici pot include producția pe plantă sau raportată la unitatea de suprafață, productivitatea tufelor, raportul dintre rodire și creșterea vegetativă, masa și dimensiunile fructelor, procentul de fructe comerciale, fermitatea, conținutul de substanță uscată solubilă, aciditatea și culoarea. Indicatorii fiziologici pot include conținutul foliar de clorofilă, fluorescența clorofilei, pigmentii fotosintetici, conductanța stomatală sau temperatura frunzelor, în funcție de dotarea experimentală (Marrou și colab., 2013; Barron-Gafford și colab., 2019).

Legătura dintre indicatorii proceselor fiziologice și indicatorii microclimatului este esențială. De exemplu, un conținut mai ridicat de clorofilă sub panouri poate indica adaptarea aparatului foliar la lumină redusă sau o stare fiziologică mai bună în condiții de stres radiativ diminuat. În schimb, o producție mai mică, asociată cu lumină insuficientă și maturare întârziată, poate arăta că umbrirea a depășit nivelul favorabil culturii.

3.5. Evaluarea solului și a nutriției minerale

Componenta agrochimică este importantă deoarece sistemele hortivoltaice pot modifica indirect procesele din sol.

Schimbările de temperatură, umiditate și evaporare pot influența activitatea microbiologică, mineralizarea materiei organice și disponibilitatea elementelor nutritive. În sistemele de cultură cu intervale înierbate, aceste modificări pot influența și covorul vegetal dintre rânduri, favorizând specii mai tolerante la umbră, umiditate sau competiție redusă pentru apă.

Covorul vegetal influențează, la rândul lui, solul. Aportul de resturi organice, activitatea sistemului radicular, consumul de apă și de elemente minerale și stimularea rizosferei pot modifica proprietățile solului. De aceea, efectele SHV asupra solului nu trebuie atribuite automat numai umbririi, ci interpretate ca rezultat al interacțiunii dintre microclimat, vegetația dintre rânduri și procesele agrochimice.

Aceste interacțiuni pot influența mineralizarea materiei organice, dinamica soluției solului, disponibilitatea elementelor minerale, precum și absorbția acestora de către plante (Barron-Gafford și colab., 2019; Weselek și colab., 2019).

În platformele experimentale analizate, evaluarea solului și a stării de nutriție minerală a fost realizată prin metode standardizate de analiză a solului și de diagnostic foliară (tabelul 3.2). Analizele de sol au urmărit reacția solului, conținutul de humus și de azot total, conținuturile de fosfor și potasiu accesibil, proprietățile de schimb cationic și nivelul microelementelor accesibile plantelor.

Analiza materialului vegetal a completat aceste date prin determinarea principalelor macro- și microelemente absorbite de plantă. Însă interpretarea trebuie făcută prudent, deoarece diferențele dintre variante pot reflecta efectul panourilor, dar și heterogenitatea solului, istoricul fertilizării, umiditatea, vigoarea plantelor sau nivelul producției.

Tabelul 3.2 – Indicatori agrochimici și nutriționali utilizați în evaluarea SHV (sursa: elaborare proprie)

	Indicator	Unitate uzuală	Rol interpretativ în evaluarea SHV
	pH-ul solului	unități pH	Indică reacția solului și condiționează disponibilitatea elementelor nutritive, activitatea microbiologică și eficiența fertilizării.
	Humus / materie organică	%	Reflectă rezerva de materie organică, capacitatea de reținere a apei și potențialul de mineralizare a nutrienților.
	Azot total	%	Oferă informații despre rezerva generală de azot a solului, dar trebuie interpretat împreună cu mineralizarea, umiditatea și starea culturii.
	Fosfor accesibil	mg/kg sau ppm	Arată disponibilitatea fosforului pentru plante, importantă pentru creștere, înrădăcinare, diferențiere și formarea producției.
	Potasiu accesibil	mg/kg sau ppm	Este relevant pentru reglarea hidrică, rezistența la stres, calitatea fructelor, fermitate și acumularea zaharurilor.
	Capacitate de schimb cationic și grad de saturație în baze	cmol(+)/kg; %	Caracterizează capacitatea solului de a reține și de a furniza cationi nutritivi și stabilitatea fertilității chimice.
	Microelemente accesibile	mg/kg sau ppm	Permite identificarea unor posibile curențe sau acumulări de Fe, Mn, Zn, Cu și alte elemente cu rol fiziologic.
	Compoziția minerală a frunzelor	%; mg/kg	Integrează efectul solului, apei, microclimatului și absorbției radiculare asupra stării reale de nutriție a plantei.

Indicatorii se interpretează în raport cu varianta experimentală, anul de observație, umiditatea solului, istoricul fertilizării și nivelul producției.

3.6. Monitorizarea producției energetice

Componenta energetică a SHV se evaluează prin înregistrarea energiei electrice generate de panouri și prin raportarea acestora la radiația disponibilă, orientarea sistemului, variația sezonieră și consumurile exploatației. Într-un sistem hortivoltaic, producția de energie trebuie interpretată împreună cu funcția horticolă. O producție energetică ridicată poate fi utilă economic, dar, dacă este obținută printr-o acoperire prea densă, se poate asocia cu diminuarea excesivă a luminii disponibile plantelor sau cu îngreunarea lucrărilor horticole.

3.7. Prelucrarea, integrarea și prezentarea datelor

Datele experimentale trebuie analizate statistic pentru a separa variația naturală de efectele reale ale variantelor. În funcție de tipul datelor, pot fi utilizate statistici descriptive, analiza varianței, teste de comparație multiplă a mediilor, corelații și reprezentări grafice ale dinamicii sezoniere.

Pentru parametrii de producție și calitate sunt importante comparațiile între variante. Pentru datele microclimatice continue, interpretarea trebuie să includă nu doar mediile, ci și maximele, minimele, intervalele orare critice și perioadele de stres. Pentru datele fiziologice, momentul măsurării trebuie raportat la etapa fenologică și la condițiile meteorologice din perioada respectivă.

Interpretarea integrată nu se limitează la identificarea diferențelor semnificative. Ea urmărește explicarea lor prin mecanisme. O diferență statistică trebuie legată de posibile cauze funcționale: reducerea radiației, modificarea temperaturii aerului sau a solului, schimbarea umidității solului, răspunsul fiziologic al plantei ori efectele asupra producției și calității fructelor. Integrarea datelor nu înseamnă doar reunirea indicatorilor într-o bază comună, ci interpretarea relațiilor dintre ei. În evaluarea SHV, datele microclimatice, agrochimice, fiziologice, productive, energetice și economice trebuie analizate împreună pentru a înțelege performanța sistemului.

Elaborarea materialelor vizuale. Unele figuri explicative, scheme și tabele vizuale din ghid au fost realizate sau prelucrate cu sprijinul unor instrumente de inteligență artificială generativă. Aceste instrumente au fost utilizate exclusiv pentru concepția și realizarea grafică a materialelor vizuale. Datele, valorile, relațiile prezentate, interpretările și concluziile științifice provin din sursele citate sau din rezultatele analizate și au fost verificate de autori. Forma finală a figurilor a fost revizuită din punct de vedere științific, terminologic și editorial.

3.8. Metodologia de evaluare energetică și economică

Evaluarea energetică și economică a unui SHV trebuie să integreze atât componenta horticolă, cât și componenta energetică. Indicatorii utilizați pot include producția de energie, autoconsumul, producția raportată la puterea instalată, veniturile sau economiile generate, costurile de investiție și operare, perioada de amortizare și, acolo unde este posibil, eficiența utilizării terenului prin indicatori precum LER. Detalierea acestor indicatori este prezentată în capitolele dedicate componentei energetice și analizei economice, precum și în instrumentul practic din anexă.

3.9. Interpretarea metodologică a rezultatelor

Metodologia propusă urmărește înțelegerea funcționării SHV ca ansamblu. Rezultatul agronomic trebuie analizat împreună cu microclimatul, starea fiziologică a plantei, condițiile solului și producția de energie. O producție similară cu varianta neacoperită poate avea semnificații diferite dacă este însoțită de reducerea stresului termic, creșterea eficienței utilizării apei sau modificarea calității fructelor.

Rezultatele trebuie interpretate și în raport cu limitele experimentului: numărul anilor de monitorizare, configurația senzorilor, variabilitatea solului, condițiile climatice și imposibilitatea separării complete a unor componente energetice. De aceea, datele obținute trebuie folosite pentru recomandări prudente, nu pentru reguli universale. Această abordare este importantă pentru transferul responsabil al tehnologiei către producători. SHV pot avea potențial agronomic, energetic și economic, dar performanța lor depinde de proiectare, specie, climat, tehnologia de cultură și obiectivele exploatației (Fraunhofer ISE, 2022; Weselek și colab., 2019).

Capitolul 4.

Compatibilitatea speciilor horticole cu sistemele hortivoltaice

4.1. Compatibilitatea biologică a culturilor horticole

Compatibilitatea unei culturi horticole cu sistemele hortivoltaice se decide, în primul rând, prin răspunsul plantei la lumină, temperatură, umiditate și circulația aerului. Într-un parc fotovoltaic convențional, performanța se apreciază mai ales prin energia produsă. Într-un SHV, trebuie evaluată și cultura: poate planta să funcționeze fiziologic și productiv într-un mediu cu lumină redistribuită și microclimat modificat? Aceasta este întrebarea centrală (Aroca-Delgado și colab., 2018; Weselek și colab., 2019). Evaluarea este importantă mai ales pentru că speciile pomicele, arbuștii fructiferi, căpșunul și vița-de-vie nu au aceleași cerințe față de lumină, temperatură și umiditate. O umbră utilă pentru o specie sensibilă la arșiță poate deveni problematică pentru un soi la care lumina susține colorarea fructelor, acumularea zaharurilor, maturarea sau diferențierea mugurilor de rod (Marrou și colab., 2013; Weselek și colab., 2019).

Mai mult decât atât, pretabilitatea pentru integrarea în SHV nu se stabilește doar la nivel de specie. Trebuie privit întregul ansamblu: soi, portaltol, forma de coroană, fenologie, climatul local, orientarea panourilor, înălțimea structurii și gradul de acoperire. Nu există o specie universal „potrivită” sau „nepotrivită” pentru SHV. Există combinații mai favorabile sau mai riscante între cultură, amplasament, tehnologia de cultură și nivelul de umbră.

În practică, o cultură devine compatibilă cu SHV atunci când valorifică efectele microclimatice pozitive ale panourilor, fără ca reducerea radiației solare să limiteze fotosinteza, maturarea și calitatea comercială. Aceasta este ideea de bază a capitolului: sistemul hortivoltaic nu înseamnă simplă umbră, ci un echilibru între protecția climatică și necesarul fiziologic de lumină al culturii.

4.2. Rolul luminii în fiziologia culturilor horticole

Lumina susține fotosinteza și, prin aceasta, creșterea plantelor și formarea producției, influențând totodată acumularea zaharurilor și a compușilor aromatici, dezvoltarea colorației și, în ansamblu, calitatea fructelor. În sistemele hortivoltaice, panourile modifică atât cantitatea de lumină care ajunge la cultură, cât și distribuția acesteia în timpul zilei și în interiorul coroanei (Magarelli și colab., 2024).

Pentru plante este importantă în special radiația fotosintetic activă – PAR, corespunzătoare domeniului spectral de 400–700 nm. Intensitatea luminii primite într-un anumit moment este exprimată de regulă prin densitatea fluxului de fotoni fotosintetici – PPFD, iar cantitatea acumulată pe parcursul întregii zile prin integralul zilnic al luminii – DLI. Din acest motiv, o singură măsurare efectuată la prânz nu descrie complet regimul luminos al unei culturi (Torres și Lopez, 2010).

O reducere moderată a radiației poate fi favorabilă în perioadele foarte calde, deoarece poate limita supraîncălzirea frunzelor și fructelor, arsurile solare și pierderile de apă (figura 4.1). Dacă umbră este însă prea puternică sau persistă o perioadă îndelungată, fotosinteza și acumularea de substanță uscată pot deveni insuficiente pentru a susține producția din punct de vedere cantitativ și calitativ. Efectul final depinde de specie, soi, climă, sistemul de cultură și configurația panourilor (Magarelli și colab., 2024).

Lumina nu este distribuită uniform în coroană. Frunzele de la exterior pot fi expuse suficient radiației solare, în timp ce zonele interioare și inferioare pot rămâne mult timp în umbră. De aceea, evaluarea unui SHV nu trebuie să se limiteze la lumina măsurată deasupra plantației, ci trebuie să urmărească și modul în care aceasta pătrunde în diferite zone ale coroanei.

La speciile pomicole, reducerea persistentă a luminii poate afecta nu numai fotosinteza din anul respectiv, ci și acumularea rezervelor și susținerea producției din anul ce urmează. La afin, de exemplu, limitarea asimilării carbonului și acumularea redusă a amidonului în organele de rezervă au fost asociate cu avortarea fructelor și cu instabilitatea producției (Petridis și colab., 2018).

Nu există însă o singură valoare de „PAR optim” valabilă pentru fiecare specie. Valorile determinate la nivelul unei frunze arată cum răspunde fotosinteza la intensitatea luminii, dar nu descriu singure necesarul întregii plantații. Producția depinde de cantitatea de lumină interceptată de ansamblul coroanei pe parcursul zilei și al sezonului, precum și de modul în care aceasta este distribuită între frunze și fructe (Magarelli și colab., 2024).

Într-un sistem hortivoltaic, obiectivul nu este obținerea unei umbriri, ci reducerea excesului de radiație fără limitarea luminii necesare culturii. Din acest motiv, trebuie urmărite proporția de PAR transmisă, durata umbrelor și distribuția luminii în coroană, împreună cu producția și principalii indicatori de calitate a fructelor.

Sistemele cu panouri mobile pot permite adaptarea umbririi la momentul zilei și la condițiile meteorologice. Cultura poate fi protejată în orele cu radiație și temperatură ridicate, iar în perioadele noroase sau în etapele în care necesarul de asimilate este mai mare poate beneficia de o expunere mai bună la lumină. Literatura disponibilă arată însă că pragurile acceptabile de reducere a PAR trebuie stabilite pentru fiecare combinație dintre specie, soi, climă și configurație a sistemului (Magarelli și colab., 2024).



Figura 4.1. Relația conceptuală dintre disponibilitatea radiației fotosintetice active, răspunsul plantelor și rolul sistemelor hortivoltaice (sursa: elaborare proprie)

4.3. Umbrirea favorabilă și umbrirea excesivă

În evaluarea culturilor hortivoltaice, diferența dintre umbrirea favorabilă și umbrirea excesivă este decisivă. Reducerea moderată a radiației poate proteja planta în perioadele cu stres termic ridicat, dar reducerea prea puternică sau de lungă durată a luminii poate limita procese fiziologice esențiale (Marrou și colab., 2013; Weselek și colab., 2019).

Umbrirea favorabilă apare mai ales atunci când planta este expusă la radiație excesivă, temperaturi ridicate și deficit hidric. În aceste situații, panourile pot reduce supraîncălzirea frunzelor și fructelor, pot diminua pierderile de apă și pot contribui la menținerea unei activități fiziologice mai stabile.

Acest efect este relevant în special pentru culturile sensibile la arsuri solare sau pentru cele cultivate în regiuni cu veri foarte calde.

Studii realizate la culturi horticole și în sisteme cu umbră arată că reducerea radiației poate diminua stresul termic și riscul de arsuri solare, dar efectul asupra producției și calității depinde de specie, nivel de umbră și condițiile climatice locale (Mupambi și colab., 2018; Barron-Gafford și colab., 2019). Din această perspectivă, alegerea speciei și a soiului reprezintă o componentă importantă a proiectării unui sistem hortivoltaic.

Rezultatele obținute la cultura căpșunului arată că răspunsul plantelor la umbrirea generată de panourile fotovoltaice semitransparente poate varia în funcție de caracteristicile biologice ale soiului (Dragomir și colab., 2024).

Umbrirea excesivă apare atunci când reducerea luminii depășește capacitatea plantei de a menține fotosinteza, maturarea și atingerea parametrilor de calitate. În acest caz pot apărea o creștere vegetativă dezechilibrată, procese de inducție și diferențiere mai slabe ale mugurilor de rod, întârzierea maturării, colorarea insuficientă, reducerea acumulării zaharurilor și, uneori, creșterea presiunii bolilor din cauza umidității mai mari și a ventilației mai slabe (Mupambi și colab., 2018; Weselek și colab., 2019).

Această diferență trebuie bine înțeleasă. Un SHV bine proiectat nu transformă plantația într-un spațiu umbrat permanent; el reduce excesele climatice fără să compromită funcțiile biologice dependente de lumină. Din acest motiv, orice sistem trebuie evaluat prin raportul dintre beneficiul microclimatic obținut și riscul de limitare a luminii.

4.4. Clasificarea speciilor pomicole după compatibilitatea cu sistemele hortivoltaice

Speciile horticole pot fi încadrate orientativ în funcție de sensibilitatea la umbră și la arsuri solare, precum și de dependența lor de lumină pentru formarea calității comerciale (tabelul 4.1).

Această încadrare nu trebuie privită rigid, deoarece răspunsul culturii este influențat de soi, portaltoi, climat, sistemul de conducere, densitatea coronamentului și de configurația panourilor. Cu toate acestea, selecția inițială a culturilor destinate integrării în sisteme hortivoltaice și identificarea situațiilor care necesită prudență evidențiază un aspect practic: speciile sensibile la arșiță, dar mai puțin dependente de colorarea intensă a fructului, pot fi integrate mai ușor în SHV.

În schimb, culturile la care valoarea comercială depinde puternic de culoare, maturare uniformă și acumulare de zaharuri trebuie analizate cu mai multă atenție (Aroca-Delgado și colab., 2018; Fraunhofer ISE, 2022).

Regula care orientează integrarea în SHV este următoarea: cu cât specia este mai sensibilă la arsuri solare și mai tolerantă la lumină moderat redusă, cu atât compatibilitatea potențială este mai bună. Cu cât specia depinde mai mult de lumină pentru colorare, acumulare de zaharuri și maturare, cu atât sistemul trebuie proiectat mai prudent.

Această regulă nu înlocuiește testarea locală, dar poate ghida alegerea culturilor pentru proiecte-pilot.

Tabelul 4.1 – Compatibilitatea orientativă a unor specii horticole cu SHV
(sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

 Specie / grupă	 Potențial SHV	 Beneficii posibile	 Riscuri principale	 Observații de proiectare
 Afin	bun	reducerea stresului termic și a arsurilor solare; stabilizare microclimatică	limitarea luminii în sisteme prea dense	favorabil, cu validare locală
 Căpșun	bun	protecție față de radiație excesivă și temperaturi ridicate	reducerea luminii la umbră excesivă; efecte asupra producției timpurii	favorabil, mai ales în zone calde
 Coacăz	bun	reducerea stresului radiativ și termic; menținerea unei stări fiziologice mai stabile	risc de umiditate excesivă și ventilație insuficientă	favorabil, cu monitorizarea umidității
 Măr cu fruct roșu	moderat	protecție parțială împotriva stresului termic	colorare insuficientă; afectarea calității comerciale	condiționat de lumină și colorare
 Măr cu fruct verde/galben	moderat–bun	reducerea stresului termic, cu impact mai mic asupra colorării	reducerea luminii în configurații prea umbrite	posibil favorabil, cu prudență
 Păr	moderat	protecție microclimatică în anumite condiții	răspuns variabil în funcție de soi și sistem	condiționat de soi și obiectivul de producție
 Cireș	moderat–prudent	reducerea arsurilor solare în unele contexte	efecte asupra calității și maturării; sensibilitate la reducerea luminii	necesită prudență în proiectare
 Viță-de-vie	variabil	poate reduce stresul termic și hidric în unele sisteme	efecte importante asupra compoziției și calității strugurilor	dependent de climat și de obiectivul tehnologic
 Actinidia	bun	tolerantă mai bună la umbră și protecție față de supraîncălzire	risc de microclimat prea umed dacă ventilația este slabă	favorabil în sisteme bine ventilate
 Alun	promițător	toleranță relativ bună la umbră moderată	informații încă limitate	promițător, dar necesită validare



Notă: Evaluările sunt orientative și se bazează pe literatura de specialitate. Compatibilitatea reală depinde de specie, soi, fenofază, climat local, configurația panourilor, orientare și management.

4.5. Specii cu potențial ridicat pentru sistemele hortivoltaice

Speciile cu potențial ridicat pentru SHV sunt, în general, cele la care reducerea moderată a stresului radiativ și termic poate îmbunătăți microclimatul culturii, fără pierderi majore de producție sau calitate. În această categorie pot intra arbuștii fructiferi, căpșunul, kiwi (*Actinidia* spp.) și unele specii pomice cultivate în regiuni cu risc ridicat de arșiță. Încadrarea rămâne orientativă, deoarece răspunsul final depinde de climat, soi, sistem de conducere și nivelul real de umbră.

Arbuștii fructiferi merită evaluați în sisteme hortivoltaice deoarece au talie redusă, pot fi integrați relativ ușor sub structuri și includ specii sensibile la radiație și temperaturi ridicate. Coacăzul și agrișul preferă condiții răcoroase și pot tolera semiumbra, iar pentru coacăzul roșu sunt recomandate amplasamente cu soare dimineața, semiumbră după-amiaza și circulație bună a aerului în zonele calde (Hansen, 2019; Iowa State University Extension and Outreach, 2023).

Reducerea radiației excesive poate fi favorabilă pentru unele culturi de arbuști, dar efectul depinde de specie, soi, intensitatea umbririi și climatul local (Hermelink și colab., 2024). De aceea, în cazul coacăzului roșu, SHV reprezintă o ipoteză agronomică plauzibilă, care trebuie validată local, deoarece umbrirea prea intensă poate afecta maturarea și calitatea fructelor (Wolske și colab., 2021).

Afinul are un potențial interesant în SHV, mai ales în regiunile unde temperaturile ridicate și deficitul hidric limitează performanța culturii. Studiile asupra afinului cultivat sub plase colorate sau materiale de acoperire au arătat că nivelul și calitatea luminii pot modifica microclimatul, dezvoltarea plantelor, producția și calitatea fructelor, iar unele niveluri moderate de umbră pot fi compatibile cu menținerea producției și a calității (Lobos și colab., 2013; Matamala și colab., 2023). Totuși, în plantațiile dense sau în sistemele cu ventilație redusă trebuie urmărite atent umiditatea și riscul de boli, deoarece *Botrytis* și alte putregaiuri ale fructelor sunt favorizate de umiditatea relativă ridicată, perioadele umede și resturile florale reținute pe fructe (Pscheidt și Ocamb, 2025; Schilder, 2017).

Căpșunul poate fi compatibil cu sistemele hortivoltaice, mai ales în tehnologii unde controlul radiației, temperaturii și apei este important. Reducerea luminii poate diminua stresul hidric și termic, dar performanța culturii depinde de menținerea unui nivel suficient de lumină pentru producție, pentru acumularea de zaharuri și pentru menținerea fermității fructelor (Cordoba-Novoa și colab., 2022; Widmer și colab., 2025). Totuși, umbrirea și acoperirea modifică simultan temperatura, umiditatea și circulația aerului, iar umiditatea ridicată și ventilația slabă pot favoriza boli ale fructelor și frunzelor, precum putregaiul cenușiu. De aceea, succesul culturii sub SHV depinde de ventilație, programul de tratamente fitosanitare, managementul umidității și menținerea unei lumini suficiente pentru producție și calitate (Alhelal și colab., 2024; Penn State Extension, 2022; Pscheidt și Ocamp, 2025).

Integrarea unor specii de kiwi în sisteme hortivoltaice prezintă interes deoarece majoritatea speciilor prezintă sensibilitate la stresul termic, radiația intensă și dezechilibrele hidrice. Studiile privind atenuarea stresului provocat de perioadele de arșiță la kiwi arată că temperaturile ridicate și radiația intensă pot afecta starea fiziologică a plantei și calitatea fructelor, ceea ce justifică interesul pentru soluții de protecție climatică (Denaxa și colab., 2023). Totuși, fiind o specie viguroasă, kiwi necesită un management atent al masei vegetative pentru a evita excesul de umbrire produs atât de panouri, cât și de frunziș.

Alunul poate fi promițător în anumite configurații hortivoltaice, deoarece fructul nu depinde de colorarea vizuală intensă, iar cultura poate fi mai puțin sensibilă la unele modificări ale luminii decât speciile cultivate pentru fructe proaspete colorate. Totuși, alunul nu trebuie considerat indiferent la umbrire: reducerea luminii în coronament poate afecta înflorirea, legarea fructelor, numărul și greutatea alunelor, iar interceptarea PAR și distribuția luminii sunt importante pentru productivitate și calitatea miezului (Hampson și colab., 1996; Gutiérrez-Gamboa și colab., 2025). În aceste condiții, evaluarea alunului în SHV trebuie făcută în funcție de densitatea plantației, orientarea rândurilor, vigoare, tăieri și climat local.

4.6. Specii și soiuri sensibile la umbrire excesivă

Speciile sensibile la umbrire excesivă sunt cele la care lumina controlează direct valoarea comercială a producției. Aici, pierderea de lumină poate cântări mai mult decât beneficiul reducerii stresului termic, mai ales în climat temperat sau în ani cu radiație solară redusă.

Soiurile de măr cu fructe roșii reprezintă un exemplu important. La aceste soiuri, lumina, inclusiv PAR și radiația UV, influențează sinteza antocianilor și intensitatea colorării, astfel încât fructele mai expuse în coroană tind să aibă o colorare mai bună, dar și un risc mai mare de arsuri solare (Dussi și colab., 2005; Peavey și colab., 2024).

Plasele de protecție pot reduce arsurile solare și stresul abiotic, dar modifică microclimatul, cantitatea și calitatea luminii și pot afecta colorarea, acumularea de substanță solubilă, fermitatea, inducția florală și diferențierea mugurilor de rod și, prin urmare, capacitatea de rodire din sezonul următor, în funcție de tipul de plasă, procentul de umbrire și condițiile climatice (Mupambi și colab., 2018; Serra și colab., 2020).

Astfel, mărul nu trebuie considerat nici incompatibil, nici automat potrivit pentru SHV, ci o cultură care necesită proiectare atentă, mai ales la soiurile roșii.

Părul prezintă un răspuns variabil. La soiurile bicolore sau cu culoare de acoperire roșie, lumina influențează formarea culorii, iar umbrirea poate reduce colorarea, conținutul de substanță solubilă sau uniformitatea maturării, deși structurile hortivoltaice cu transmisie parțială a luminii pot fi compatibile în anumite condiții (Peavey și colab., 2020; Thomson și colab., 2018).

De aceea, părul trebuie evaluat în funcție de soi, nivel de transmisie a luminii, forma de coroană și climat, iar sistemele dense și fixe trebuie tratate cu prudență la soiurile cu cerințe ridicate de radiație solară pentru colorare.

Cireșul poate beneficia de protecție împotriva unor factori climatici, dar are nevoie de lumină pentru productivitate, inducție, diferențierea mugurilor și calitatea fructelor. Studiile asupra

arhitecturii coroanei arată că distribuția luminii și interceptarea PAR influențează la cireș producția și calitatea fructelor, iar sistemele de conducere sunt special alese pentru a asigura pătrunderea luminii în coroană (Scofield și colab., 2022; Zhang și colab., 2025).

În cazul acestei specii, sistemele cu umbră fixă puternică trebuie analizate cu precauție; mai potrivite pot fi soluțiile care permit o iluminare suficientă, ventilație și acces pentru tratamente și recoltare.

Vița-de-vie are un răspuns puternic dependent de obiectivul de producție. La strugurii de masă contează aspectul, uniformitatea și conținutul de zaharuri. La strugurii pentru vin, lumina și temperatura influențează maturarea, acumularea compușilor fenolici și profilul aromatic. Totuși, efectele variază în funcție de soi, intensitatea și momentul umbririi, obiectivul de producție și climat. Umbrirea poate reduce stresul termic în climat cald, dar poate întârzia maturarea, reduce acumularea zaharurilor și modifica aciditatea sau compoziția fructelor în alte condiții (Micciché și colab., 2023; Pallotti și colab., 2023).

Pentru aceste culturi, recomandarea principală este evitarea sistemelor cu umbră permanentă, densă și uniformă. Soluțiile viabile sunt cele care permit o iluminare suficientă în coroană în fazele critice pentru rodire și pentru calitatea fructelor. În acest caz, sistemele semitransparente, adaptive sau cu densitate redusă a panourilor pot fi mai adecvate decât structurile opace și fixe, dar numai după evaluare locală.

4.7. Influența soiului, portaltoiului și a formei de coroană

Compatibilitatea cu SHV nu depinde doar de specie. În interiorul aceleiași specii, soiurile pot reacționa diferit la reducerea luminii și la modificarea microclimatului.

Soiurile intens colorate, cele cu cerințe mari față de lumină sau cele cu maturare târzie pot fi mai sensibile la umbră comparativ cu soiurile mai puțin dependente de culoare. Așa cum a fost prezentat anterior, în livezile de măr, relația dintre lumină și culoarea roșie a fructelor este bine documentată, iar umbrirea trebuie controlată atent la soiurile la care culoarea este un criteriu comercial major (Reay, 2001; Mupambi și colab., 2018).

Portaltoiul influențează vigoarea, consumul de apă, dezvoltarea sistemului radicular și capacitatea plantei de a răspunde la stres. Portaltoi de vigoare redusă pot fi avantajoși în sisteme intensive, dar pot necesita o monitorizare atentă a apei și nutriției. Portaltoi mai viguroși pot susține creșteri puternice, însă în SHV pot amplifica problema umbririi prin dezvoltarea unui coronament prea dens. De asemenea, în sistemele hortivoltaice, alegerea unor portaltoi de vigoare mai mare (sau forme de coroană mai voluminoase) poate impune spații libere mai mari între coronament și panouri sau chiar structuri mai înalte. Această adaptare nu este doar o problemă agronomică. Înălțimea structurii influențează și cerințele constructive ale sistemului. Structurile mai înalte trebuie verificate în raport cu anumite condiții meteorologice precum vântul și ninsoarea, precum și din perspectiva ancorării, rigidizării și stabilității ansamblului, iar aceste cerințe pot crește semnificativ costurile de construcție și întreținere.

Forma de coroană este la fel de importantă ca materialul biologic. În livezile intensive și superintensive, formele de conducere înguste, plane sau bidimensionale pot fi mai compatibile cu SHV, deoarece permit o distribuție mai uniformă a luminii. Gardul fructifer, axul vertical, sistemele în V sau Y și coroanele simplificate pot reduce riscul de umbră cumulativă produsă simultan de panouri și de vegetație. Coroanele voluminoase, dense și slab aerisite pot, însă, să accentueze efectele negative ale umbririi. În astfel de plantații, chiar și o reducere moderată a radiației produsă de panouri poate deveni problematică dacă interiorul coroanei este deja insuficient iluminat. În plus, aceste coroane pot complica proiectarea sistemului, prin aceea că necesită spații libere mai mari, o distanță adecvată față de panouri și menținerea accesului tehnologic. În același timp, ventilația redusă poate crește durata de umezire a frunzelor și fructelor, ceea ce poate crea condiții favorabile apariției unor boli.

Prin urmare, nu se evaluează doar specia, ci întregul sistem de cultură. Un soi potrivit, altoit pe un portaltol adecvat și cu o coroană aerisită, poate fi mult mai compatibil cu sistemul hortivoltaic decât aceeași specie cultivată într-un sistem dens și slab ventilat.

4.8. Relația dintre climat, topoclimat și răspunsul biologic al culturii

Climatul regional modifică semnificativ răspunsul culturilor la SHV. În regiunile cu veri foarte calde, radiație intensă și deficit hidric, reducerea moderată a radiației poate diminua stresul termic, evapotranspirația și supraîncălzirea fructelor și frunzelor. În schimb, în regiunile mai răcoroase sau în anii cu nebulozitate ridicată, aceeași reducere a luminii poate deveni limitativă pentru procesul de fotosinteză, precum și pentru maturarea și calitatea fructelor (Barron-Gafford și colab., 2019; Weselek și colab., 2019).

Topoclimatul local poate accentua sau diminua aceste efecte. Expoziția terenului, circulația aerului, panta, acumularea aerului rece și frecvența inversiunilor termice pot influența răspunsul culturii la modificările produse de panouri.

În pomicultură, alegerea amplasamentului este esențială deoarece terenurile joase sau slab ventilate pot favoriza acumularea aerului rece și formarea zonelor cu risc de îngheț, în timp ce terenurile ușor înclinate pot permite drenajul aerului rece (Drepper și colab., 2022; Penn State Extension, 2023; Washington State University, n.d.).

De exemplu, într-un amplasament cald, bine ventilat, reducerea radiației poate fi favorabilă pentru o cultură sensibilă la arșiță. Într-o zonă mai rece, slab ventilată sau predispusă la inversiuni, aceeași reducere a luminii și a circulației aerului poate deveni problematică.

Această relație este foarte importantă pentru România și Europa Centrală și de Est, deoarece, în aceeași regiune, pot alterna episoade de arșiță, perioade umede, înghețuri târzii și diferențe topoclimatice locale, iar aceste combinații pot produce răspunsuri foarte diferite chiar între amplasamente apropiate.

Compatibilitatea unei culturi cu sistemul hortivoltaic nu trebuie stabilită doar pe baza speciei. Ea trebuie corelată cu climatul regional, topoclimatul parcelei și configurația sistemului. Literatura privind sistemele agrivoltaice arată că panourile pot modifica radiația, temperatura, umiditatea, viteza vântului și evapotranspirația, iar efectele asupra culturii trebuie interpretate în funcție de contextul local și de cerințele speciei (Weselek și colab., 2019; Weselek și colab., 2021; Jung și colab., 2024).

4.9. Principii practice pentru alegerea culturii

Alegerea culturii pentru un SHV trebuie să pornească de la problema agronomică principală constatată (tabelul 4.2). Dacă problema dominantă este arsura solară sau stresul termic, pot fi prioritare speciile sensibile la radiație excesivă și temperaturi ridicate. Dacă problema dominantă este lipsa luminii, maturarea lentă sau colorarea insuficientă, sistemul trebuie analizat cu mult mai multă prudență.

Înainte de instalarea pe suprafețe mari, este recomandată testarea pe loturi pilot și compararea permanentă cu o variantă martor neacoperită. Compararea trebuie să includă producția, dar și calitatea fructelor, culoarea, masa și calibrul fructelor, starea fitosanitară, consumul de apă și creșterea vegetativă. Ghidurile și sintezele recente privind sistemele agrivoltaice subliniază necesitatea evaluării locale și a adaptării configurației la cultură și amplasament, deoarece răspunsurile nu pot fi generalizate simplu de la o specie sau regiune la alta (Fraunhofer ISE, 2022; Weselek și colab., 2019).

Recomandarea practică este aceasta: o cultură este potrivită pentru includerea într-un sistem hortivoltaic doar dacă beneficiile microclimatice obținute prin reducerea radiației sunt mai mari decât riscurile generate de reducerea luminii. Evaluarea din tabelul 4.2 trebuie să fie de natură agronomică, fiziologică și economică, nu doar energetică.

Compatibilitatea biologică este una dintre condițiile fundamentale pentru succesul SHV. Această compatibilitate nu este determinată exclusiv de sensibilitatea speciei la reducerea intensității radiației luminoase și a duratei de expunere sau la modificarea regimului termic. Soiul, portaltolul, forma de coroană și condițiile topoclimatice pot modifica semnificativ răspunsul culturii la integrarea în sistemele fotovoltaice. Important este ca panourile să creeze un mediu în care cultura să își poată menține fotosinteza, calitatea, maturarea și echilibrul vegetativ.

*Tabelul 4.2 – Întrebări practice pentru evaluarea compatibilității unei culturi
(sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)*

Problemă de verificat	Ce indică pentru compatibilitate	Implicație pentru proiectarea SHV
 1. Cultura are frecvent arsuri solare sau stres termic vara?	Umbrirea moderată poate avea efect protector asupra frunzelor, fructelor și coronamentului.	SHV poate fi favorabil dacă reduce radiația excesivă fără să limiteze lumina utilă.
 2. Calitatea depinde puternic de lumină, de culoare sau de acumularea de zahăr.	Reducerea luminii poate afecta maturarea, culoarea și calitatea comercială.	Sunt necesare sisteme cu transmitanță adecvată, distanțare suficientă și monitorizarea luminii în coroană.
 3. Cultura este sensibilă la arșiță și deficit hidric?	Reducerea radiației poate diminua evapotranspirația și stresul termic.	SHV poate aduce beneficii, dar trebuie corelat cu irigarea și monitorizarea umidității solului.
 4. Cultura este amplasată într-o zonă rece, umedă sau cu radiație redusă?	Umbrirea suplimentară poate întârzia maturarea și reduce calitatea.	Integrarea SHV necesită prudență, configurații mai deschise și validare locală.
 5. Cultura are coronament dens sau vigoare vegetativă ridicată?	Riscul de umbră internă și ventilație slabă crește.	Sunt necesare tăieri, forme de coroană aerisite, distanțe adecvate și controlul vigorii.
 6. Cultura este sensibilă la boli favorizate de umiditate?	Umiditatea persistentă și ventilația redusă pot crește presiunea fitosanitară.	Proiectarea trebuie să asigure aerisirea, uscarea rapidă a frunzelor și monitorizare fitosanitară.
 7. Lucrările tehnologice pot fi realizate sub sau lângă structură?	Compatibilitatea nu este doar biologică, ci și operațională.	Trebuie verificate accesul utilajelor, tăierile, tratamentele, recoltarea și întreținerea solului.
 8. Există posibilitatea unui lot-pilot înainte de extindere?	Testarea locală reduce riscul de extrapolare greșită.	Se recomandă validare prin monitorizare comparativă: martor neacoperit vs. variantă SHV.



Notă: Checklistul trebuie corelat cu observațiile din teren, datele climatice locale, fenofaza culturii, solul/portaltolul, densitatea de plantare și configurația sistemului SHV.

În practică, întrebarea esențială rămâne: cultura analizată are mai mult de câștigat din protecția climatică oferită de panouri decât are de pierdut prin reducerea luminii? Răspunsul la această întrebare trebuie să stea la baza oricărei decizii de implementare hortivoltaică.

Capitolul 5.

Proiectarea și configurarea sistemelor hortivoltaice

5.1. Importanța proiectării în sistemele hortivoltaice

Proiectarea unui SHV trebuie să pornească de la problema agronomică principală: reducerea stresului radiativ și termic, creșterea autonomiei energetice, protecția culturii, integrarea irigației sau stabilizarea microclimatului. Alegerea configurației nu trebuie făcută exclusiv din perspectiva randamentului energetic, ci în funcție de modul în care structura modifică factorii de vegetație și accesul tehnologic la nivelul culturii (Dupraz și colab., 2011; Dinesh și Pearce, 2016).

Regula de proiectare

Configurația unui SHV nu se alege după producția maximă de energie, ci după problema agronomică dominantă și după răspunsul anticipat al culturii.

Acest compromis este influențat de climat, topografie, specie, soi, sistem de conducere, densitatea de plantare, tipul panourilor, înălțimea structurii și gradul de umbrire. Nu există o configurație universală pentru toate culturile. Un sistem favorabil într-un climat cald și pentru o cultură tolerantă la umbrire poate fi nepotrivit într-o zonă mai răcoroasă sau pentru o specie dependentă de lumină (Fraunhofer ISE, 2022; Weselek și colab., 2019).

În proiectarea modernă, accentul se mută de la simpla reducere a umbririi la managementul distribuției luminii. Pentru culturile horticole, nu contează doar cât se reduce lumina disponibilă, ci și când, unde și pentru cât timp apare umbra. Alternanța controlată lumină–umbră și menținerea unei cantități suficiente de radiație fotosintetic activă pot fi mai importante decât procentul mediu de umbrire (Cossu și colab., 2018; Tahir și colab., 2022; Zainali și colab., 2023; Hemming și colab., 2008; Li și colab., 2014).

5.2. Parametrii principali care trebuie stabiliți în proiectare

După definirea problemei agronomice, proiectarea trebuie să stabilească parametrii tehnici care controlează efectul sistemului asupra culturii. Cei mai importanți sunt orientarea structurii, înălțimea panourilor, distanța dintre rânduri sau module, gradul de acoperire, transparența sau opacitatea panourilor, modul de fixare sau de orientare în funcție de poziția soarelui și compatibilitatea cu lucrările tehnologice.

Acești parametri influențează atât cantitatea și distribuția radiației disponibile pentru plante, cât și producția de energie electrică și costurile structurii (Dupraz și colab., 2011; Marrou și colab., 2013; Weselek și colab., 2019) și sunt, într-o anumită măsură, interdependenți. O creștere a gradului de acoperire cu panouri poate îmbunătăți protecția împotriva radiației excesive și poate crește producția energetică, dar poate reduce lumina disponibilă pentru fotosinteză.

O structură mai înaltă poate îmbunătăți distribuția luminii și accesul utilajelor, dar crește costurile de investiție.

De aceea, proiectarea trebuie să compare mai multe scenarii și să aleagă configurația care menține echilibrul între performanța agronomică, funcția de protecție, producția energetică și fezabilitatea economică (Dinesh și Pearce, 2016; Valle și colab., 2017; Fraunhofer ISE, 2022).

Pentru culturile horticole, această etapă este esențială deoarece răspunsul plantei depinde nu doar de cantitatea totală de lumină primită, ci și de momentul zilei, durata umbririi, uniformitatea distribuției luminii în coronament și sensibilitatea organelor productive la stres radiativ sau termic. Din acest motiv, proiectarea trebuie să urmărească nu numai reducerea umbririi, ci și gestionarea

spațială și temporală a luminii în raport cu cerințele speciei, soiului și sistemului de conducere (Marrou și colab., 2013; Weselek și colab., 2019; Touil și colab., 2021).

5.3. Alegerea amplasamentului

Alegerea amplasamentului trebuie să țină cont simultan de radiația solară, topografie, expoziție, circulația aerului, riscul de îngheț, disponibilitatea apei, sol și acces tehnologic (tabelul 5.1).

Tabelul 5.1 – Factori analizați în alegerea amplasamentului pentru sistemele hortivoltaice
(sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

Categoria de analiză	Factor analizat	Rol în proiectarea sistemului	Riscuri și limitări dacă este ignorat
 A. FACTORI CLIMATICI ȘI TOPOCLIMATICI			
	Radiația solară disponibilă	Determină simultan potențialul energetic și disponibilitatea luminii pentru cultură.	Producție energetică redusă sau deficit de lumină pentru procesele fiziologice ale culturii.
	Topografia și drenajul aerului rece	Controlează circulația aerului rece, distribuția radiației și riscul de inversiune termică.	Acumulare de aer rece, îngheț radiativ și stagnare locală a aerului.
	Expunerea versantului	Condiționează temperatura locală, duratele însoririi și necesarul de umbră.	Supraîncălzire, arsuri solare sau deficit de lumină și maturare întârziată.
	Riscul climatic local	Determină vulnerabilitatea sitului la îngheț, arșiță, grindină, secetă sau vânt.	Instabilitate productivă și risc ridicat de pierderi economice.
 B. FACTORI PEDOLOGICI ȘI HIDROLOGICI			
	Solul și drenajul	Condiționează dezvoltarea rădăcinilor, traficul utilajelor și stabilitatea structurii.	Exces de umiditate, compactare, instabilitate structurală și afectarea sistemului radicular.
	Disponibilitatea apei	Determină stabilitatea producției și eficiența managementului microclimatic.	Stres hidric, reducerea creșterii și variabilitate productivă ridicată.
 C. FACTORI TEHNICI ȘI OPERAȚIONALI			
	Accesibilitatea și mecanizarea	Permite efectuarea lucrărilor horticole și întreținerea sistemului fotovoltaic.	Dificultăți operaționale, costuri ridicate și limitarea mecanizării.
	Stabilitatea terenului	Influențează siguranța și durabilitatea structurii hortivoltaice.	Tăsări, eroziune sau instabilitate a fundațiilor.
	Compatibilitatea structurii cu fluxurile de aer și relieful	Permite integrarea structurii fără blocarea drenajului aerului rece.	Amplificarea stagnării aerului rece și accentuarea riscului de îngheț.
 D. INTEGRAREA SISTEMICĂ A AMPLASAMENTULUI			
	Compatibilitatea dintre obiectivele energetice și horticole	Necesită echilibrarea producției energetice cu cerințele biologice ale culturii.	Optimizarea unei componente în detrimentul celeilalte.
	Adaptarea sistemului la contextul local	Permite proiectarea diferențiată în funcție de specie, climă și obiectivele fermei.	Aplicarea unor soluții standardizate neadaptate contextului local.
 Notă: Evaluările sunt orientative și trebuie coroborate cu date locale, observații de teren și experiența practică.			



IDEE-CHEIE

Amplasamentul influențează simultan performanța energetică, microclimatul și stabilitatea biologică a culturii. În sistemele hortivoltaice, alegerea sitului reprezintă o etapă de echilibrare între condițiile climatice, constrângerile tehnice și cerințele fiziologice ale culturii.

5.3.1. Radiația solară

Radiația solară influențează producția energetică, capacitatea fotosintetică, riscul de supraîncălzire și necesitatea de umbră. În regiunile cu radiație ridicată și veri calde, SHV pot reduce stresul radiativ și termic. În zone cu nebulozitate ridicată sau radiație limitată, reducerea suplimentară a luminii poate afecta cultura (Marrou și colab., 2013; Weselek și colab., 2019). În horticultură, analiza radiației anuale nu este suficientă. Contează distribuția sezonieră, episoadele de arșiță și perioadele fenologice critice pentru inducție florală, colorare, maturare și acumularea zaharurilor.

5.3.2. Topografia, expoziția și topoclimatul

Topografia influențează radiația, circulația aerului, drenajul, disponibilitatea apei și acumularea aerului rece. Terenurile cu pantă moderată, drenaj bun și ventilație naturală sunt, în general, mai potrivite decât zonele joase, umede sau slab ventilate (figura 5.1).



Figura 5.1 – Relația dintre topografie, circulația aerului rece și riscul de îngheț în sistemele hortivoltaice (sursa: elaborare proprie)

Expoziția influențează atât necesarul de umbrire, cât și producția energetică. Expozițiile sudice și sud-vestice pot avea risc mai mare de arșiță, ceea ce poate crește utilitatea SHV. În zonele mai reci sau mai puțin însorite, umbrirea trebuie analizată mai prudent (Weselek și colab., 2019; Marrou și colab., 2013; Gambetta și colab., 2021; Zhang și colab., 2025).

În condiții de calm atmosferic și cer senin, aerul rece se poate acumula în zonele joase, unde apar mai ușor inversiunile termice și înghețurile radiative. Înghețurile radiative sunt mai influențate de topoclimat decât înghețurile advectionale, asociate maselor de aer rece și vântului (Snyder și de Melo-Abreu, 2005; FAO, 2005; Perry, 1998; Poling, 2008). Diferența este importantă deoarece infrastructura hortivoltaică poate modifica circulația aerului mai ales în situații de îngheț radiativ (Snyder și de Melo-Abreu, 2005).

În depresiuni, funduri de vale, platouri slab ventilate sau livezi înconjurată de perdele dense, structurile fotovoltaice trebuie proiectate astfel încât să nu favorizeze stagnarea aerului rece, reducerea ventilației și persistența umidității (Snyder și de Melo-Abreu, 2005; OMAFRA, n.d.; Washington State University, n.d.; Montana State University, n.d.; Zainali și colab., 2022).

5.3.3. Caracteristicile solului

Solul influențează stabilitatea structurii, drenajul, retenția apei, dezvoltarea rădăcinilor, iar textura și starea sa fizică determină sensibilitatea la tasare și compactare. Înaintea instalării unui SHV, trebuie analizate textura, drenajul, capacitatea portantă, adâncimea utilă, nivelul apei freatice și sensibilitatea la tasare (Brady și Weil, 2016; Gregory, 2006; Washington State University, n.d.; Cornell Cooperative Extension, 2021).

Panourile pot modifica distribuția precipitațiilor și evapotranspirația. Deși suprafețele acoperite primesc mai puțină ploaie directă, apa poate fi concentrată pe liniile de scurgere ale panourilor, iar irigarea, dacă nu este adaptată, poate menține solul mai umed decât în cultura neacoperită (Elamri și colab., 2018; Marrou și colab., 2013). În plus, reducerea radiației și a evapotranspirației încetinește uscarea solului și a coronamentului (Adeh și colab., 2018; Barron-Gafford și colab., 2019; Weselek și colab., 2019).

În solurile grele sau slab drenate, sistemul trebuie proiectat pentru a evita excesul de umiditate și compactarea. În solurile ușoare și expuse secetei, reducerea evapotranspirației poate fi un avantaj, dacă lumina rămâne suficientă pentru cultură (Elamri și colab., 2018; Adeh și colab., 2018; Barron-Gafford și colab., 2019; Weselek și colab., 2019; IEA PVPS, 2025).

5.4. Configurația panourilor fotovoltaice

Configurația panourilor fotovoltaice este una dintre deciziile centrale ale proiectării. Ea stabilește relația fizică dintre infrastructura energetică și cultură.

În acest subcapitol, configurația nu se referă la tipul tehnologic al modulului, ci la modul în care panourile sunt amplasate față de plante, rânduri, spațiile de lucru și direcția de deplasare a utilajelor. Alegerea configurației influențează simultan producția de energie, distribuția luminii, accesul tehnologic, ventilația, distribuția precipitațiilor și întreținerea culturii (Dupraz și colab., 2011; Weselek și colab., 2019; Toledo și Scognamiglio, 2021).

În horticultură, configurația trebuie aleasă pornind de la cultura existentă sau planificată, nu doar de la randamentul energetic al panourilor. O plantație cu rânduri înalte, lucrări mecanizate și recoltare manuală are cerințe diferite față de o cultură joasă sau față de o seră.

O cultură sensibilă la arșiță, dar moderat tolerantă la umbră, poate beneficia de protecție în orele critice, dar o specie sensibilă la reducerea luminii poate necesita panouri mai distanțate, semitransparente sau dispuse astfel încât să nu producă umbră persistentă (Marrou și colab., 2013; Weselek și colab., 2019).

Principalele familii de configurații constructive și riscurile care trebuie verificate sunt sintetizate în figura 5.2.

O primă categorie practică de configurații este reprezentată de panourile amplasate deasupra culturii sau deasupra rândurilor. Aceste configurații pot proteja direct plantele de radiație excesivă, temperaturi ridicate, arsuri solare și, în anumite cazuri, de precipitații intense sau grindină (Weselek și colab., 2019; Fraunhofer ISE, 2024; Magarelli și colab., 2024). Ele sunt relevante pentru cultura câpșunului (Dragomir și colab., 2024), livezi, arbuști fructiferi, viță-de-vie, culturi protejate sau sisteme intensive, dar necesită structuri mai înalte, adaptate cerințelor biologice ale speciilor și lucrărilor tehnologice specifice și implică nu numai costuri constructive mai mari, ci și verificarea atentă a luminii disponibile în coronament (Fraunhofer ISE, 2024; Magarelli și colab., 2024; Zainali și colab., 2023). Dacă acoperirea este prea densă sau prea joasă, pot apărea zone cu lumină insuficientă, ventilație slabă și uscăre lentă a frunzelor și fructelor după episoadele precipitații (Marrou și colab., 2013; Tahir și colab., 2022; Zainali și colab., 2023).

Alegerea configurației influențează simultan lumina, accesul tehnologic, ventilația, apa și producția de energie.

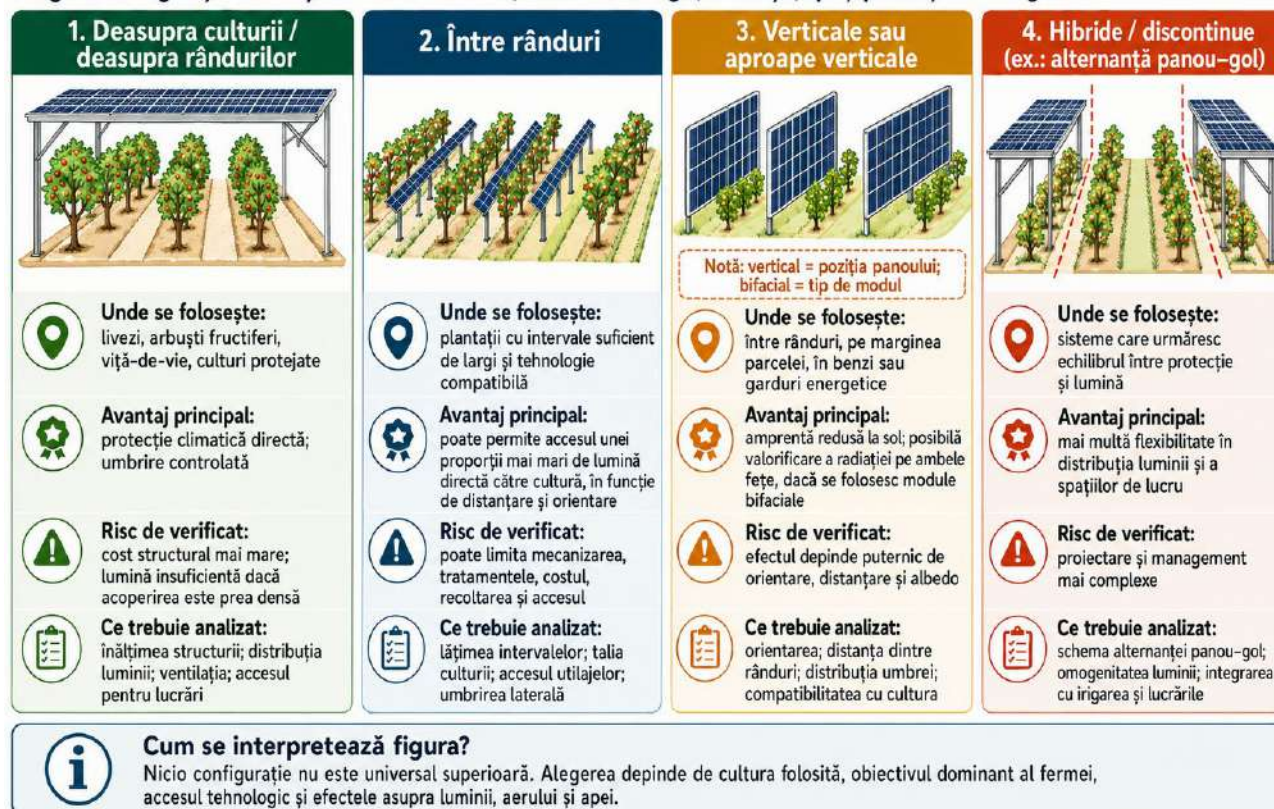


Figura 5.2 – Configurații constructive ale sistemelor hortivoltaice (sursa: elaborare proprie)

O a doua categorie este reprezentată de panourile amplasate între rânduri. Soluția poate fi potrivită numai acolo unde distanța dintre rânduri permite integrarea infrastructurii fără blocarea circulației, reducerea excesivă a suprafeței utile sau afectarea lucrărilor agricole (Weselek și colab., 2019; Toledo și Scognamiglio, 2021; IEA PVPS, 2025). Utilizarea intervalelor dintre rânduri nu este un avantaj automat: ea trebuie verificată în raport cu mecanizarea, tratamentele, cositul, recoltarea, irigarea, întreținerea solului și accesul personalului (Riaz și colab., 2019; Toledo și Scognamiglio, 2021; Hickey, 2024). În anumite situații, panourile între rânduri pot permite accesul unei proporții mai mari de lumină directă către cultură, dar pot crea și obstacole tehnologice, umbră laterală sau dificultăți de întreținere (Campana și colab., 2021; Zainali și colab., 2023; IEA PVPS, 2025).

O a treia categorie este reprezentată de configurațiile verticale sau aproape verticale, care pot fi amplasate între rânduri, pe marginea parcelei, în benzi sau pe structuri independente. În aceste sisteme pot fi utilizate module monofaciale sau bifaciale („bifacial” descrie capacitatea modulului de a capta radiație pe ambele fețe). Modulele bifaciale pot fi utile în configurații unde fața posterioară primește radiație reflectată sau difuză (Guerrero-Lemus și colab., 2016; Riaz și colab., 2019).

Configurațiile verticale pot avea avantaje în anumite condiții, prin amprenta redusă la sol, integrare în benzi sau garduri energetice și o distribuție diferită a umbrei pe parcursul zilei (Riaz și colab., 2019; Riaz și colab., 2021; Zainali și colab., 2023; IEA PVPS, 2025). Totuși, ele nu sunt universal superioare. Efectul asupra culturii depinde de orientarea panourilor, distanța dintre module, înălțimea structurii, albedo, talia culturii și momentul zilei în care apare umbrirea (Campana și colab., 2021; Niazi și Victoria, 2023).

Pe lângă aceste categorii, pot exista configurații hibride sau discontinue: panouri deasupra unor rânduri și spații deschise între ele, structuri în două ape, benzi fotovoltaice alternante cu zone neacoperite, module dispuse pe marginea parcelei sau combinații între panouri opace și semitransparente (Dupraz și colab., 2011; Dinesh și Pearce, 2016; Toledo și Scognamiglio, 2021; Weselek și colab., 2019; Zainali și colab., 2023; IEA PVPS, 2025). Aceste variante pot fi utile atunci când se urmărește echilibrarea producției energetice cu menținerea luminii, ventilației și accesului tehnologic (Toledo și Scognamiglio, 2021; Weselek și colab., 2019; Zainali și colab., 2023; IEA PVPS, 2025).

Alegerea configurației se poate verifica prin câteva întrebări simple: ce problemă trebuie să rezolve sistemul, dacă poziția panourilor permite menținerea lucrărilor agricole, cum sunt distribuite lumina, aerul și precipitațiile la nivelul culturii și în ce măsură beneficiile energetice justifică riscurile agronomice și costurile de exploatare. O configurație potrivită nu este cea mai densă sau cea mai eficientă energetic în mod izolat, ci cea care funcționează împreună cu biologia culturii și cu tehnologia de cultură.

5.5. Orientarea panourilor fotovoltaice

Orientarea panourilor fotovoltaice este o decizie de proiectare diferită de configurația constructivă. Configurația stabilește unde sunt amplasate panourile în raport cu plantele și rândurile de cultură, iar orientarea stabilește direcția și unghiul sub care acestea interceptează radiația solară. Într-un SHV, orientarea trebuie evaluată nu doar prin producția de energie, ci și prin traseul umbrei, durata umbririi, distribuția luminii în coronament, temperatura culturii și uniformitatea maturării (Dupraz și colab., 2011; Marrou și colab., 2013; Weselek și colab., 2019).

În emisfera nordică, panourile orientate spre sud sunt utilizate frecvent pentru captarea radiației solare și pentru producție energetică ridicată (Fraunhofer ISE, 2024; IEA PVPS, 2025). Într-un sistem hortivoltaic, această orientare trebuie analizată și agronomic: în funcție de înclinarea panourilor, înălțimea structurii și distanța dintre rânduri, umbra poate fi mai concentrată în anumite zone și intervale ale zilei (Dupraz și colab., 2011; Marrou și colab., 2013; Tahir și colab., 2022; Zainali și colab., 2023). Această neuniformitate poate influența lumina disponibilă pentru fotosinteză, colorarea fructelor, acumularea zaharurilor și ritmul de maturare (Hemming și colab., 2008; Li și colab., 2014; Gambetta și colab., 2021; Magarelli și colab., 2024).

Orientările est-vest sau configurațiile în două ape pot produce o distribuție diferită a umbrei pe parcursul zilei. În anumite situații, ele pot favoriza o alternanță mai echilibrată între lumină și umbră și pot reduce contrastele termice, dar efectul depinde de latitudine, sezon, unghiul panourilor, densitatea modulelor, distanța dintre rânduri și sistemul de cultură (Marrou și colab., 2013; Fraunhofer ISE, 2022). Din acest motiv, orientarea est-vest nu trebuie prezentată ca soluție universală, ci ca variantă de proiectare care trebuie verificată pentru fiecare cultură și amplasament.

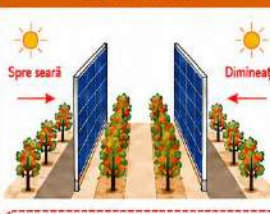
În sistemele verticale, orientarea capătă o semnificație particulară. Panourile verticale pot modifica distribuția umbrei în spațiul dintre rânduri și pot fi asociate cu module bifaciale, dacă geometria permite iluminarea feței posterioare. În acest caz, orientarea trebuie analizată împreună cu distanțarea dintre rândurile de module, albedo-ul solului, înălțimea panourilor, talia culturii și accesul tehnologic (Guerrero-Lemus și colab., 2016; Riaz și colab., 2019; Campana și colab., 2021).

Sistemele cu tracking (cu mecanisme care pot modifica orientarea panourilor solare) și cele adaptive introduc o logică diferită de orientare. Trackingul urmărește în principal poziția soarelui și optimizarea energetică, în timp ce sistemele adaptive pot ajusta poziția panourilor și în funcție de

cerințele culturii, radiație, temperatură, vânt sau obiective de protecție microclimatică (Tahir și colab., 2022; Riaz și colab., 2021; Bruno și colab., 2025; Zhang și colab., 2025; Lama și colab., 2024).

Această distincție este importantă. Un sistem mobil nu este automat agronomic superior; utilitatea lui depinde de capacitatea de control, costuri, mentenanță și valoarea culturii (Toledo și Scognamiglio, 2021; Fraunhofer ISE, 2022). Figura 5.3 sintetizează principalele strategii de orientare și control și riscurile care trebuie evaluate pentru fiecare.

Orientarea și modul de control influențează traseul umbrei, distribuția luminii, producția de energie și compatibilitatea cu cerințele culturii.

1. Orientare sudică	2. Est-vest / două ape	3. Verticală	4. Tracking / adaptativ
			
Miazăzi – umbră concentrată	Umbră distribuită pe parcursul zilei	Notă: vertical = poziția panoului; poate utiliza module monofaciale sau bifaciale!	Tracking = urmărește soarele; adaptativ = poate răspunde și nevoilor culturii
Profilul umbrei: umbră mai concentrată în jurul intervalelor cu radiație maximă	Profilul umbrei: umbră se distribuie mai mult între dimineață și după-amiază	Profilul umbrei: umbra se deplasează lateral și depinde mult de orientare	Profilul umbrei: umbra se poate modifica controlat în funcție de poziția panourilor
Efect energetic principal: favorizează producția energetică anuală ridicată	Efect energetic principal: poate distribui mai uniform producția energetică în timpul zilei	Efect energetic principal: poate valorifica bine radiația dimineații și după-amiezii	Efect energetic principal: poate crește flexibilitatea controlului și, uneori, producția
Posibil avantaj agronomic: poate reduce stresul radiativ și termic în orele critice	Posibil avantaj agronomic: poate favoriza o alternanță mai echilibrată lumină-umbră	Posibil avantaj agronomic: amprentă redusă la sol; integrare posibilă în benzi sau între rânduri	Posibil avantaj agronomic: permite reglarea protecției în funcție de radiație și stres
Risc de verificat: poate crea neuniformitate a luminii în cultură	Risc de verificat: efectul depinde de geometria structurii și de cultură	Risc de verificat: efecte foarte dependente de orientare, distanțare și albedo	Risc de verificat: cost, complexitate și necesar mai mare de mentenanță
Ce trebuie analizat: înclinarea; înălțimea; distanțarea; distribuția luminii în coroanent	Ce trebuie analizat: unghiul panourilor; înălțimea structurii; omogenitatea luminii	Ce trebuie analizat: direcția rândurilor; distanța dintre module; compatibilitatea cu cultura	Ce trebuie analizat: obiectivul fermei; ferestrele critice de protecție; costurile de exploatare

Cum se interpretează figura?
Nicio orientare nu este universal superioară. Alegerea depinde de specie, climă, fenofază, obiectivul dominant al fermei și efectele asupra luminii, aerului, apei și lucrărilor agricole.

Figura 5.3 – Strategii de orientare și control al panourilor fotovoltaice în sistemele hortivoltaice (sursa: elaborare proprie)

Alegerea orientării trebuie făcută prin raportare la orele critice pentru cultură. În zonele și anii cu risc ridicat de arșiță, protecția în intervalele orare cu radiație maximă poate fi prioritară. În schimb, în zone cu radiație mai redusă, în culturi dense sau la specii sensibile la deficit de lumină, o orientare care reduce prea mult lumina poate afecta fotosinteza, inducția florală, acumularea zaharurilor sau maturarea fructelor. Orientarea corectă este aceea care menține un compromis funcțional între energia produsă, protecția culturii, uniformitatea luminii și compatibilitatea cu lucrările tehnologice.

5.6. Înălțimea structurilor și distanțarea panourilor

Înălțimea structurilor și distanțarea panourilor controlează spațiul funcțional dintre infrastructura fotovoltaică și cultură. Aceste două variabile influențează simultan distribuția radiației, circulația aerului, accesul tehnologic, distribuția precipitațiilor și costul structural al sistemului (Dupraz și colab., 2011; Toledo și Scognamiglio, 2021; Fraunhofer ISE, 2022).

Înălțimea structurii nu trebuie aleasă doar pentru trecerea utilajelor, deși acesta este un criteriu practic esențial (figura 5.4). Structurile prea joase pot accentua umbrirea, pot reduce aerisirea coronamentului și pot limita lucrările agricole, mai ales în plantațiile cu talie mare sau cu mecanizare. Structurile mai înalte pot îmbunătăți accesul, distribuția luminii și ventilația, dar implică fundații mai

robuste, costuri mai mari și cerințe structurale sporite pentru a face față vântului sau depunerii de zăpadă (Fraunhofer ISE, 2022; Weselek și colab., 2019).

Distanțarea panourilor este la fel de importantă. Panourile foarte dense pot crește producția energetică pe unitatea de suprafață, dar pot reduce lumina disponibilă pentru cultură și pot crea zone cu umbră persistentă. Panourile mai distanțate, golurile dintre module sau grupurile discontinue pot îmbunătăți pătrunderea luminii și alternanța lumină-umbră, dar reduc suprafața fotovoltaică instalată. Prin urmare, distanțarea trebuie tratată ca un compromis între producția de energie, cerințele de lumină ale culturii și omogenitatea microclimatului (Marrou și colab., 2013; Dinesh și Pearce, 2016).

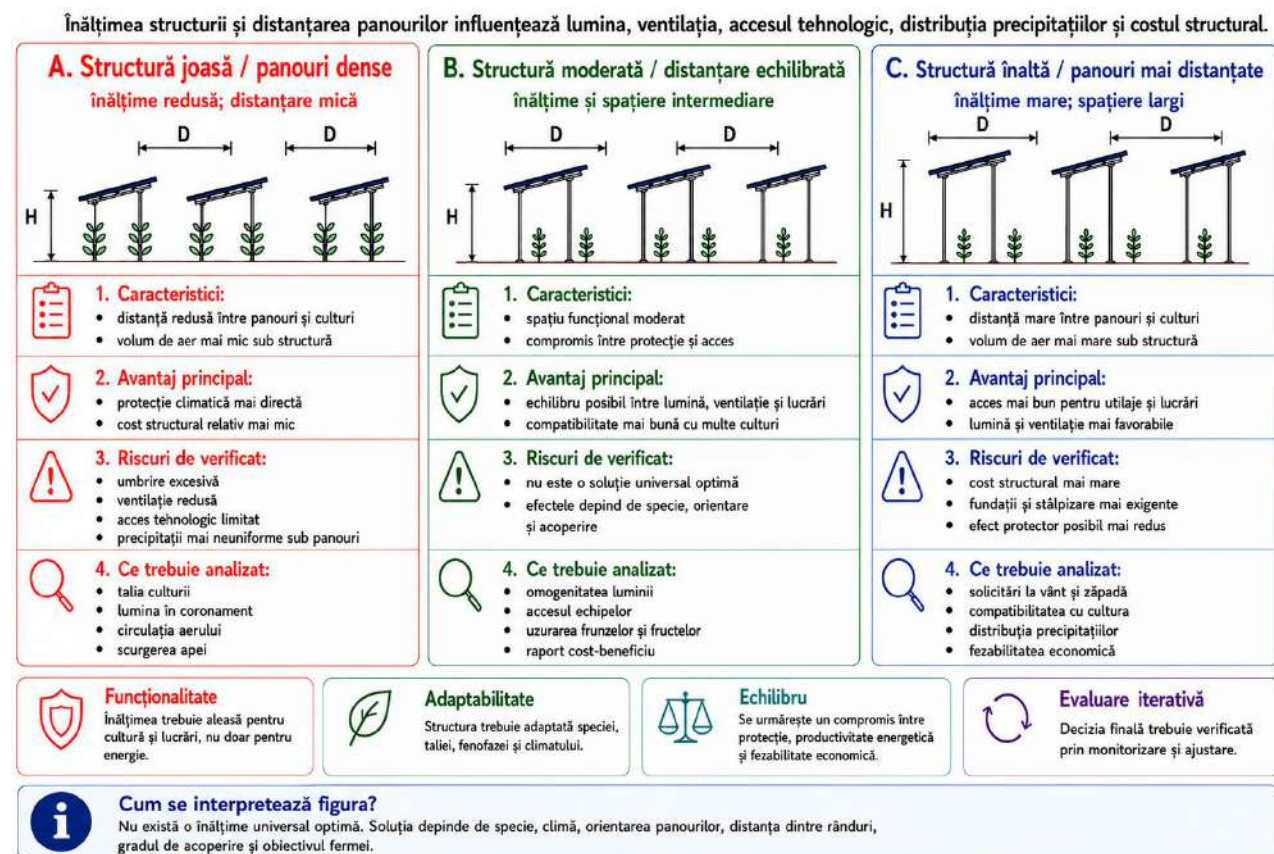


Figura 5.4 – Rolul înălțimii și distanțării panourilor în funcționarea sistemelor hortivoltaice (sursa: elaborare proprie)

Înălțimea și distanțarea influențează și ventilația. O acoperire joasă și compactă poate reduce circulația aerului, ceea ce poate fi favorabil în perioade calde și uscate, dar problematic în condiții umede, când uscarea frunzelor și fructelor este întârziată. De aceea, spațiul util sub panouri și golurile dintre module trebuie să permită atât accesul fizic, cât și aerisirea suficientă a culturii (Adeh și colab., 2018; Zainali și colab., 2023).

Un alt aspect este distribuția precipitațiilor. Panourile pot intercepta apa de ploaie și o pot concentra la marginea modulelor, creând zone mai uscate sub panouri și zone cu aport concentrat de apă (Elamri și colab., 2018; Cook și McCuen, 2013; Baiamonte și colab., 2023). Dacă precipitațiile efective nu ajung uniform în zona radiculară, beneficiul reducerii evapotranspirației poate fi diminuat prin creșterea dependenței de irigare (Elamri și colab., 2018).

În practică, înălțimea și distanțarea trebuie stabilite în funcție de talia culturii, forma de coroană, lucrările tehnologice, tipul utilajelor, necesarul de lumină, ventilație și apă, precum și costurile structurale.

Structurile joase și dense pot reduce costurile constructive și pot crește densitatea de instalare a panourilor (Horowitz și colab., 2020; Fraunhofer ISE, 2020; IEA PVPS, 2025), dar pot

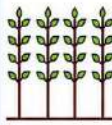
crește riscul de umbrire excesivă, ventilație slabă și acces dificil. Structurile înalte sau mai distanțate pot fi mai compatibile cu horticultura, dar au costuri și cerințe constructive mai mari (Fraunhofer ISE, 2024; Magarelli și colab., 2024; IEA PVPS, 2025). Soluția potrivită este cea care asigură protecție, lumină suficientă, aerisire, acces tehnologic, alimentare cu apă și fezabilitate economică.

5.7. Efectele configurației constructive asupra luminii, aerului și apei

După stabilirea amplasamentului, a configurației, a orientării și a înălțimii, precum și a distanțării panourilor, proiectarea unui sistem hortivoltaic trebuie verificată prin efectele produse la nivelul culturii. Într-un SHV, panourile nu modifică doar cantitatea totală de radiație, ci și distribuția spațială și temporală a luminii, circulația aerului, uscarea frunzelor și a fructelor, precum și modul în care apa din precipitații ajunge la sol și în zona radiculară (Marrou și colab., 2013; Adeg și colab., 2018; Elamri și colab., 2018).

Obiectivul proiectării nu este reducerea maximă a radiației solare, ci distribuirea ei într-un mod compatibil cu cerințele culturii. Nu este suficient să se calculeze un procent mediu de umbrire. Trebuie analizat când, unde și cât timp este umbrită cultura. Aceeași valoare medie a radiației poate avea efecte diferite dacă umbra este uniformă, mobilă, concentrată în anumite ore sau distribuită neuniform între rânduri și în coronament (Marrou și colab., 2013; Dupraz și colab., 2011). În pomicultură, heterogenitatea excesivă a luminii poate produce maturare neuniformă, diferențe de colorare, dezechilibre vegetative și variabilitate a calității fructelor. Efectul unei configurații trebuie evaluat în raport cu forma plantei, înălțimea coronamentului, densitatea rândului și poziția organelor productive. Tabelul 5.2 sintetizează orientativ riscul de reducere a luminii pentru diferite arhitecturi horticole.

Tabelul 5.2 – Sistemul de cultură, forma de coroană și riscul de reducere a luminii în SHV
(sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

ARHITECTURA CULTURII	A. CONFIGURAȚIE CU UMBRIRE PARȚIALĂ (structură înaltă, distanțare mare, GAT redus*, umbrire parțială)	B. CONFIGURAȚIE INTERMEDIARĂ (structură și distanțare moderate, GAT mediu*, umbrire moderată)	C. CONFIGURAȚIE CU UMBRIRE INTENSĂ (structură joasă, GAT ridicat*, umbrire intensă)
 AX FUS SUBȚIRE	✓ Compatibilitate ridicată. Pătrundere bună a luminii în coronament; compatibil cu rânduri înguste și lucrări mecanizate.	● Distribuție relativ echilibrată, dar necesită controlul umbrei în zona mediană și inferioară a coroanei.	⚠ Risc de umbrire excesivă în interiorul coroanei; posibilă reducere a diferențierii mugurilor și a colorării fructelor.
 GARD FRUCTIFER / SISTEM BIDIMENSIONAL	✓ Compatibilitate bună, mai ales dacă planul de fructificare este bine orientat față de panouri.	● Poate funcționa bine, dar necesită corelarea orientării rândurilor cu direcția umbrei.	⚠ Risc de umbrire continuă pe o parte a peretelui fructifer; necesită prudență.
 ARBUȘTI FRUCTIFERI	✓ Pătrundere bună a luminii; efect favorabil în zone cu stres radiativ ridicat.	● Variantă adesea compatibilă, mai ales pentru specii cu toleranță moderată la umbră.	⚠ Poate fi acceptabilă doar pentru specii/cultivare tolerante; risc de reducere a acumulării zaharurilor și a maturării uniforme.
 CĂPȘUN (CULTURI JOASE) <i>Exemplu orientativ: căpșun.</i>	✓ Umbră parțială, posibil favorabilă în perioade calde; lumina încă suficientă la nivelul frunzelor.	● Necesită verificarea transmisiei luminii și a duratei zilnice de umbră.	⚠ Risc crescut de umbră insuficientă, umiditate mai ridicată și presiune fitosanitară crescută.
PRINCIPII GENERALE  Arhitecturile înguste și transparente valorifică mai eficient lumina disponibilă în sistemele hortivoltice.  Compatibilitatea depinde simultan de specie, arhitectura culturii și configurația sistemului.  Reducerea excesivă a luminii poate afecta diferențierea mugurilor, colorarea fructelor și maturarea.  Evaluarea trebuie realizată împreună cu orientarea panourilor, înălțimea structurii și gradul de acoperire (GAT).			

*GAT = gradul de acoperire a terenului cu panouri, exprimând proporția suprafeței de teren ocupată, în proiectie, de panourile fotovoltaice.

Configurația constructivă influențează și circulația aerului. Structurile joase, dense sau continue pot reduce viteza vântului și turbulența la nivelul culturii, mai ales în culturi cu coronament dens sau în amplasamente slab ventilate (Adeh și colab., 2018; Weselek și colab., 2021; Jung și colab., 2023; Zainali și colab., 2022). Acest efect poate fi util în perioade calde și uscate, prin reducerea deshidratării, dar poate deveni nefavorabil în zone umede, unde riscul fitosanitar crește (Adeh și colab., 2018; Jung și colab., 2023).

Un alt efect important este modificarea distribuției precipitațiilor. Panourile pot intercepta o parte din ploaie și pot redistribui apa către marginea modulelor, generând zone mai uscate sub panouri și zone cu aport concentrat la liniile de scurgere (Elamri și colab., 2018; Marrou și colab., 2013; Baïamonte și colab., 2023). Astfel, relevant pentru cultură nu este doar cantitatea totală de precipitații căzută pe amplasament, ci și cantitatea de apă care ajunge efectiv în zona radiculară (Elamri și colab., 2018).

Ca urmare, proiectarea SHV trebuie să coreleze distribuția luminii, ventilația și apa disponibilă pentru cultură. O configurație corectă nu maximizează separat producția de energie sau gradul de umbră. Ea menține un echilibru funcțional între protecția culturii, fotosinteză, aerisirea coronamentului, accesul tehnologic și alimentarea cu apă (Dupraz și colab., 2011; Dinesh și Pearce, 2016; Weselek și colab., 2019).

5.8. Alegerea tipului de modul în funcție de cultură și obiectivul proiectării

Alegerea tipului de modul fotovoltaic este o decizie de proiectare care trebuie corelată cu cerințele culturii, obiectivul dominant al SHV și efectele asupra luminii, microclimatului și lucrărilor horticole. Într-un sistem hortivoltaic, modulul nu trebuie ales doar după eficiența energetică, ci și după modul în care influențează lumina disponibilă pentru plante, distribuția umbrei, integrarea în structură și riscurile agronomice asociate (Dupraz și colab., 2011; Marrou și colab., 2013; Weselek și colab., 2019).

În sistemele hortivoltaice pot fi utilizate module opace monofaciale, module bifaciale, module semitransparente și module cu transmisie spectrală selectivă. Aceste categorii descriu caracteristici ale modulului, nu poziția lui în plantație. De exemplu, „bifacial” nu înseamnă automat „vertical”, iar un panou semitr transparent nu definește singur configurația sistemului. Poziția panourilor, orientarea, înălțimea, distanțarea și gradul de acoperire rămân decizii constructive separate.

Modulele opace monofaciale pot fi potrivite atunci când se urmărește o producție energetică ridicată sau o protecție puternică împotriva radiației excesive, dar trebuie utilizate prudent la speciile sensibile la reducerea luminii (Dinesh și Pearce, 2016; Weselek și colab., 2019; Gorjian și colab., 2022; Magarelli și colab., 2024; IEA PVPS, 2025). Modulele semitransparente sau cu celule distanțate pot permite pătrunderea unei cantități mai mari de lumină către cultură și pot fi utile în sisteme în care fotosinteza, maturarea și calitatea fructelor depind de menținerea unui nivel adecvat de lumină.

Modulele bifaciale au în primul rând un avantaj energetic posibil, prin captarea radiației pe ambele fețe, dar numai dacă geometria sistemului permite iluminarea feței posterioare. Acestea nu cresc automat lumina directă disponibilă pentru cultură (Guerrero-Lemus și colab., 2016; Riaz și colab., 2019).

Modulele cu transmisie spectrală selectivă reprezintă o direcție mai specializată, cu potențial de optimizare a luminii utile pentru plante și a producției energetice (Loik și colab., 2017; Stallknecht și colab., 2023; Lu și colab., 2024). Totuși, aceste soluții trebuie prezentate prudent, deoarece multe aplicații horticole sunt încă în dezvoltare sau validare pentru specii și sisteme de cultură specifice (Gorjian și colab., 2022; Zotti și colab., 2024; Lu și colab., 2024; Thomas și colab., 2026).

Alegerea modulului trebuie făcută în raport cu problema pe care sistemul trebuie să o rezolve: producție de energie, protecție împotriva arșiței, menținerea luminii pentru cultură, protecție climatică

sau testarea unor soluții specializate pentru culturi de valoare ridicată. În practică, modulul trebuie evaluat împreună cu forma de coroană, talia plantelor, poziția organelor productive, perioada critică de lumină și tehnologia de întreținere.

Alegerea corectă nu înseamnă selectarea celui mai performant panou din punct de vedere energetic, ci a soluției celei mai compatibile cu sistemul horticol în ansamblu.

5.9. Integrarea sistemelor hortivoltaice cu tehnologia de cultură pomicolă

Un SHV trebuie să fie compatibil cu întreaga tehnologie de cultură: tăieri, tratamente fitosanitare, mecanizare, irigare, fertirigare, monitorizare și recoltare. Infrastructura energetică introdusă fără adaptarea tehnologiei poate crea dificultăți operaționale, chiar dacă funcționează bine din punct de vedere energetic (Weselek și colab., 2019; Toledo și Scognamiglio, 2021; Hickey, 2024; IEA PVPS, 2025).

Accesul utilajelor, poziția liniilor de irigare, amplasarea senzorilor, traseele cablurilor și elementele structurale trebuie proiectate simultan. Stâlpii nu trebuie să blocheze traseele de lucru, iar înălțimea structurii trebuie să permită accesul echipamentelor utilizate în fermă.

Integrarea tehnologică trebuie prevăzută din faza de proiectare, dar dimensionarea echipamentelor de monitorizare, irigare, fertirigare și automatizare este tratată în capitolele dedicate tehnologiilor și managementului culturii. În acest punct, criteriul principal este ca infrastructura SHV să nu blocheze lucrările horticole și să permită ajustarea ulterioară a managementului (Toledo și Scognamiglio, 2021; Weselek și colab., 2019; IEA PVPS, 2025).

5.10. Considerații structurale și de rezistență

Structurile hortivoltaice trebuie proiectate pentru a rezista la vânt, zăpadă, variații termice, impactului grindinei și altor solicitări mecanice (CEN, 2003, 2005a, 2005b; IEC, 2023). În horticultură trebuie luate în calcul și accesul utilajelor, vibrațiile, umiditatea, coroziunea și riscul de lovire accidentală (Hickey, 2024; IEA PVPS, 2025). Fundațiile trebuie adaptate tipului de sol și capacității portante (CEN, 2004; Brady și Weil, 2016), precum și obiectivului SHV.

Costurile structurale reprezintă una dintre principalele limitări ale SHV, mai ales în livezi, unde structurile trebuie să fie suficient de înalte. Proiectarea structurală trebuie realizată de specialiști și corelată cu normele tehnice privind acțiunea vântului și a zăpezii, precum și cu încărcările structurale (CEN, 2005a, 2005b).

În zonele cu grindină, cu zăpadă umedă, vânturi puternice sau fenomene extreme, structura trebuie dimensionată pentru condițiile locale. O structură SHV nu trebuie improvizată și nu trebuie proiectată doar după criterii energetice sau doar agricole.

5.11. Compromisul dintre eficiența energetică și compatibilitatea agricolă

Provocarea principală a proiectării SHV este găsirea compromisului dintre producția energetică și performanța horticulturii. Densitatea mare a panourilor favorizează energia, dar reduce lumina pentru cultură. Densitatea redusă favorizează cultura, dar scade capacitatea energetică instalată (Dupraz și colab., 2011; Dinesh și Pearce, 2016).

În horticultură, relația este complexă deoarece trebuie menținute producția, calitatea comercială, colorarea, maturarea și accesul tehnologic. Reducerea moderată a radiației poate diminua pierderile climatice și poate crește procentul de fructe comerciale, dar o reducere excesivă poate afecta calitatea fructelor. Performanța sistemului trebuie evaluată integrat: energie produsă, stabilitatea producției, calitatea comercială, consumul de apă, riscurile climatice, costurile structurale și fezabilitatea economică.

5.12. Perspective de dezvoltare în proiectarea sistemelor hortivoltaice

Direcțiile moderne în proiectarea SHV includ sisteme adaptive cu tracking, panouri semitransparente, tehnologii cu transmisie spectrală selectivă, modelare radiativă, simulări microclimatice și integrarea senzorilor (Tahir și colab., 2022; Gorjian și colab., 2022; Zainali și colab., 2023; Loik și colab., 2017; Lu și colab., 2024; IEA PVPS, 2025). Acestea pot îmbunătăți proiectarea SHV, dar trebuie prezentate ca instrumente de optimizare, nu ca soluții universal aplicabile (Weselek și colab., 2019; Toledo și Scognamiglio, 2021; Zhang și colab., 2025).

Modelele radiative și simulările microclimatice pot ajuta la estimarea distribuției luminii înainte de instalare și la compararea configurațiilor constructive. Totuși, modelele trebuie validate prin date locale, deoarece răspunsul culturii depinde de specie, fenologie, sol, climat și management (Toledo și Scognamiglio, 2021; Fraunhofer ISE, 2022).

Pe termen lung, proiectarea hortivoltaică va integra tot mai mult modelarea climatică, agricultura de precizie și managementul energetic inteligent. Aceste tehnologii trebuie integrate în funcție de dimensiunea exploatației horticole, valoarea culturii și capacitatea de utilizare a datelor. Componentele lor tehnice sunt detaliate în capitolul 6.

Capitolul 6.

Tehnologii și echipamente utilizate în sistemele hortivoltaice

6.1. Rolul tehnologiilor în implementarea sistemelor hortivoltaice

Dezvoltarea sistemelor hortivoltaice este legată direct de progresul modulelor fotovoltaice, al agriculturii de precizie și al sistemelor de monitorizare, control și modelare. Aceste tehnologii permit colectarea datelor din teren, interpretarea lor și ajustarea unor intervenții tehnologice. Într-un SHV, tehnologia nu se judecă doar prin energia produsă, ci și prin compatibilitatea cu biologia culturii, distribuția luminii, accesul la lucrările horticole și capacitatea de monitorizare a microclimatului (Weselek și colab., 2019; Fraunhofer ISE, 2022).

În horticultură, alegerea tehnologiilor trebuie să pornească de la cultura integrată și de la problema agronomică urmărită: reducerea stresului radiativ, controlul temperaturii, economia de apă, protecția fructelor, creșterea autonomiei energetice sau monitorizarea mai precisă a plantației (Weselek și colab., 2019; Toledo și Scognamiglio, 2021; IEA PVPS, 2025). Un sistem performant energetic poate fi nepotrivit dacă reduce excesiv lumina, îngreunează mecanizarea, complică irigarea sau crește riscul fitosanitar (Gorjian și colab., 2022; Toledo și Scognamiglio, 2021; IEA PVPS, 2025).

De aceea, modulele, structurile, senzorii, sistemele de control, irigarea și managementul energetic trebuie gândite împreună. Ele formează o infrastructură integrată, adaptată culturii și condițiilor locale (Weselek și colab., 2019; Toledo și Scognamiglio, 2021; IEA PVPS, 2025).

6.2. Module fotovoltaice utilizate în horticultură

Modulele fotovoltaice reprezintă componenta energetică principală a sistemelor hortivoltaice. Din punct de vedere tehnologic, în horticultură pot fi utilizate module opace monofaciale, module cu celule distanțate, module semitransparente, module bifaciale și, în aplicații aflate încă în dezvoltare sau validare, module cu transmisie spectrală selectivă (tabelul 6.1). Alegerea lor agronomică a fost discutată în Capitolul 5; în acest subcapitol sunt prezentate doar particularitățile tehnologice principale ale acestor module.

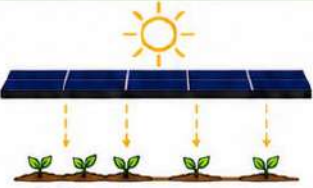
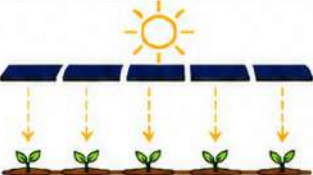
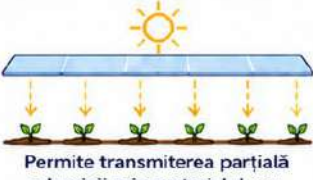
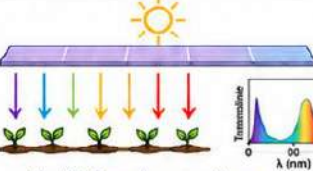
Modulele opace monofaciale sunt cele mai răspândite și captează radiația pe fața expusă la soare. Ele au, de regulă, eficiență energetică ridicată și disponibilitate comercială bună, dar reduc semnificativ cantitatea de radiație solară care ajunge în zona acoperită (Gorjian și colab., 2022; IEA PVPS, 2025). Efectul lor asupra culturii depinde de configurația sistemului, de gradul de acoperire, de înălțimea structurii, de distanțarea și orientarea panourilor, nu doar de tipul modulului.

Modulele cu celule distanțate și modulele semitransparente permit transmiterea unei părți din radiație către cultură. În primul caz, lumina pătrunde prin spațiile dintre celule, iar în al doilea caz, transmiterea poate fi influențată de materialul modulului, de dispunerea celulelor sau de combinația dintre acestea (Gorjian și colab., 2022; Stallknecht și colab., 2023; Lu și colab., 2024). Aceste soluții pot fi importante în horticultură, unde reducerea excesivă a luminii poate afecta fotosinteza, maturarea, colorarea și calitatea producției. Cu toate acestea, transmiterea luminii trebuie evaluată prin măsurători sau simulări, deoarece procentul declarat de transparență nu descrie întotdeauna uniformitatea luminii la nivelul culturii (Marrou și colab., 2013; Weselek și colab., 2019).

Modulele bifaciale captează radiația pe ambele fețe și sunt avantajoase numai dacă fața posterioară primește suficientă radiație reflectată sau difuză. Performanța lor depinde de orientare, albedo, înălțime, distanțare, geometria structurii și evitarea umbririi reciproce. Aceste module pot fi instalate în diferite poziții, inclusiv vertical, însă utilizarea lor nu determină în mod obligatoriu transmiterea unei cantități mai mari de lumină către cultură.

Tabelul 6.1 – Alegerea tipului de modul fotovoltaic în funcție de obiectivul sistemului hortivoltaic
(sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

Transmiterea luminii, compatibilitatea cu cultura și riscurile care trebuie monitorizate.

TIP DE MODUL	CE MODIFICĂ PENTRU CULTURĂ	AVANTAJ POSIBIL ÎN PROIECTARE	RISC SAU LIMITARE
1 MODUL FOTOVOLTAIC CONVENȚIONAL OPAC, MONOFACIAL 	 Blochează aproape complet lumina pe suprafața acoperită; lumina ajunge mai ales prin goluri, margini și radiație difuză.	 Producție energetică ridicată; protecție mai puternică față de radiația directă excesivă.	 Risc de umbră excesivă și deficit de lumină la speciile sensibile.
2 MODUL OPAC CU CELULE DISTANȚATE / SPAȚII ÎNTRE CELULE 	 Permite pătrunderea unei părți din lumină prin spațiile dintre celule.	 Poate asigura un compromis între energie și o cantitate mai mare de lumină pentru cultură.	 Producția energetică pe suprafața modului poate fi mai redusă; distribuția luminii poate rămâne neuniformă.
3 MODUL SEMITRANSPARENT 	 Permite transmiterea parțială a luminii prin materialul sau arhitectura modului.	 Poate îmbunătăți compatibilitatea cu speciile sensibile la reducerea luminii.	 Costuri inițiale mai ridicate; efectul depinde de procentul și calitatea luminii transmise.
4 MODUL SEMITRANSPARENT CU TRANSMISIE SPECTRALĂ SELECTIVĂ 	 Modifică nu doar cantitatea, ci și calitatea spectrală a luminii.	 Are potențial de optimizare simultană a luminii utile pentru plante și a producției energetice.	 Tehnologie încă în dezvoltare sau validare pentru multe aplicații horticole.
5 MODUL BIFACIAL 	Nu crește transmiterea directă a luminii către cultură, captează radiația pe ambele fețe și valorifică radiația reflectată sau difuză.	 Poate crește producția energetică în configurații care permit iluminarea feței posterioare.	 Beneficiul este în primul rând energetic; depinde de orientare, albedo, distanțare și evitarea umbririi reciproce.

PRINCIPII GENERALE

 Transmiterea luminii către cultură depinde de tipul modului, dar și de configurație, orientare, înălțime, distanțare și gradul de acoperire (GCR).	 Modulele semitransparente sau cu celule distanțate pot fi mai potrivite pentru speciile sensibile la reducerea luminii.	 Modulele bifaciale trebuie înțelese ca soluții cu potențial energetic suplimentar, nu ca sursă de lumină directă pentru cultură.	 Alegerea modului trebuie corelată cu specia, arhitectura culturii, obiectivul dominant al fermei și configurația sistemului.
NOTĂ ȘTIINȚIFICĂ: Formulările precum «transmitere redusă», «moderată» sau «ridicăată» sunt orientative și conceptuale. Transmiterea efectivă a luminii depinde de materialele modului, arhitectura celulelor, geometria sistemului și condițiile locale.			

Beneficiul este în primul rând energetic și apare în configurațiile care permit iluminarea eficientă a ambelor fețe ale modului (Guerrero-Lemus și colab., 2016; Riaz și colab., 2019; Riaz și colab., 2021; Tahir și colab., 2022; IEA PVPS, 2025).

Modulele cu transmisie spectrală selectivă urmăresc să modifice nu doar cantitatea, ci și calitatea spectrală a luminii transmise (Loik și colab., 2017; Stallknecht și colab., 2023; Lu și colab.,

2024). Acestea pot avea interes pentru culturi cu valoare ridicată sau pentru sisteme în care se dorește optimizarea simultană a luminii utile pentru plante și a producției energetice. Totuși, ele trebuie prezentate prudent, deoarece multe soluții sunt încă în cercetare, testare sau validare pentru condiții horticoale specifice (Gorjian și colab., 2022; Zotti și colab., 2024; Lu și colab., 2024; Thomas și colab., 2026).

În concluzie, modulele fotovoltaice nu pot fi comparate doar prin eficiența energetică declarată, deoarece în SHV contează și efectul lor asupra luminii disponibile pentru cultură, integrarea în structură, mentenanța și funcționarea pe termen lung.

6.3. Structuri de susținere și sisteme constructive

Structura de susținere asigură stabilitatea panourilor și integrarea lor în spațiul cultivat. Într-un SHV, ea nu este doar un suport pentru module. Trebuie să permită accesul la lucrările horticoale, să asigure exploatarea în siguranță și să reziste condițiilor locale de mediu.

Elementele principale sunt stâlpii, grinzile, fundațiile, sistemele de prindere a modulelor, contravântuirile, traseele pentru cabluri și zonele de acces pentru întreținere (Fraunhofer ISE, 2022; Toledo și Scognamiglio, 2021).

Cerințele constructive depind de configurația aleasă, de înălțimea liberă necesară sub panouri, de distanțarea dintre module, de tipul utilajelor folosite și de lucrările aplicate culturii. În plantațiile horticoale, structura trebuie să permită tăierile, tratamentele, cositul, recoltarea, irigarea și verificarea sistemelor tehnice fără obstacole majore.

O structură corectă trebuie să fie suficient de robustă pentru componenta fotovoltaică, dar și compatibilă cu tehnologia culturii (Weselek și colab., 2019; Fraunhofer ISE, 2022).

Rezistența mecanică este un criteriu esențial. Structura trebuie dimensionată în funcție de condițiile meteorologice (vânt sau zăpadă), de încărcările permanente, de vibrații, de eventuale solicitări produse de sistemele mobile și de condițiile specifice amplasamentului (CEN, 2003, 2005a, 2005b; IEC, 2023; IEA PVPS, 2025).

În zone expuse la vânt sau cu episoade de ninsoare importantă, fundațiile, stâlpii, prinderile și contravântuirile devin componente critice (CEN, 2005a, 2005b; IEC, 2023).

În același timp, materialele trebuie alese astfel încât să reziste la umiditate, coroziune, praf, tratamente fitosanitare și lucrări repetate în apropierea structurii (IEC, 2023; Fraunhofer ISE, 2022; IEA PVPS, 2025).

Un alt aspect important este siguranța exploatarei. Cablurile, invertoarele, cutiile de conexiuni și elementele electrice trebuie amplasate astfel încât să fie protejate de lovituri mecanice, apă, praf și contact accidental. Traseele tehnice trebuie să permită inspecția și mentenanța fără a împiedica circulația în plantație.

În sistemele cu irigare, fertirigare sau tratamente aplicate mecanizat, separarea clară între zona electrică și zona de lucru agricol este necesară pentru reducerea riscurilor (IEC, 2023; IEA PVPS, 2025).

Structura trebuie analizată și prin prisma mentenanței. Accesul la module, la elementele de prindere, la senzori, la cabluri și la echipamentele de control trebuie prevăzut din faza de proiectare. Dacă întreținerea este dificilă, costurile de exploatare cresc, iar intervențiile tehnice pot perturba lucrările horticoale.

De aceea, alegerea materialelor, poziția stâlpilor, înălțimea liberă, culoarele de acces și protecția componentelor trebuie tratate împreună (Weselek și colab., 2019; Toledo și Scognamiglio, 2021). Figura 6.1 sintetizează componentele tehnice principale ale structurii de susținere.

Structura de susținere trebuie privită ca infrastructură tehnică integrată în plantație. Aceasta trebuie să ofere stabilitate, siguranță, acces, durabilitate și compatibilitate cu lucrările horticoale.

Configurația, orientarea, înălțimea și distanțarea au fost discutate anterior ca decizii de proiectare; aici accentul cade pe transformarea lor într-o structură sigură și ușor de exploatat.

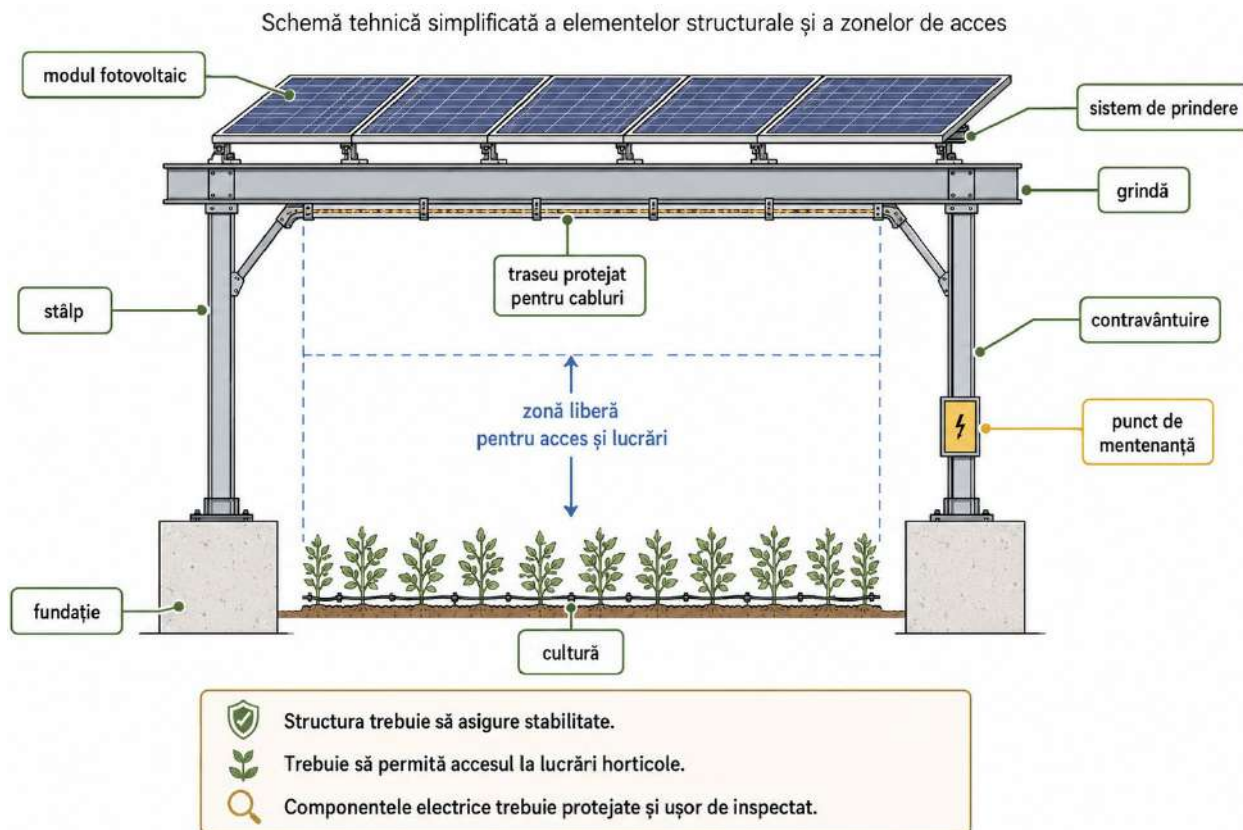


Figura 6.1 – Componentele tehnice ale structurii de susținere într-un SHV (sursa: elaborare proprie)

6.4. Sisteme de control al poziției panourilor

Sistemele de control al poziției panourilor stabilesc dacă modulele fotovoltaice rămân într-o poziție fixă sau dacă își pot modifica orientarea în timpul zilei ori în funcție de condițiile de mediu. Din punct de vedere tehnologic, pot fi întâlnite trei situații principale: structuri fixe, sisteme cu urmărire solară și sisteme adaptive (Weselek și colab., 2019; Toledo și Scognamiglio, 2021).

Structurile fixe sunt cele mai simple și mai robuste. Ele nu includ mecanisme de mișcare, au costuri de mentenanță mai reduse și sunt mai ușor de integrat în plantații unde stabilitatea, accesul și simplitatea exploatării sunt prioritare. Limitarea principală este lipsa flexibilității: odată stabilite orientarea și înclinarea panourilor, distribuția luminii și a umbrei rămâne determinată de geometria sistemului și de poziția soarelui (Fraunhofer ISE, 2022).

Sistemele cu urmărire solară modifică poziția panourilor pentru a urmări mișcarea aparentă a soarelui. Acestea pot utiliza urmărire pe o axă sau pe două axe, în funcție de complexitatea tehnică și de obiectivul energetic. În SHV, urmărirea solară poate modifica și traseul umbrei în livadă, dar scopul tehnologic principal rămâne creșterea captării radiației și îmbunătățirea producției energetice.

Utilizarea acestor sisteme presupune mecanisme de acționare, senzori sau algoritmi de poziționare, sisteme de siguranță la vânt și un nivel mai ridicat de mentenanță (Toledo și Scognamiglio, 2021; Fraunhofer ISE, 2022).

Sistemele adaptive sunt mai complexe, deoarece pot modifica poziția panourilor nu doar în funcție de soare, ci și în funcție de obiective agronomice sau microclimatice. În principiu, acestea pot integra date despre radiație, temperatură, vânt, precipitații, umiditate, fenofaza culturii sau riscul de stres termic. Diferența importantă este că tracking-ul urmărește în primul rând optimizarea energetică, în timp ce controlul adaptiv poate urmări un compromis între energie, protecția culturii și condițiile de microclimat (Weselek și colab., 2019; Toledo și Scognamiglio, 2021).

Introducerea sistemelor mobile crește complexitatea tehnică. Componentele mecanice, motoarele, senzorii, controlerele, cablurile mobile și sistemele de siguranță trebuie protejate

împotriva umidității, prafului, vibrațiilor, tratamentelor fitosanitare și loviturilor accidentale. De asemenea, trebuie prevăzute poziții de siguranță pentru vânt puternic, grindină, ninsoare sau intervenții tehnice (Tahir și colab., 2022; Bruno și colab., 2025; IEC, 2023; IEA PVPS, 2025), deoarece sistemul de control nu trebuie să împiedice lucrările de întreținere, tratamentele, recoltarea sau accesul la irigare (Fraunhofer ISE, 2022). Componentele de bază ale unui sistem de control al poziției panourilor sunt sintetizate în figura 6.2.

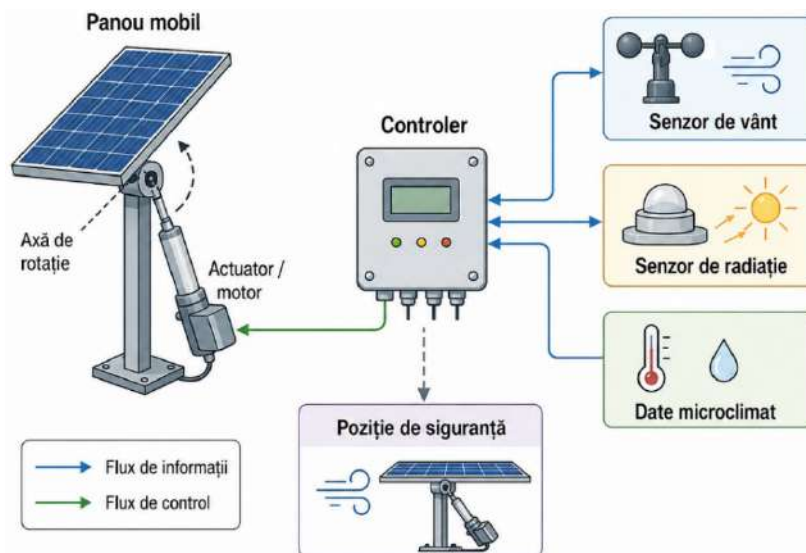


Figura 6.2 – Componentele unui sistem de control al poziției panourilor (sursa: elaborare proprie)

Alegerea între structura fixă, structura cu urmărire solară și controlul adaptiv trebuie făcută în funcție de obiectivul sistemului, valoarea culturii, riscul climatic, capacitatea de mentenanță și beneficiul energetic estimat. Pentru multe exploatații horticoale, o structură fixă bine proiectată poate fi mai realistă decât un sistem complex greu de întreținut (Tahir și colab., 2022; Bruno și colab., 2025; IEA PVPS, 2025). Sistemele adaptive devin relevante mai ales acolo unde cultura are valoare ridicată, riscul climatic este important și există capacitatea tehnică de monitorizare și control (Weselek și colab., 2019; Fraunhofer ISE, 2022).

6.5. Sisteme de monitorizare climatică și agrometeorologică

Monitorizarea climatică și agrometeorologică este necesară deoarece panourile pot modifica local radiația solară, temperatura, umiditatea, circulația aerului, precipitația efectivă și umiditatea solului. Într-un SHV, măsurătorile trebuie să surprindă diferențele dintre zona de sub panouri, spațiile dintre panouri, marginile structurii și martorul neacoperit, nu doar valorile medii ale amplasamentului (Adeh și colab., 2018; Elamri și colab., 2018; Weselek și colab., 2019).

Din punct de vedere tehnologic, sistemul poate include stații agrometeorologice, senzori pentru radiație globală sau PAR, senzori de temperatură și umiditate relativă a aerului, anemometre, pluviometre, precum și senzori de temperatură și umiditate a solului, iar în culturile sensibile la boli sunt necesari senzori pentru determinarea duratei de umezire a frunzișului (Weselek și colab., 2019; IEA PVPS, 2025). Alegerea și poziționarea senzorilor trebuie adaptate culturii, configurației SHV și obiectivului monitorizării. Indicatorii, amplasarea punctelor de măsurare și interpretarea datelor sunt detaliate în capitolul dedicat metodologiei și monitorizării.

Datele colectate trebuie utilizate pentru ajustarea irigației, evaluarea riscului de stres radiativ sau termic, urmărirea condițiilor favorabile bolilor și verificarea efectelor reale ale configurației. Fără date locale și comparație cu martorul neacoperit, efectele SHV pot fi supraestimate sau interpretate greșit (Weselek și colab., 2019; IEA PVPS, 2025; Zhang și colab., 2025).

6.6. Senzori pentru monitorizarea stării fiziologice a plantelor

Senzorii fiziologici pot ajuta la înțelegerea modului în care plantele răspund la umbră, temperatură, stres radiativ și deficit hidric. Ei nu sunt obligatorii în toate sistemele, dar sunt utili în cercetare, proiecte-pilot și culturi cu valoare ridicată, unde este importantă corelarea microclimatului cu răspunsul plantei.

Fluorescența clorofilei este utilizată pentru evaluarea eficienței fotosistemului II și a stresului abiotic, fiind o metodă frecvent folosită în fiziologia plantelor (Maxwell și Johnson, 2000; Murchie și Lawson, 2013). Conductanța stomatală oferă informații despre schimbul de gaze și răspunsul plantei la deficitul hidric. Camerele termice pot indica supraîncălzirea frunzelor sau fructelor, iar imaginile multispectrale pot evidenția heterogenitatea culturii și zonele cu stres fiziologic (Jones, 2004; Zarco-Tejada și colab., 2012; Matese și Di Gennaro, 2015; IEA PVPS, 2025). În SHV, aceste tehnologii trebuie folosite pentru a răspunde la întrebări concrete: reduce umbră stresul? Devine lumina limitativă? Apar diferențe între zonele coronamentului? Trebuie ajustată irigarea? Fără interpretare agronomică, datele furnizate de senzori pot deveni greu de utilizat practic.

6.7. Sisteme de irigare și fertirigare integrate

În horticultură, SHV sunt asociate frecvent cu irigarea localizată, fertirigarea și managementul automatizat al apei. Energia produsă poate alimenta pompele, electrovalvele, sistemele de control, senzorii și infrastructura digitală utilizată pentru programarea irigației. Integrarea irigației într-un SHV trebuie evaluată cu prudență. Reducerea radiației și a temperaturii sub panouri poate diminua evapotranspirația în anumite condiții, dar necesarul de apă nu scade automat. Panourile pot modifica distribuția precipitațiilor, iar apa de ploaie poate ajunge neuniform la rădăcini. De aceea, irigarea și fertirigarea trebuie ajustate pe baza umidității solului, a microclimatului și a răspunsului culturii (Adeh și colab., 2018; Elamri și colab., 2018).

În practică, sistemele integrate pot include picurare, fertirigare, senzori de umiditate a solului, debitmetre, controlere, electrovalve și platforme de monitorizare. Aceste componente permit adaptarea udărilor la diferențele dintre zona de sub panouri, zonele dintre panouri și martorul neacoperit (Marrou și colab., 2013; Adeh și colab., 2018; Barron-Gafford și colab., 2019; IEA PVPS, 2025). Scopul nu este reducerea mecanică a volumului de apă, ci folosirea mai precisă a apei și a fertilizanților, în funcție de condițiile reale din cultură (IEA PVPS, 2025).

6.8. Sisteme de stocare și management energetic

Energia produsă de SHV poate fi utilizată direct în exploatarea horticola, stocată în baterii sau injectată în rețea, în funcție de legislație, infrastructură și modelul economic (IEA PVPS, 2025; Fraunhofer ISE, 2024). În horticultură, autoconsumul este adesea atractiv deoarece energia poate fi folosită pentru irigare, fertirigare, refrigerare, depozitare, sortare și automatizare (Weselek și colab., 2019; IEA PVPS, 2025).

Sistemele hortivoltaice moderne pot include invertoare inteligente, baterii, platforme digitale de monitorizare și sisteme de control energetic. Totuși, stocarea trebuie analizată din punct de vedere economic, deoarece bateriile cresc investiția inițială și au o durată de viață limitată (IEA, 2024; Cole și Karmakar, 2025; IEA PVPS, 2025). În multe situații, prioritatea poate fi suprapunerea producției solare cu consumurile existente. Stocarea devine justificată numai dacă rezolvă o nevoie energetică reală și susținută economic.

În acest subcapitol, accentul este pus pe echipamentele și soluțiile de integrare energetică. Dimensionarea producției, autoconsumul, scenariile energetice și evaluarea economică sunt tratate în capitolele dedicate componentei energetice și analizei economice.

6.9. Tehnologii digitale și agricultură inteligentă

SHV moderne pot fi integrate cu agricultura de precizie prin utilizarea senzorilor conectați la platforme IoT, prin monitorizarea climatică, automatizarea irigației și managementul energetic. Aceste tehnologii permit centralizarea datelor și pot susține decizii mai rapide privind irigarea, protecția culturii, stresul termic și utilizarea energiei. Agricultura de precizie este, în esență, o abordare bazată pe date pentru îmbunătățirea managementului exploatației horticole (Fraunhofer ISE, 2022; Weselek și colab., 2019).

În practică, digitalizarea trebuie dimensionată realist. Conectivitatea slabă, costurile, mentenanța și dificultatea interpretării datelor pot limita utilizarea sistemelor digitale. Este mai util un set redus de senzori bine interpretați decât o platformă complexă din care nu rezultă decizii clare. Tehnologiile inteligente trebuie introduse gradual, începând cu indicatorii care influențează direct deciziile zilnice ale cultivatorilor.

6.10. Corelarea echipamentelor cu tipul culturii

Necesarul tehnologic variază în funcție de specie, climat, valoarea culturii și obiectivul SHV (Weselek și colab., 2019; Toledo și Scognamiglio, 2021; IEA PVPS, 2025). La arbuști fructiferi și căpșun, pot fi prioritare monitorizarea temperaturii, umidității și irigației. La măr, cireș sau viță-de-vie, devin importante controlul luminii, monitorizarea calității fructelor, ventilația coroanelor și riscul de boli (Magarelli și colab., 2024; Gambetta și colab., 2021; IEA PVPS, 2025). La culturi foarte sensibile la arșiță, poate fi deosebit de utilă monitorizarea temperaturii fructelor (Gambetta și colab., 2021; Jones, 2004; Zarco-Tejada și colab., 2012). Exemplele orientative de tehnologii prioritare pentru principalele grupe horticole sunt sintetizate în tabelul 6.2.

*Tabelul 6.2 – Exemple de tehnologii prioritare în funcție de cultură
(sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)*

Cultură / grupă	Risc principal de urmărit	Tehnologie prioritară	Observație practică
 Măr, păr și alte livezi cu talie medie-mare	 Stres termic; arsură solară; neuniformitate a luminii în coronament	 Structuri suficiente de înalte; monitorizare PAR/radiație; temperatură aer/fruct; senzori de umiditate a solului	 Accesul pentru tăieri, tratamente și recoltare trebuie verificat încă din proiectare.
 Cireș, cais, piersic și specii sensibile la calitatea fructelor	 Arsură solară; crăpare; boli favorizate de umiditate și uscare lentă	 Monitorizare microclimatică; senzori de umiditate/umezire foliară; irigare controlată; protecție climatică parțială	 Ventilația și uscarea fructelor sunt la fel de importante ca reducerea radiației.
 Arbuști fructiferi: coacăz, afin, zmeur, mur	 Stres radiativ; stres hidric; supraîncălzirea fructelor; variabilitate a calității	 Monitorizare radiație/PAR; temperatură; umiditate a solului; irigare/fertirigare localizată	 Umbrirea moderată poate fi utilă, dar trebuie evitate zonele cu lumină insuficientă sau umiditate persistentă.
 Căpșun și culturi joase	 Temperatură ridicată la nivelul frunzelor/fructelor; umiditate excesivă; risc fitosanitar	 Panouri semitransparente sau acoperire discontinuă; senzori de umiditate a solului, temperatură și umezire foliară	 Lumina trebuie menținută suficientă la nivelul frunzelor, iar irigarea trebuie ajustată fin.
 Viță-de-vie și sisteme tip gard fructifer	 Dezechilibru între protecție și lumină; maturare neuniformă; ventilație insuficientă	 Monitorizare PAR în coronament; temperatură; umiditate relativă; eventual control al umbrei	 Orientarea rândurilor și distribuția luminii în zona ciorchinilor sau fructelor sunt critice.
 Specii sensibile la arșiță sau de subetaj, de exemplu asimina	 Stres radiativ și termic, mai ales în faze juvenile	 Umbrire controlată; monitorizare temperatură/radiație; irigare localizată	 Protecția poate fi utilă, dar nivelul de umbrire trebuie ajustat în funcție de vârstă și vigoare.
 Sere, solarii și culturi protejate	 Reducerea excesivă a luminii; supraîncălzire; umiditate ridicată	 Module semitransparente; senzori climatici; control al ventilației și irigației	 Prioritatea este echilibrul dintre transmiterea luminii, controlul temperaturii și managementul umidității.

Notă: Tabelul nu stabilește compatibilități fixe între specii și tehnologii. El indică riscurile principale care trebuie urmărite și tehnologiile care pot ajuta la monitorizare, protecție sau ajustarea managementului. Recomandările sunt orientative și trebuie adaptate la specie, soi, sistem de conducere, climat, disponibilitatea apei și obiectivul SHV.

Alegerea tehnologiilor trebuie corelată cu tipul culturii, intensitatea umbririi, climatul regional, gradul de mecanizare, disponibilitatea apei și obiectivele energetice. Nu este necesar ca fiecare SHV să includă toate tehnologiile disponibile, ci este mai important ca sistemul să includă echipamentele care răspund direct riscurilor culturii și obiectivelor exploatației horticole.

6.11. Exploatarea sigură și mentenanța autorizată a sistemului hortivoltaic

Un sistem hortivoltaic nu este doar o structură de umbrire amplasată deasupra culturii. El include module fotovoltaice, cabluri, conectori, invertor, tablouri electrice, protecții, împământare, structură de susținere și, uneori, senzori sau echipamente de monitorizare. De aceea, lucrul în apropierea lui trebuie organizat diferit față de lucrările horticole obișnuite.

Regula de bază este simplă:

cultivatorul întreține cultura, nu instalația fotovoltaică.

Cultivatorul poate efectua lucrările horticole în apropierea sistemului, poate observa de la sol situații evidente și poate semnaliza problemele. Nu trebuie însă să atingă, să curețe, să repare, să modifice sau să mute panouri, cabluri, conectori, invertor, tablouri electrice, elemente de împământare ori părți ale structurii de susținere. Aceste intervenții aparțin personalului calificat/autorizat.

Avertizarea trebuie luată în serios. Modulele fotovoltaice pot genera curent continuu în prezența luminii, chiar și atunci când sistemul pare oprit. Un cablu desprins, un conector deteriorat, un panou fisurat sau un tablou deschis nu trebuie să fie atinse. Riscurile pot include electrocutare, arsuri, arc electric, incendiu, cădere de la înălțime și defectarea instalației.

Lucrările horticole curente pot continua sub sau lângă structură, dar numai fără contact cu instalația. Cosirea, tăierile, legările, recoltarea, irigarea, fertirigarea, tratamentele fitosanitare și curățarea resturilor vegetale se fac cu atenție, astfel încât uneltele, furtunurile, sârmele, lăstarii, lăzile, atomizoarele sau utilajele să nu atingă modulele, cablurile, tablourile, invertorul sau structura portantă.

Structura hortivoltaică nu se folosește ca suport pentru furtunuri, plase, sârme, folii, lăzi sau alte materiale agricole.

Pentru lucrările agricole efectuate în apropierea sistemului se folosește echipament de protecție adecvat activității. La cosire, la tăiere mecanică sau la îndepărtarea vegetației sunt recomandate încălțăminte de protecție, mănușile de lucru, ochelarii de protecție și îmbrăcăminte strânsă pe corp. La lucrările sub structură, când există risc de lovire de elemente metalice, este recomandată casca de protecție. La tratamentele fitosanitare se utilizează echipamentul indicat de eticheta produsului: mănuși, ochelari sau vizieră, mască/respirator, combinezon și cizme, după caz. Acest echipament protejează cultivatorul în timpul lucrărilor agricole. Nu îl autorizează să intervină asupra instalației fotovoltaice.

Curățarea panourilor nu se tratează ca lucrare agricolă obișnuită. Ea poate presupune lucru la înălțime, apropiere de cabluri și conectori, risc electric, risc de alunecare și posibilitatea deteriorării modulelor prin materiale abrazive, jeturi nepotrivite sau șoc termic. Panourile se curăță numai de personal instruit/autorizat, conform instrucțiunilor producătorului și procedurilor operatorului sistemului.

În sistemele hortivoltaice de dimensiuni mari sau în cele în care accesul la panouri este dificil, pot fi utilizate tehnologii de curățare asistată, inclusiv sisteme robotizate ori drone specializate. Utilizarea acestora trebuie să respecte instrucțiunile producătorului, cerințele de siguranță electrică

și măsurile necesare pentru protejarea culturii. Aceste soluții sunt încă în curs de extindere și validare pentru diferite configurații ale sistemelor și condiții de exploatare.

Lucrările agricole se opresc imediat dacă se observă cabluri desprinse, conectori expuși, panouri sparte, fum, miros de ars, scântei, zgomote neobișnuite, urme de supraîncălzire, echipamente electrice deschise, structură instabilă sau bălțiri în apropierea invertorului ori tablourilor. În aceste situații nu se verifică defectul de aproape, nu se ridică un cablu, nu se acoperă o izolație ruptă, nu se resetează invertorul și nu se încearcă reparații provizorii. Zona se evită, accesul se limitează dacă acest lucru se poate face fără apropiere de pericol și se anunță operatorul sistemului sau firma autorizată.

Aceeași prudență este necesară după furtuni, vânt puternic, grindină, zăpadă grea sau loviri accidentale cu utilaje. Dacă un stâlp, un panou, un cablu sau un tablou a fost atins ori pare modificat față de poziția normală, lucrările din zona respectivă se reiau numai după verificare tehnică.

Senzorii pentru măsurarea radiației solare, a temperaturii, a umidității, a vitezei vântului, a umidității solului sau a producției de energie nu se mută fără acordul echipei responsabile de monitorizare. Într-un lot experimental, schimbarea poziției lor poate compromite datele. Cultivatorul poate semnală dacă un senzor este acoperit de vegetație, lovit, căzut sau aparent defect, dar re poziționarea și verificarea funcționării trebuie făcute conform protocolului de monitorizare.

În exploatarea unui sistem hortivoltaic, siguranța personală are prioritate față de orice operațiune de întreținere. Cultivatorul răspunde de cultură și de zona agricolă, fără contact cu instalația fotovoltaică. Operatorul sistemului și personalul autorizat răspund de mentenanța tehnică. Separarea acestor responsabilități reduce riscul de accidentare, de electrocutare, incendiu, defectare a sistemului și compromitere a culturii.

Legislația privind securitatea și sănătatea în muncă stabilește obligația prevenirii riscurilor profesionale, a instruirii lucrătorilor și a utilizării echipamentului individual de protecție adecvat riscurilor. Pentru lucrările asupra instalațiilor electrice sunt aplicabile reglementările ANRE privind autorizarea electricienilor și a specialiștilor în domeniul instalațiilor electrice. În practică, aceste prevederi confirmă aceeași regulă: lucrările agricole pot fi realizate de cultivator, dar intervențiile fotovoltaice și electrice trebuie lăsate personalului autorizat.

6.12. Limitări tehnologice și provocări actuale

Deși progresul tehnologic este rapid, sistemele hortivoltaice prezintă încă limitări importante: costuri structurale ridicate, complexitate tehnică, lipsa standardizării, investiții inițiale mari și date experimentale insuficiente pentru multe specii horticole. În plus, tehnologiile energetice trebuie adaptate la cerințele fiziologice ale culturii, nu doar instalate deasupra acesteia (Fraunhofer ISE, 2022; Weselek și colab., 2019).

O provocare importantă este fiabilitatea echipamentelor în condiții reale de exploatare horticolă. Modulele, senzorii, cablurile, controlerele, motoarele de acționare ale panourilor și sistemele de irigare pot fi expuse la praf, umiditate, tratamente fitosanitare, variații mari de temperatură, vibrații și lovituri mecanice. Din acest motiv, alegerea tehnologiilor trebuie să țină cont nu doar de performanța declarată, ci și de mentenanță, protecția componentelor și disponibilitatea service-ului (IEC, 2023; Hickey, 2024; IEA PVPS, 2025).

O altă limitare este lipsa datelor locale pe termen lung. Multe efecte ale SHV depind de an, climat, fenofază, soi, sol și amplasament; de aceea, extrapolarea directă din alte regiuni poate fi riscantă (Weselek și colab., 2019; Zhang și colab., 2025; IEA PVPS, 2025).

De aceea, tehnologiile trebuie introduse gradual, prin proiecte-pilot, monitorizare și ajustare, înainte de extinderea pe suprafețe mari.

În lipsa unei astfel de verificări, există riscul ca sistemul să fie performant energetic, dar dificil de gestionat sau insuficient compatibil cu nevoile culturii (Toledo și Scognamiglio, 2021; Magarelli și colab., 2024; IEA PVPS, 2025).

6.13. Perspective de dezvoltare tehnologică

Direcțiile actuale de dezvoltare includ module mai eficiente, panouri semitransparente, tehnologii cu transmisie spectrală selectivă, sisteme adaptive, monitorizare automată, agricultură de precizie și management energetic inteligent. Aceste direcții pot îmbunătăți performanța SHV, dar trebuie privite ca instrumente de optimizare, nu ca soluții universal aplicabile (Fraunhofer ISE, 2022; Weselek și colab., 2019).

Pe termen lung, integrarea dintre senzori, modelarea climatică și controlul automatizat poate permite sisteme mai adaptabile la modificările climatice și la necesarul culturii. În etapa actuală, alegerea tehnologiilor trebuie să rămână pragmatică: sistemul trebuie să fie util, monitorizabil, reparabil și compatibil cu tehnologia de cultură.

Capitolul 7.

Efectele sistemelor hortivoltaice asupra microclimatului și fiziologiei culturilor

7.1. Microclimatul în sistemele hortivoltaice

În sistemele hortivoltaice, panourile fotovoltaice nu influențează doar producția de energie. Ele modifică și mediul fizic în care se dezvoltă cultura. Prin interceptarea și redistribuirea radiației solare, panourile pot schimba temperatura aerului și a solului, umiditatea relativă, circulația aerului, evapotranspirația și bilanțul hidric al culturii. De aceea, SHV trebuie analizate și ca sisteme de management microclimatic, nu doar ca infrastructuri energetice (Barron-Gafford și colab., 2019; Weselek și colab., 2019; Dragomir și colab., 2025).

În horticultură, aceste efecte au consecințe directe. Multe culturi sunt sensibile atât la excesul radiativ și termic, cât și la deficitul de lumină sau la ventilația insuficientă. În funcție de specie, climat și configurația sistemului, modificările microclimatice pot deveni favorabile, prin reducerea stresului termic și hidric, sau nefavorabile, prin diminuarea excesivă a luminii și creșterea umidității în coronament.

7.2. Modificarea distribuției radiației și a luminii

Primul efect al panourilor este modificarea regimului radiației solare. În SHV, panourile reduc radiația directă și schimbă alternanța lumină-umbră la nivelul culturii. Pentru culturile horticole, distribuția luminii este adesea la fel de importantă ca radiația totală. O iluminare neuniformă poate influența inducția și diferențierea mugurilor de rod, maturarea, colorarea fructelor și repartiția producției în coronament (Marrou și colab., 2013; Weselek și colab., 2019).

În unele configurații, panourile pot crește proporția luminii difuze. Aceasta pătrunde mai uniform în coronament și poate susține o activitate fotosintetică mai echilibrată (Hemming și colab., 2008; Li și colab., 2014; Zainali și colab., 2023). Efectul nu apare însă automat, ci depinde de densitatea panourilor, de înălțimea structurii, de orientare și de sistemul de cultură (Marrou și colab., 2013; Tahir și colab., 2022; Zainali și colab., 2023). În sisteme prea dense sau în plantații cu coronament compact, reducerea luminii poate deveni rapid limitativă.

Într-un SHV bine proiectat nu se urmărește simpla umbră. Obiectivul este menținerea unei cantități suficiente de radiație fotosintetic activă și a unei distribuții favorabile a luminii în zona productivă (Toledo și Scognamiglio, 2021; Zainali și colab., 2023; IEA PVPS, 2025).

7.3. Temperatura aerului, a solului și a fructelor

Prin reducerea radiației directe, SHV pot modifica regimul termic al culturii. În perioadele foarte calde, panourile pot diminua supraîncălzirea frunzelor, fructelor și solului, reducând stresul termic (Marrou și colab., 2013; Adeh și colab., 2018; Barron-Gafford și colab., 2019; Weselek și colab., 2019; Dragomir și colab., 2025). Acest efect este important mai ales la culturile sensibile la arsuri solare și la pierderea calității comerciale prin supraîncălzire.

Temperatura fructelor are o importanță practică deosebită. Suprafața expusă direct la soare poate ajunge la temperaturi mai mari decât aerul. În condiții de radiație intensă și ventilație redusă, epiderma fructelor poate depăși praguri critice pentru arsurile solare și degradarea pigmentilor (Schrader și colab., 2001; Glenn și colab., 2002; Racsko și Schrader, 2012; Gambetta și colab., 2021). Prin diminuarea radiației directe, panourile pot limita supraîncălzirea locală și pot reduce riscul de depreciere calitativă (Mupambi și colab., 2018) (figura 7.1).

Modificări microclimatice și efecte fiziologice principale

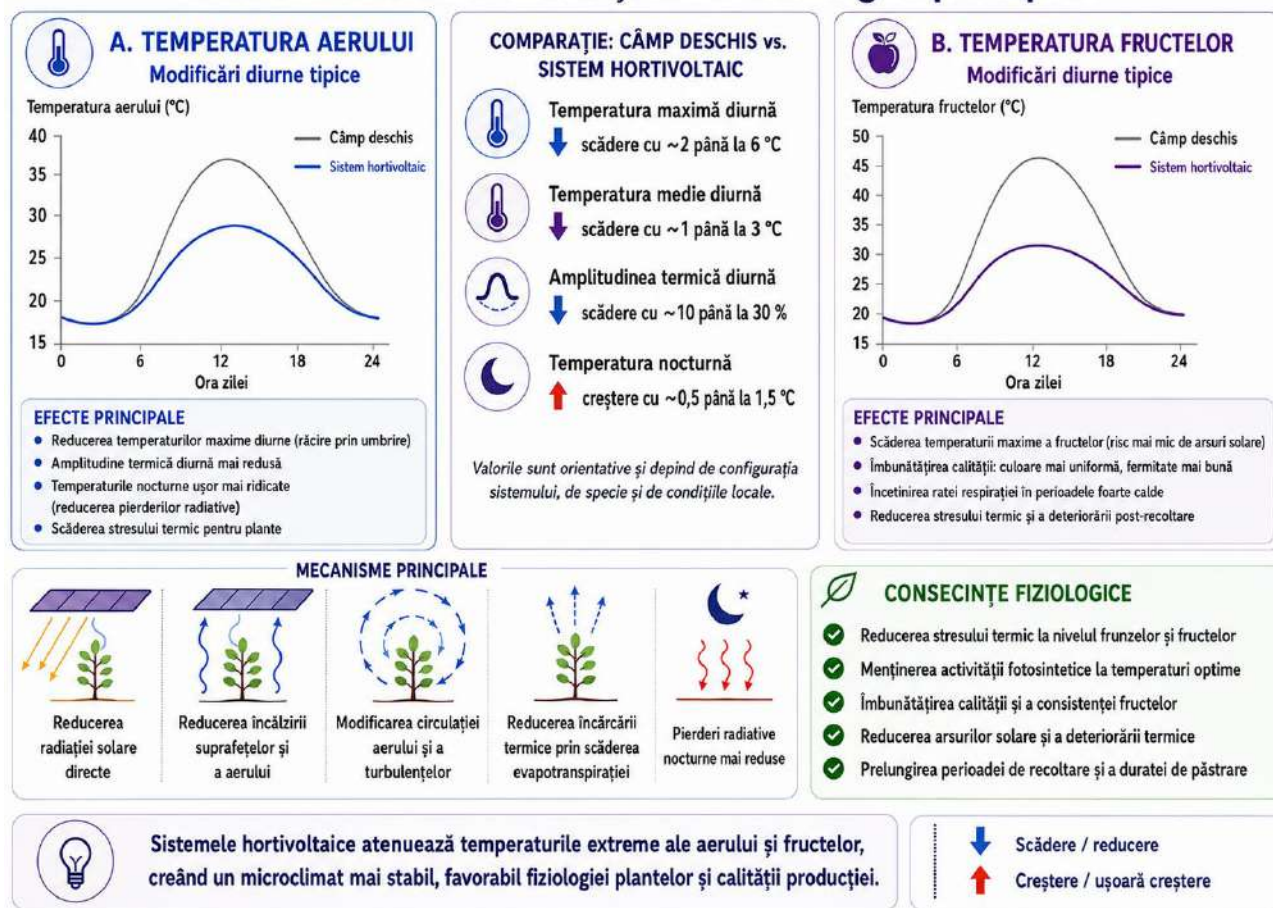


Figura 7.1 – Efectele SHV asupra temperaturii aerului și fructelor
(sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

Efectele termice trebuie însă interpretate împreună cu ventilația și umiditatea. Structurile dense sau joase pot limita circulația aerului și pot favoriza acumularea căldurii și a umidității în anumite zone ale culturii (Adeh și colab., 2018; Weselek și colab., 2021; Zainali și colab., 2022).

Panourile influențează și temperatura solului, prin reducerea radiației incidente. Acest efect poate limita încălzirea excesivă și evaporarea apei de la suprafață (Marrou și colab., 2013; Adeh și colab., 2018; Barron-Gafford și colab., 2019). În zone mai reci sau pe soluri grele, răcirea excesivă a solului trebuie monitorizată, deoarece poate influența activitatea radiculară și dinamica dezvoltării culturii (Brady și Weil, 2016; Gregory, 2006; Zhang și colab., 2025) (tabelul 7.1).

Tabelul 7.1 – Efecte hidrologice raportate ale sistemelor hortivoltaice în literatura de specialitate (sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

Componentă analizată	Tendința generală raportată în literatură	Referințe reprezentative
Evapotranspirația / evaporarea	Tinde să scadă sub umbră parțială, datorită reducerii radiației incidente, temperaturii și deficitului de presiune a vaporilor (VPD).	Marrou și colab., 2013; Barron-Gafford și colab., 2019
Umiditatea solului	Poate fi mai bine conservată prin reducerea evaporării și moderarea temperaturii suprafeței solului.	Adeh și colab., 2018; Barron-Gafford și colab., 2019
Eficiența utilizării apei	Poate crește, în special în regiunile calde și aride, unde reducerea stresului hidric devine relevantă pentru cultură.	Barron-Gafford și colab., 2019
Reducerea evaporării	Valorile raportate diferă între sisteme și condiții climatice; unele studii au observat reduceri de aproximativ 20–30%.	Omer și colab., 2022

În ansamblu, majoritatea studiilor indică faptul că sistemele agrivoltaice pot contribui, în anumite condiții, la conservarea apei prin reducerea evapotranspirației și moderarea microclimatului. Magnitudinea efectelor depinde însă de climă, de specie, de sistemul de cultură, precum și de configurația sistemului (Marrou și colab., 2013; Barron-Gafford și colab., 2019).

7.4. Umiditatea relativă, ventilația și deficitul de presiune a vaporilor

Pe lângă lumină și temperatură, sistemele hortivoltaice influențează schimburile de aer și de apă dintre cultură și atmosferă. Panourile pot modifica viteza vântului, turbulența, umiditatea relativă, deficitul de presiune a vaporilor de apă din atmosferă și durata de umezire a frunzelor și fructelor (Adeh și colab., 2018; Weselek și colab., 2021; Zainali și colab., 2022).

Aceste efecte nu sunt uniforme. Sunt modelate de factori precum configurația sistemului, înălțimea panourilor, distanța dintre module sau grupuri de module, orientarea structurii față de vânturile dominante, densitatea coronamentului și topografia locală (Adeh și colab., 2018; Zainali și colab., 2023; Dragomir și colab., 2025).

Reducerea vitezei vântului poate fi favorabilă în perioade calde și uscate. În aceste situații, pierderile rapide de apă prin transpirație și evaporare pot fi limitate, iar cultura poate funcționa într-un microclimat mai puțin stresant.

Același efect poate deveni nefavorabil în zone umede, în culturi cu coronament dens sau după ploi frecvente și rouă persistentă. Ventilația slabă întârzie uscarea frunzelor și fructelor, menține umiditatea ridicată în interiorul coronamentului și poate crea condiții favorabile pentru dezvoltarea bolilor criptogamice. De aceea, viteza vântului și durata de umezire foliară trebuie interpretate împreună, nu separat (Adeh și colab., 2018; Barron-Gafford și colab., 2019; Rowlandson și colab., 2015).

Un indicator util pentru evaluarea acestor procese este deficitul de presiune a vaporilor de apă din atmosferă, cunoscut ca VPD (Vapor Pressure Deficit). Acesta exprimă diferența dintre cantitatea maximă de vaporii pe care aerul o poate reține la o anumită temperatură și cantitatea efectiv prezentă la un moment dat.

Valorile mari ale VPD indică o atmosferă uscată, cu cerere evaporativă ridicată. În aceste condiții, transpirația se poate accelera, iar plantele pot închide stomatele (Allen și colab., 1998; Grossiord și colab., 2020). Valorile foarte mici ale VPD indică o atmosferă umedă, în care pierderile de apă sunt reduse, dar uscarea frunzelor și fructelor poate fi întârziată. Un SHV poate fi favorabil atunci când moderează VPD în perioade de arșiță și secetă, dar poate deveni problematic dacă favorizează stagnarea aerului și menținerea umezelii în coronament (Adeh și colab., 2018; Barron-Gafford și colab., 2019; Rowlandson și colab., 2015).

În anumite configurații, panourile pot genera efecte locale de canalizare a aerului. La marginile structurii, în spațiile dintre grupurile de panouri sau în sistemele verticale, fluxul de aer poate fi deviat sau accelerat local, în timp ce alte zone pot rămâne slab ventilate. Aceste efecte nu trebuie considerate automat benefice sau negative. Ele depind de geometria sistemului și de condițiile meteorologice locale (Zainali și colab., 2022; IEA PVPS, 2025). Pentru pomicultură, problema principală nu este doar viteza medie a vântului, ci distribuția aerului în interiorul culturii și capacitatea sistemului de a permite uscarea coronamentului după ploi, rouă sau tratamente (Rowlandson și colab., 2015; Zainali și colab., 2022).

Evaluarea ventilației într-un SHV trebuie să includă mai mulți indicatori: temperatura aerului, umiditatea relativă, VPD, viteza și direcția vântului, durata de umezire foliară și diferențele dintre zona de sub panouri, marginile structurii, intervalele dintre panouri și matorul neacoperit.

În culturile sensibile la boli, monitorizarea trebuie completată cu observații fitosanitare. Un microclimat aparent favorabil din punct de vedere hidric poate deveni nefavorabil dacă prelungește umezeala pe organele vegetale. Proiectarea corectă urmărește nu doar reducerea excesului de radiație, ci și menținerea unei aerisiri suficiente a coronamentului.

7.5. Evapotranspirația și eficiența utilizării apei

Reducerea radiației și moderarea temperaturii pot diminua evapotranspirația și pot contribui la conservarea umidității solului. Efectul este important în regiunile calde și secetoase, unde deficitul hidric limitează producția și calitatea culturilor horticole (Barron-Gafford și colab., 2019).

În horticultură, eficiența utilizării apei nu depinde doar de cantitatea de apă disponibilă. Contează și capacitatea plantei de a menține fotosinteza și transpirația într-un interval fiziologic favorabil (Jones, 2004; Flexas și colab., 2013; Medrano și colab., 2015).

Un SHV poate fi util dacă reduce cererea evaporativă fără să limiteze excesiv lumina. Dacă ventilația este slabă și umiditatea rămâne ridicată, beneficiile hidrice pot fi însoțite de riscuri fitosanitare.

Irigarea nu trebuie redusă automat după instalarea panourilor. Ajustarea trebuie făcută pe baza umidității solului, temperaturii, VPD, observațiilor asupra plantei și evoluției producției (Barron-Gafford și colab., 2019). Evaluarea simultană a acestor indicatori este esențială pentru interpretarea corectă a răspunsului hidric al culturilor (Allen și colab., 1998; Jones, 2004; Adeh și colab., 2018; Barron-Gafford și colab., 2019).

7.6. Răspunsul fiziologic al culturilor

Modificările microclimatice influențează transpirația, schimbul de gaze, conductanța stomatală, fotosinteza și reacțiile la stres abiotic. În condiții de stres termic ridicat, reducerea moderată a temperaturii și a VPD poate susține activitatea fiziologică. În schimb, atunci când umbrirea este excesivă sau ventilația insuficientă, răspunsul plantei poate deveni nefavorabil.

Conductanța stomatală reflectă intensitatea schimbului de gaze și capacitatea plantei de a regla pierderile de apă. În condiții de temperaturi ridicate și VPD mare, plantele pot închide stomatele pentru a limita transpirația, dar acest răspuns reduce și absorbția CO₂, afectând fotosinteza. Prin moderarea microclimatului, SHV pot contribui la menținerea unei activități stomatale mai stabile, cu condiția ca lumina să rămână suficientă pentru cultură (Marrou și colab., 2013; Adeh și colab., 2018; Barron-Gafford și colab., 2019; Jones, 2004).

Fluorescența clorofilei este utilizată pentru evaluarea eficienței fotosistemului II și pentru detectarea timpurie a stresului abiotic. Metoda este valoroasă deoarece poate indica modificări ale funcționării aparatului fotosintetic înainte de apariția simptomelor vizibile (Maxwell și Johnson, 2000; Murchie și Lawson, 2013).

În SHV, fluorescența clorofilei, temperatura frunzelor și imaginile multispectrale pot ajuta la compararea răspunsului culturilor în diferite configurații de lumină și microclimat. Ele devin utile mai ales atunci când sunt corelate cu producția, calitatea fructelor și datele de microclimat.

7.7. Variabilitatea răspunsului în funcție de specie și climat

Efectele microclimatice ale SHV diferă în funcție de specie, climat, configurația livezii și configurația panourilor. În regiunile calde, unde stresul termic apare frecvent, moderarea microclimatului poate avea efecte favorabile mai evidente. În climate răcoroase, umede sau cu radiație limitată, reducerea suplimentară a luminii poate deveni problematică (Weselek și colab., 2019; Fraunhofer ISE, 2022).

Diferențele dintre climatele aride și cele umede sunt esențiale. În regiunile aride, reducerea evapotranspirației poate limita stresul hidric. În climatele umede sau slab ventilate, creșterea umidității relative poate favoriza bolile și prelungirea perioadelor de umezeală pe organele vegetale (Adeh și colab., 2018; Barron-Gafford și colab., 2019; Rowlandson și colab., 2015; Zhang și colab., 2025). În plus, topoclimatul local poate modifica suplimentar aceste efecte prin influențarea ventilației, acumulării aerului rece și dinamicii umidității nocturne (Snyder și de Melo-Abreu, 2005; Zainali și colab., 2022).

7.8. Monitorizarea microclimatului în sistemele moderne

Monitorizarea microclimatului este necesară pentru a verifica dacă efectele descrise în acest capitol apar efectiv în cultură și cu ce intensitate. În SHV, datele despre radiație, temperatură, umiditate, VPD, apă în sol și răspuns fiziologic trebuie interpretate împreună. Planta nu răspunde separat la lumină, căldură, apă și ventilație, ci la efectul lor combinat.

Scopul monitorizării nu este simpla colectare de date. Datele trebuie legate de deciziile de management: ajustarea irigației și fertirigației, evaluarea riscului de stres termic sau hidric, anticiparea presiunii fitosanitare și interpretarea diferențelor de producție și calitate. Echipamentele de monitorizare sunt prezentate în capitolul 6, iar metodologia de amplasare și interpretare a senzorilor este tratată în capitolul metodologic.

7.9. Sistemele hortivoltaice și adaptarea la schimbările climatice

Sistemele hortivoltaice pot contribui la adaptarea horticulturii la schimbările climatice prin reducerea stresului radiativ și termic, moderarea temperaturii la nivelul coronamentului și al fructelor și, în anumite condiții, prin diminuarea cererii evaporative. Aceste efecte pot fi importante în perioadele cu arșiță, radiație excesivă și deficit hidric, când culturile horticole sunt expuse pierderilor de producție și scăderii calității comerciale (Barron-Gafford și colab., 2019; Weselek și colab., 2019; IPCC, 2022).

Totuși, SHV nu trebuie interpretat automat ca având rol de instrument de adaptare. Aceeași reducere a radiației poate fi favorabilă într-un climat cald și pentru o cultură sensibilă la arșiță, dar nefavorabilă într-o zonă cu lumină limitată sau la specii cu cerințe ridicate față de radiație.

De asemenea, umiditatea relativă mai mare, ventilația mai redusă sau distribuția neuniformă a precipitațiilor pot crea riscuri suplimentare dacă sistemul nu este proiectat și gestionat corect (Weselek și colab., 2019; Elamri și colab., 2018; Magarelli și colab., 2024; Zhang și colab., 2025).

Valoarea adaptativă a unui SHV depinde de specie, soi, forma de coroană, climat, topoclimat, disponibilitatea apei și configurația sistemului. Sistemele hortivoltaice nu trebuie privite ca o soluție climatică universală, ci ca infrastructuri care pot susține adaptarea atunci când efectele lor asupra luminii, temperaturii, apei și ventilației sunt proiectate, monitorizate și interpretate pe baza datelor locale.

Capitolul 8.

Impactul asupra producției horticole

8.1. Producția horticolă în sistemele hortivoltaice

Impactul SHV asupra producției horticole trebuie analizat prin rezultatul agronomic final, nu doar prin modificările microclimatice produse de panouri. În horticultură, performanța nu înseamnă numai cantitatea recoltată. Contează stabilitatea producției, proporția de fructe comerciale și capacitatea culturii de a menține calitatea în anii cu stres climatic intens.

Panourile pot influența producția totală, numărul de fructe, greutatea medie, proporția de fructe comerciale, uniformitatea maturării, pierderile din cauze climatice și variația producției între ani. În anumite condiții, reducerea stresului termic și a arsurilor solare poate compensa parțial sau chiar total pierderile asociate diminuării luminii (Marrou și colab., 2013; Barron-Gafford și colab., 2019; Gambetta și colab., 2021; Magarelli și colab., 2024). De aceea, performanța unui SHV trebuie citită ca un bilanț agronomic complet, nu doar ca producție la hectar (Weselek și colab., 2019; Magarelli și colab., 2024). Figura 8.1 și tabelul 8.1 sintetizează această logică de evaluare.

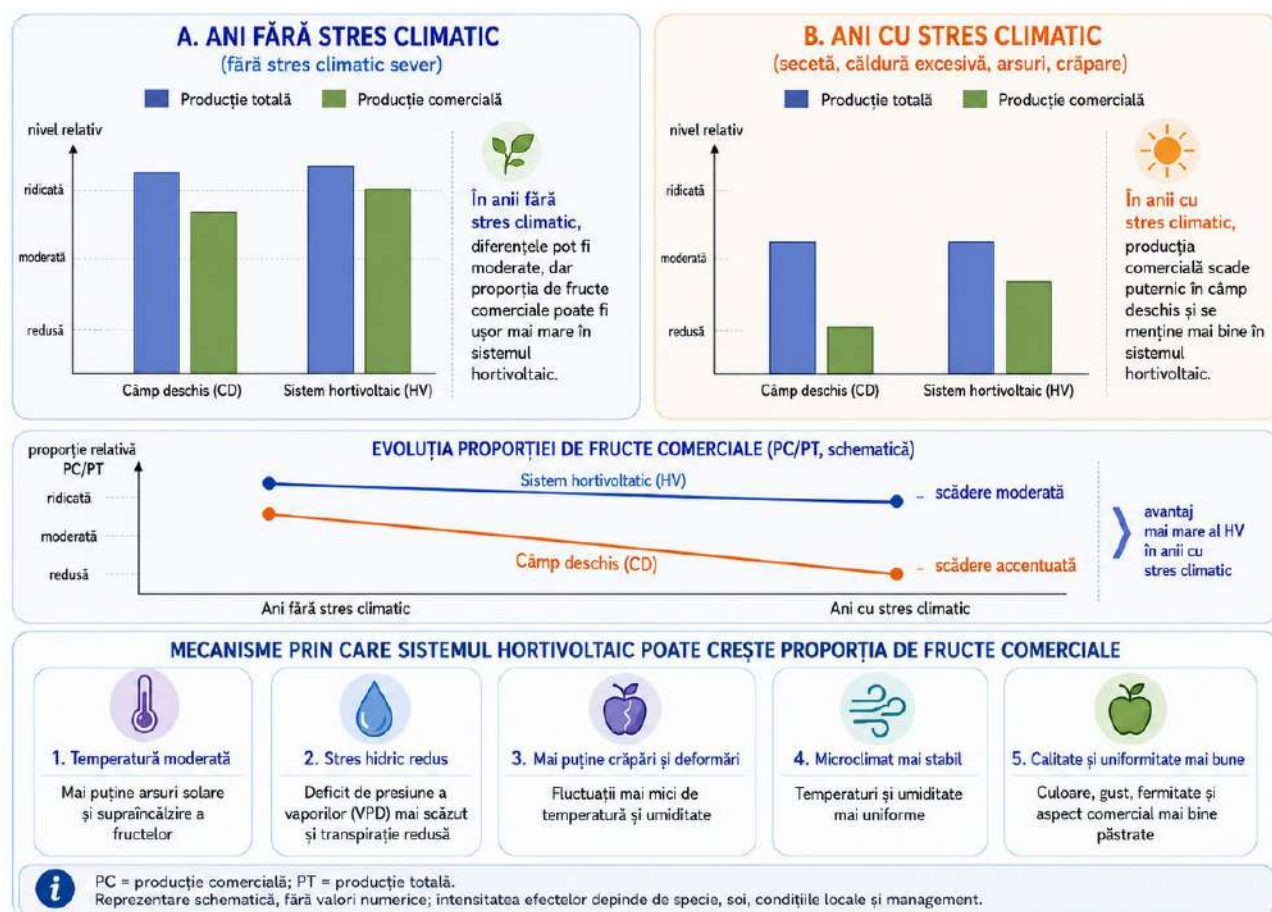


Figura 8.1 – Reprezentare schematică a relației dintre producția totală și producția comercială în condiții fără stres climatic sever și în ani cu stres climatic (sursa: elaborare proprie)

În livrezile moderne, valoarea economică este influențată puternic de proporția fructelor valorificabile. Un sistem poate produce o cantitate totală de fructe ușor mai scăzută decât o livadă neacoperită cu panouri fotovoltaice, dar poate genera o valoare comercială mai mare dacă reduce arsurile solare, pierderile climatice și procentul de fructe declasate (Racsko și Schrader, 2012; Gambetta și colab., 2021; Magarelli și colab., 2024).

Recomandarea practică este simplă: performanța agronomică se evaluează comparativ cu o variantă martor neacoperită și, pe cât posibil, pe mai mulți ani. La culturile perene, un singur sezon favorabil nu demonstrează compatibilitatea sistemului, deoarece efectele asupra diferențierii mugurilor, acumulării rezervelor și echilibrului vegetativ pot deveni vizibile abia în sezonul următor (Lakso și Corelli Grappadelli, 1992; Tromp, 2005).

Tabelul 8.1 – Indicatori recomandați pentru evaluarea performanței productive în sistemele hortivoltaice (sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

Indicator	Ce reflectă	De ce este important
 Producția pe plantă (kg/plantă)	Răspunsul individual al plantei la sistem	Permite compararea directă a performanței biologice
 Producția la unitatea de suprafață (t/ha)	Productivitatea globală a sistemului	Indicator esențial pentru analiza economică
 Numărul de fructe	Intensitatea fructificării	Ajută la separarea efectelor asupra legării fructelor de cele asupra creșterii fructelor
 Greutatea medie a fructului	Dezvoltarea individuală a fructelor	Indicator important pentru valoarea comercială
 Distribuția pe clase de calibru	Uniformitatea și calitatea producției	Determină atractivitatea comercială și prețul de valorificare
 Procentul de fructe comerciale (%)	Producția efectiv valorificabilă	Adesea mai important decât producția totală
 Procentul de fructe depreciate (%)	Impactul factorilor climatici și fiziologici	Permite evaluarea beneficiilor de protecție oferite de SHV
 Uniformitatea maturării	Omogenitatea producției	Influențează eficiența recoltării și calitatea loturilor comerciale
 Stabilitatea producției între ani	Reziliența sistemului la variabilitatea climatică	Indicator-cheie pentru culturile perene
 Evoluția multianuală a producției	Efectele cumulative asupra potențialului productiv	Evidențiază eventuale efecte întârziate ale SHV asupra diferențierii mugurilor și acumulării rezervelor

8.2. Calitatea fructelor și valoarea comercială

În horticultură, calitatea comercială poate fi la fel de importantă ca producția totală (Kader, 2002; Racsko și Schrader, 2012; Magarelli și colab., 2024). SHV pot influența culoarea fructelor, fermitatea, conținutul de zaharuri, aciditatea, calibrul, uniformitatea maturării și incidența defectelor fiziologice sau climatice.

Un efect favorabil urmărit frecvent este reducerea arsurilor solare. În perioadele cu radiație intensă și temperaturi ridicate, suprafața fructelor poate atinge temperaturi critice, ceea ce duce la deprecierea comercială a producției (Schrader și colab., 2001; Glenn și colab., 2002; Racsko și Schrader, 2012; Gambetta și colab., 2021). În livezile de măr, arsurile solare apar ca urmare a interacțiunii dintre radiația solară intensă, temperatura ridicată a fructului și sensibilitatea țesuturilor expuse (Schrader și colab., 2003; Schrader și colab., 2008).

Studiile recente pe măr, în sisteme agrivoltaice dinamice, au arătat că umbrirea aplicată în perioadele cu radiație și temperatură ridicată poate reduce temperatura suprafeței fructelor și incidența arsurilor solare, fără modificări evidente ale diametrului fructelor în datele raportate (Lopez și colab., 2025). Protecția climatică rămâne însă utilă doar dacă nu se obține prin reducerea excesivă a luminii.

La speciile și soiurile la care culoarea comercială depinde de radiație, umbrirea prea puternică poate afecta sinteza antocianilor, colorarea, acumularea zaharurilor și uniformitatea maturării (Reay, 2001; Mupambi și colab., 2018).

În practică, succesul unui SHV nu se judecă doar prin cantitatea recoltată, ci prin capacitatea sistemului de a menține simultan producția și calitatea comercială în condiții climatice dificile. În plus, evaluarea calității trebuie făcută obiectiv, prin indicatori precum calibrul, fermitate, culoare, conținut de zaharuri, aciditate, substanță uscată, procent de fructe cu arsuri și procent de fructe declasate.

8.3. Stabilitatea producției și reducerea pierderilor climatice

Una dintre cele mai importante perspective moderne asupra SHV este stabilizarea producției în contextul schimbărilor climatice. Valurile de căldură, arsurile solare, seceta, grindina și ploile excesive pot reduce proporția fructelor comerciale chiar și în plantații cu tehnologie avansată. În aceste condiții, SHV pot funcționa ca infrastructură de reducere a riscului climatic.

La anumite specii, procentul de fructe comercializabile poate fi sporit prin reducerea incidenței arsurilor solare și diminuarea efectelor stresului termic. La altele, protecția împotriva grindinei, ploilor sau crăpării fructelor poate avea un impact economic mai mare decât creșterea directă a producției. Din acest motiv, SHV trebuie analizate și ca instrumente de reducere a riscului agricol, nu doar ca tehnologii de creștere a producției.

8.4. Diferențe între specii horticole

Răspunsul culturilor horticole diferă semnificativ în funcție de specie, soi, climat și obiectivul comercial al producției. De aceea, rezultatele trebuie interpretate separat pentru fiecare cultură, fără generalizări directe de la o specie la alta (Magarelli și colab., 2024).

La măr, interesul principal este reducerea arsurilor solare și menținerea calității comerciale în perioadele cu temperaturi ridicate (Racsko și Schrader, 2012; Magarelli și colab., 2024). La soiurile intens colorate trebuie urmărite atent efectele asupra culorii și acumulării zaharurilor (Lakso și Corelli Grappadelli, 1992; Tromp, 2005). La păr, sistemele cu panouri semitransparente pot menține o calitate comercială acceptabilă, dar rezultatele recente indică posibilitatea reducerii producției în anumite condiții (Reher și colab., 2025). În cazul cireșului, integrarea în sisteme hortivoltaice poate fi justificată prin necesitatea protejării culturii față de ploi, grindină și arsuri solare, însă cerințele ridicate față de lumină impun utilizarea unor configurații cu transmisie luminoasă bună și ventilație adecvată (Magarelli și colab., 2024).

Afinul și căpșunul pot avea potențial în regiunile cu stres termic și deficit hidric, unde reducerea evapotranspirației și moderarea temperaturii pot deveni avantaje importante (Barron-Gafford și colab., 2019; Weselek și colab., 2019; Magarelli și colab., 2024). În cazul căpșunului, compatibilitatea cu sistemele hortivoltaice este influențată și de caracteristicile biologice ale soiului, răspunsul la umbrirea parțială putând varia între soiuri (Dragomir și colab., 2025).

Kiwi prezintă interes prin sensibilitatea la radiația solară intensă și supraîncălzire, iar alunul poate fi analizat în anumite configurații, deoarece fructul nu depinde de colorare vizuală intensă (Magarelli și colab., 2024). În toate cazurile, obiectivul principal trebuie stabilit înaintea proiectării: protecție climatică, reducerea stresului termic, stabilizarea producției, protecție împotriva grindinei, integrare energetică sau autoconsum (Toledo și Scognamiglio, 2021; IEA PVPS, 2025).

8.5. Studii experimentale și interpretarea rezultatelor

Rezultatele publicate până în prezent confirmă că SHV pot produce efecte favorabile în anumite condiții și la anumite specii horticole, dar interpretarea trebuie făcută cu prudență. Sistemele diferă prin tipul panourilor, mobilitate, densitate, transparentă, climat și specie. Tocmai aceste diferențe pot schimba substanțial răspunsul culturii.

Un studiu pe măr sub sistem agrivoltaic dinamic a arătat reducerea temperaturii fructelor și diminuarea arsurilor solare, fără diferențe evidente de diametru al fructelor în datele raportate (Lopez și colab., 2025). În Belgia, cercetările pe păr sub panouri semitransparente au arătat menținerea

unor indicatori de calitate, dar și reducerea constantă a producției față de martor în mai mulți ani (Reher și colab., 2025). În Australia, sistemele fixe cu panouri netransparente la părul bicolor au redus unele daune climatice, dar au afectat negativ producția, culoarea fructelor și unii indicatori de calitate (Scalisi și colab., 2026).

Aceste rezultate arată că datele obținute într-o regiune sau într-o cultură nu trebuie transferate automat către alte condiții. Studiile de caz trebuie interpretate ca exemple de adaptare și optimizare, nu ca modele universal aplicabile. În culturile perene, monitorizarea multianuală este esențială, deoarece sistemul poate influența atât producția prezentă, cât și potențialul productiv al sezoanelor următoare.

Impactul SHV asupra producției horticole nu poate fi redus la relația simplă dintre lumină și producție. În horticultură, performanța trebuie analizată prin producția totală, calitatea fructelor, procentul de fructe comerciale, pierderile din cauze de natură climatică, prin stabilitatea producției și prin rentabilitatea economică.

În multe situații, valoarea reală a SHV nu constă în creșterea directă a producției, ci în reducerea riscului climatic și în menținerea unei producții comerciale stabile în condiții de variabilitate climatică ridicată. Pentru cultivator, întrebarea-cheie nu este doar „cât produce cultura sub panouri?”, ci „cât din producție rămâne valorificabilă, stabilă și economic justificată?”.

Capitolul 9.

Managementul culturii sub panouri

9.1. Managementul apei și fertilizării

În sistemele hortivoltaice, managementul apei nu se stabilește doar prin estimarea reducerii radiației sau a evapotranspirației. Panourile pot diminua cererea evaporativă prin umbră parțială și moderarea temperaturii, dar modifică simultan și modul în care apa ajunge la sol și la rădăcini. De aceea, irigarea nu trebuie menținută automat la același regim ca într-o plantație convențională, dar nici redusă arbitrar fără măsurători locale (Marrou și colab., 2013; Elamri și colab., 2018; Adeh și colab., 2018; Barron-Gafford și colab., 2019). Necesarul real de apă trebuie evaluat prin corelarea evapotranspirației, umidității solului, precipitației efective și răspunsului plantei (Allen și colab., 1998; Adeh și colab., 2018; Barron-Gafford și colab., 2019).

Un punct critic este precipitația efectivă. Precipitația totală măsurată la stația meteorologică nu descrie întotdeauna corect apa disponibilă pentru cultură, deoarece panourile interceptează o parte din ploaie și o pot redistribui către marginea inferioară a modulelor.

Astfel, sub panouri pot apărea zone mai uscate, iar la liniile de scurgere pot apărea zone cu aport concentrat de apă (figura 9.1).

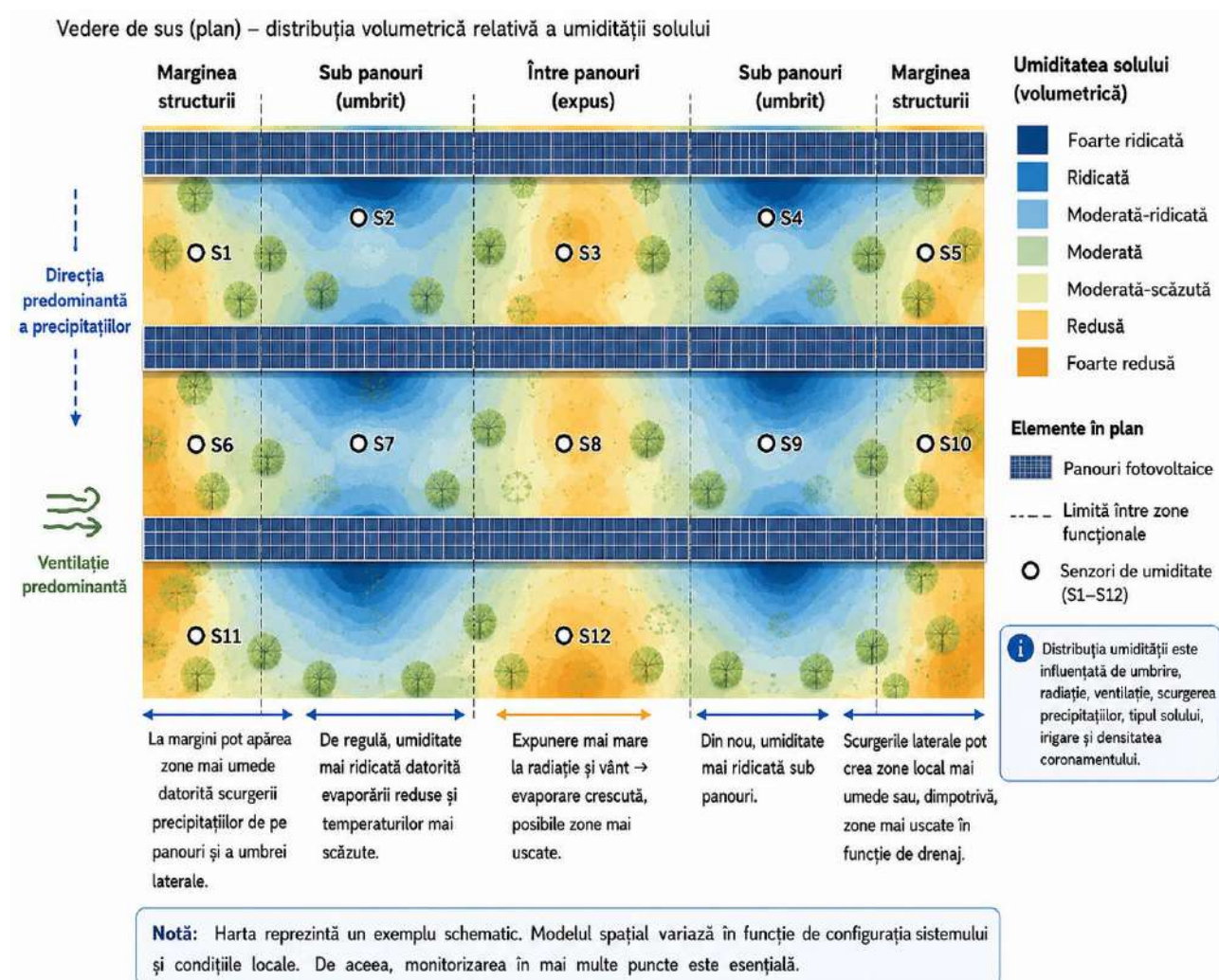


Figura 9.1 – Variabilitatea spațială a umidității solului într-un SHV (sursa: elaborare proprie)

Această redistribuire poate fi importantă mai ales în structurile cu suprafețe continue, în sistemele joase sau în plantațiile în care rândurile productive se află parțial sub zona acoperită de panouri (Elamri și colab., 2018).

În consecință, în SHV trebuie diferențiate trei noțiuni: precipitațiile totale, precipitațiile interceptate de panouri și precipitațiile ajunse efectiv în zona radiculară. Pentru plantă contează ultima dintre acestea. O perioadă cu precipitații aparent suficiente poate fi totuși asociată cu deficit hidric local dacă apa nu ajunge uniform la rădăcini. Dimpotrivă, zonele de scurgere de la marginea panourilor pot primi cantități mai mari de apă decât restul parcelei, ceea ce poate favoriza băltirea temporară, levigarea locală sau dezvoltarea neuniformă a rădăcinilor (Elamri și colab., 2018; Marrou și colab., 2013; Baiamonte și colab., 2023).

Managementul irigației trebuie adaptat acestei variabilități spațiale (tabelul 9.1). Amplasarea liniilor de picurare, debitul picurătorilor, frecvența udărilor și poziția senzorilor de umiditate a solului trebuie stabilite în funcție de zonele create de structură: sub panouri, la marginea de scurgere, între panouri, pe rândul de plante și în martorul neacoperit. În multe situații, o singură măsurătoare medie a umidității solului nu este suficientă, deoarece poate masca alternanța dintre zone cu deficit și zone cu exces de apă (Elamri și colab., 2018; Marrou și colab., 2013; IEA PVPS, 2025). Pentru culturile horticoale intensive, monitorizarea pe adâncimi diferite este importantă deoarece rădăcinile active nu folosesc uniform întregul volum de sol (Gregory, 2006; Allen și colab., 1998).

Tabelul 9.1 – Ajustarea irigației și fertilizării în funcție de microclimatul creat de sistemul hortivoltaic
(sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

SITUAȚIE SUB SISTEM (efect microclimatic tipic)	CE SE MODIFICĂ (față de situația în câmp deschis)	RISC DACĂ NU AJUSTEZI	ADAPTARE RECOMANDATĂ (irigare și fertilizare)
 Radiație și temperatură mai scăzute → evapotranspirație (ET) redusă	 Necesarul de apă al culturii poate scădea (orientativ) Depinde de specie, sezon, grad de umbră, LAI, vânt, tip de sol și stadiu fenologic.	 - exces de apă în sol - asfixie radiculară (hipoxie) - săruri/nutrienți spălați (levigare) - risc fitosanitar crescut	 - redu frecvența udării și/sau debitul - ajustează pe baza ETc reală (meteo + cultură) - validează cu senzori de umiditate a solului - menține tensiunea în zona optimă (fără stres)
 Umiditate relativă mai mare → durată mai mare de umezire a frunzelor și fructelor	 Risc fitosanitar crescut (boli fungice, bacteriene) Depinde de specie, temperatură, ventilație și durata umezirii.	 - apariția bolilor (frunze, flori, fructe) - monilioză, Botrytis, făinare etc. - reducerea creșterii și a calității fructelor	 - evită udările târzii (după-amiaza/seara) - reducă durata udării - asigură ventilația adecvată a sistemului - îngrijă doar când este necesar (după senzori)
 Sol cu textură fină sau drenaj slab → percolare redusă	 Apa se acumulează în profilul de sol în special în stratul superior.	 - hipoxie radiculară - reducerea absorbției apei și nutrienților - dezvoltare radiculară superficială - spălarea nutrienților (levigare locală)	 - irigă în impulsuri scurte și frecvente - doze mici ajustate tehnic la zona radiculară - nu rămâne saturat (evită hipoxia) - monitorizează umiditatea pe adâncime - verifică drenajul funcțional
 Neajustarea volumului de apă în fertilizare → concentrație radiculară a nutrienților crește	 Concentrația soluției din sol (EC, săruri, pH) crește Absorbția dezechilibrată devine neuniformă și inadecvată.	 - stres salin / dezechilibru nutritiv - arsuri radiculare - blocaje de elemente (ex. Ca-B, Fe-Mn) - reducerea creșterii și a calității fructelor	 - ajustează EC și pH în funcție de volumul real de apă - dozează proporțional (mg/L sau g/L) - fertilizare fracționată (doze mici, dese) - calibrează periodic injector/sonde și senzori
 Tracking / umbră variabilă (in funcție de oră, zi, anotimp) → cerere de apă variabilă	 Fluctuații ale ET și ale consumului de apă pe parcursul zilei și pe parcursul sezonului.	 - stres hidric intermitent - reducerea creșterii și a calității - utilizare ineficientă a apei și nutrienților	 - program dinamic de irigare/fertilizare pe baza datelor meteo + senzori sol + cultură - ajustează după fenologie și încălcarea de fructe - integrează cu sistemul de monitorizare (automat)
MONITORIZARE ESENȚIALĂ  Umiditatea solului (pe strat/volum)  Temperatura și umiditatea aerului  Radiația solară (PAR/globală)  Debit și volumul de apă aplicate  EC și pH soluție sol CONTROL ȘI AUTOMATIZARE (decizii bazate pe date)  Colectare (senzori/fertilizare)  Analiză date decizii (ETc, sol, microclimă)  Alerte și notificări  Integreare cu operare practică REZULTATE AȘTEPTATE - Utilizare eficientă a apei și nutrienților - Reducerea stresului hidric și salin - Creșterea productivității și a calității - Reducerea bolilor și a pierderilor			
 În sistemele hortivoltaice, irigarea și fertilizarea nu se reduc automat. Se calibrează pe baza microclimatului real, a umidității solului, a drenajului și a răspunsului culturii.			

Fertilizarea trebuie, de asemenea, corelată cu noua distribuție a apei. Dacă apa se deplasează neuniform, și fertilizantii aplicați prin picurare sau mobilizați de precipitații pot avea o

distribuție neuniformă. În zonele mai uscate, absorbția elementelor nutritive poate fi limitată de lipsa apei, iar în zonele cu aport concentrat pot apărea pierderi prin levigare sau dezechilibre locale. De aceea, programul de fertilizare trebuie ajustat pe baza analizelor de sol, a diagnozei foliare, a conductivității electrice a soluției solului, a umidității măsurate local și a stării fiziologice a plantelor.

În exploatarea hortivoltaje cu acces limitat la apă, managementul irigației devine decisiv pentru fezabilitatea SHV. Reducerea evapotranspirației sub panouri poate fi un avantaj real, dar acest avantaj scade sau se poate pierde dacă precipitația efectivă în zona rădăcinilor este redusă, iar cultura devine mai dependentă de irigare.

În astfel de cazuri, este recomandat ca proiectarea să ia în calcul colectarea sau dirijarea apei de pe panouri, protejarea zonelor de scurgere, evitarea eroziunii locale și dimensionarea realistă a sursei de apă.

Un SHV nu trebuie evaluat doar prin energia produsă și prin reducerea stresului termic, ci și prin capacitatea de a menține o alimentare cu apă uniformă și controlabilă pentru cultură (Marrou și colab., 2013; Elamri și colab., 2018; Barron-Gafford și colab., 2019; Baiamonte și colab., 2023; IEA PVPS, 2025).

9.2. Formarea coroanei, efectuarea tăierilor de întreținere și managementul luminii

În livezile hortivoltaje, managementul coroanei devine mai important decât în sistemele convenționale. Panourile introduc o sursă suplimentară de umbră peste umbra produsă natural de coronament. Dacă structura fotovoltaică reduce deja radiația disponibilă, iar coroana este prea viguroasă sau prea densă, lumina poate deveni insuficientă pentru menținerea calității și pentru colorarea fructelor, precum și pentru formarea mugurilor de rod (Lakso și Corelli Grappadelli, 1992; Tromp, 2005; Weselek și colab., 2019; Magarelli și colab., 2024).

În SHV, tăierile nu mai trebuie privite doar ca lucrări pentru reglarea raportului dintre componenta vegetativă și cea productivă, ci și ca instrumente de management al luminii și ventilației. Formele de conducere înguste, aerisite și relativ plane, cum sunt axele verticale, gardul fructifer, coroanele bidimensionale sau formele de tip V/Y, pot fi mai compatibile cu sistemele hortivoltaje deoarece permit o distribuție mai uniformă a luminii și o ventilație mai bună a zonei productive (Jackson, 1980; Wünsche și Lakso, 2000). Coroanele voluminoase și compacte pot accentua deficitul de lumină, maturarea neuniformă, colorarea insuficientă și umiditatea ridicată în interiorul coronamentului. În astfel de situații, tăierile în verde devin esențiale: eliminarea lăstarilor lacom, rădăcirea zonelor dense, controlul vigoriei și menținerea unei zone productive bine iluminate.

La speciile și la soiurile pentru care culoarea este un criteriu comercial major, managementul coroanei trebuie corelat cu evaluarea regimului de lumină și a calității fructelor la recoltare.

O greșeală frecventă este transferul direct al unor sisteme dezvoltate pentru alte climate, alte specii sau alte tipuri de livezi, fără adaptare la condițiile locale (Weselek și colab., 2019; Toledo și Scognamiglio, 2021; Zhang și colab., 2025). În SHV, obiectivul tăierilor trebuie să fie menținerea unei iluminări suficiente și a unei ventilații eficiente în zona productivă (Lakso și Corelli Grappadelli, 1992; Tromp, 2005; Magarelli și colab., 2024).

9.3. Managementul fitosanitar și monitorizarea biologică

Modificările microclimatice produse de SHV pot influența presiunea bolilor și dăunătorilor. Reducerea stresului radiativ poate îmbunătăți starea fiziologică a plantelor, dar creșterea umidității relative, ventilația mai slabă și uscarea mai lentă a frunzelor pot favoriza anumite boli, mai ales în cazul unui coronament dens sau în zonele slab ventilate (Barron-Gafford și colab., 2019; Weselek și colab., 2021; Rowlandson și colab., 2015; Magarelli și colab., 2024). Prin urmare, strategia fitosanitară nu trebuie transferată automat din plantațiile convenționale.

După instalarea panourilor, monitorizarea trebuie realizată separat sub panouri, între panouri, în zonele periferice și în varianta martor. Această diferențiere contează deoarece microclimatul nu este uniform. Zonele cu umiditate persistentă, ventilație redusă sau distribuție neuniformă a apei pot deveni puncte sensibile pentru boli foliare, boli radiculare sau focare locale de dăunători (tabelul 9.2; Elamri și colab., 2018; Weselek și colab., 2021; Rowlandson și colab., 2015; IEA PVPS, 2025).

Pentru bolile dependente de umiditate, cei mai utili indicatori sunt umiditatea relativă, temperatura, durata de umezire a frunzelor, circulația aerului și densitatea coronamentului.

Totodată, structura sistemului poate modifica eficiența tratamentelor fitosanitare. Panourile, stâlpii și modificarea curenților de aer pot influența distribuția jetului produs de atomizoare (Cross și colab., 2001; Gil și colab., 2007). De aceea, după instalarea SHV este recomandată recalibrarea echipamentelor de tratament și verificarea acoperirii cu hârtie hidrosensibilă.

Tabelul 9.2 – Riscuri fitosanitare potențiale în sistemele hortivoltaice și aspecte de monitorizat (sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

CONDIȚIE FAVORIZATĂ ÎN SHV	RISC FITOSANITAR POSIBIL	CE TREBUIE MONITORIZAT PRACTIC
 Umiditate relativă mai ridicată și uscarea mai lentă a frunzelor	Boli fungice foliare, în special în coronamente dense	Durata de umezire a frunzelor, simptome foliare, aerisirea coroanei
 Ventilație redusă în zonele dense ale culturii	Persistența condensului și dezvoltarea focarelor locale	Interiorul coronamentului, zone slab aerisite, marginile structurii
 Distribuție neuniformă a apei și a umidității solului	Boli radiculare sau stres localizat	Umiditatea solului pe zone, drenajul, simptome de ofilire sau declin
 Reducerea radiației directe	Presiune diferită a agenților patogeni față de martor	Evoluția bolilor sub panouri comparativ cu zona neacoperită
 Modificarea temperaturii în coronament	Schimbarea dinamicii unor dăunători	Monitorizarea dăunătorilor pe zone și pe fenofaze
 Obstacole structurale pentru tratamente	Acoperire neuniformă cu produse fitosanitare	Verificarea distribuției tratamentelor, inclusiv cu hârtie hidrosensibilă

Efectele asupra dăunătorilor pot fi variabile, deoarece temperatura, lumina și umiditatea influențează dinamica insectelor, acarienilor, polenizatorilor și entomofaunei utile (Bale și colab., 2002; Thomson și colab., 2010; Weselek și colab., 2019). De aceea, combaterea trebuie bazată pe monitorizare și avertizare locală, nu doar pe scheme calendaristice standard. În SHV, succesul managementului fitosanitar depinde de integrarea dintre microclimat, tăieri, ventilație, avertizare fitosanitară și adaptarea tehnologiei de tratament.

9.4. Adaptarea tehnologiei horticole și integrarea operațională

Un SHV nu este o plantație convențională peste care s-au montat panouri fotovoltaice. După instalarea structurii, întreaga tehnologie horticolă trebuie recalibrată în funcție de noul microclimat și de noile tehnologii de management al plantației, precum irigarea și fertirigarea, tăierile, managementul luminii, strategia fitosanitară, mecanizarea, monitorizarea climatică și organizarea lucrărilor.

În plantațiile existente, integrarea sistemului este mai dificilă deoarece distanțele de plantare, forma de conducere, culoarele tehnologice și infrastructura de irigare au fost deja stabilite. În plantațiile noi, proiectarea simultană a livezii și a SHV permite optimizarea distanțelor, înălțimii structurii, poziției stâlpilor, arhitecturii coroanei și accesului utilajelor. Din acest motiv, proiectele noi

au un potențial mai mare de integrare tehnologică decât intervențiile aplicate ulterior într-o plantație deja formată (Toledo și Scognamiglio, 2021; Hickey, 2024; IEA PVPS, 2025).

Una dintre cele mai frecvente greșeli este ignorarea mecanizării în etapa de proiectare (figura 9.2). Structurile prea joase, stâlpii amplasați necorespunzător sau densitatea excesivă a panourilor pot limita sever lucrările efectuate în livadă și eficiența exploatației (Hickey, 2024; IEA PVPS, 2025).

Tehnologia convențională trebuie folosită doar ca punct de plecare, deoarece, după instalarea SHV, managementul trebuie ajustat pe baza monitorizării locale, a observațiilor fenologice, a analizelor foliare, a evaluării producției și a comparației cu martorul.

Prin urmare, managementul culturii sub panouri trebuie să fie mai precis și mai bine monitorizat decât într-o plantație convențională. După instalarea SHV, apa, lumina, ventilația, temperatura și distribuția umidității se modifică simultan. Tehnologia horticola trebuie adaptată la aceste schimbări, nu doar continuată după schema anterioară.

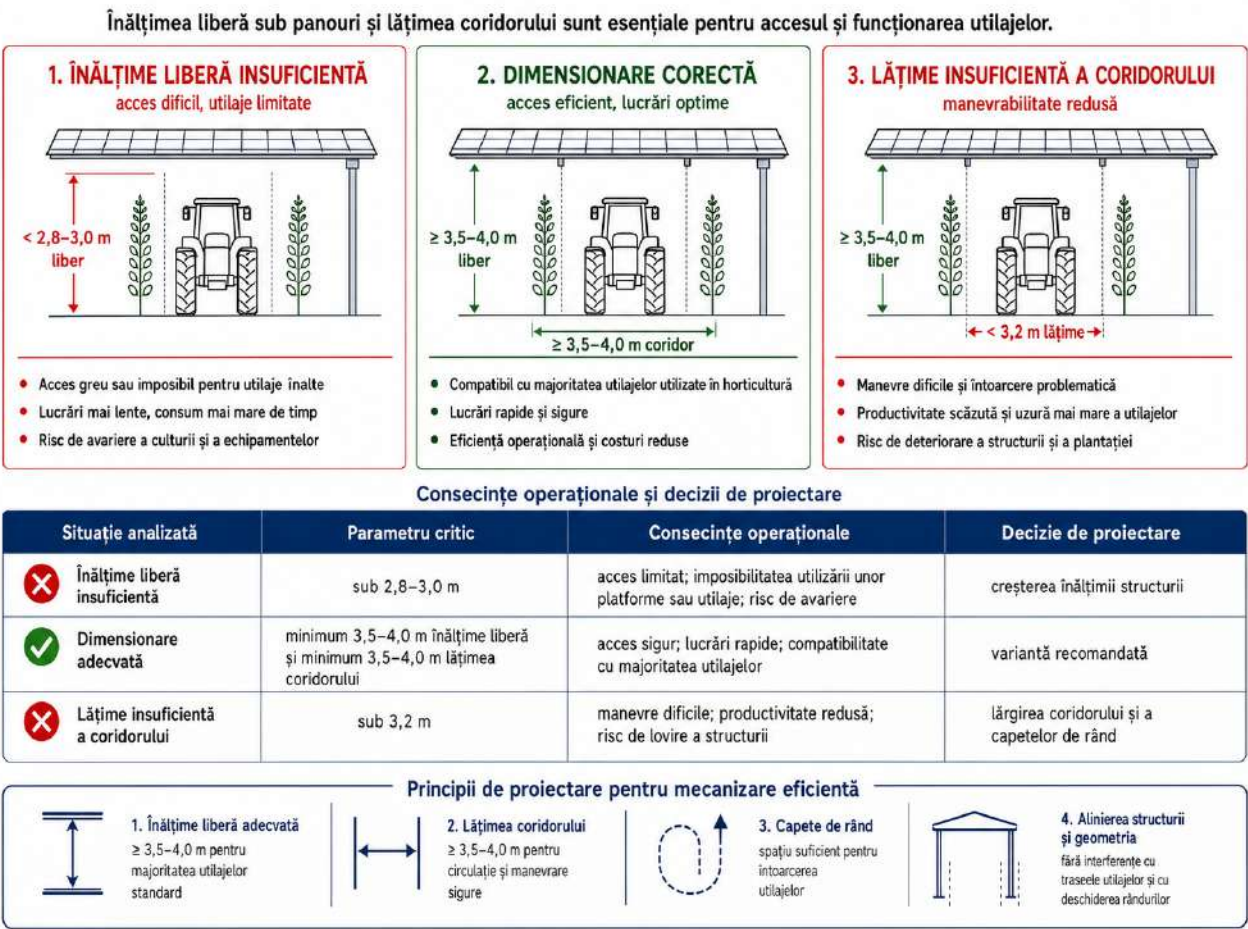


Figura 9.2 – Compatibilitatea mecanizării cu infrastructura hortivoltaică (sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

Succesul sistemului nu depinde doar de infrastructura energetică, ci de integrarea dintre componenta fotovoltaică, managementul agronomic, monitorizarea climatică, sistemul de cultură și adaptarea locală a lucrărilor. În practică, SHV performante sunt cele în care producția energetică și managementul horticola funcționează împreună și sunt ajustate pe baza răspunsului real al culturii.

Capitolul 10.

Componenta energetică

10.1. Rolul componentei energetice în sistemele hortivoltaice

Într-un SHV, componenta energetică nu poate fi analizată separat de cultură și de funcționarea biologică a plantației. Spre deosebire de un parc fotovoltaic convențional, unde obiectivul principal este maximizarea producției de energie pe unitatea de suprafață, într-o livadă hortivoltaică energia trebuie produsă în interiorul unor limite agronomice. Panourile și cultura utilizează aceeași resursă fundamentală, radiația solară, iar orice decizie privind densitatea panourilor, gradul de acoperire, orientarea sau înălțimea structurii influențează simultan producția energetică, distribuția luminii, microclimatul, producția horticola și calitatea fructelor (Dupraz și colab., 2011; Weselek și colab., 2019).

În horticultură, componenta energetică trebuie privită ca parte integrată a exploatației, nu ca infrastructură independentă suprapusă peste cultură. Obiectivul nu este instalarea celui mai mare număr posibil de panouri, ci obținerea unui echilibru funcțional între producția energetică, lumina disponibilă pentru cultură, protecția climatică, mecanizare, rentabilitate economică și stabilitatea producției horticole (Fraunhofer ISE, 2022).

Această diferență este esențială deoarece multe erori apar atunci când sistemele sunt proiectate după logica unui parc fotovoltaic convențional, nu după logica unei exploatații horticole. În SHV, energia produsă are valoare reală doar dacă sistemul menține funcția agricolă a terenului și nu reduce performanța culturii sub limite acceptabile.

10.2. Estimarea producției energetice

Estimarea producției energetice reprezintă una dintre etapele fundamentale ale proiectării unui SHV. Totuși, în horticultură această estimare trebuie corelată permanent cu efectele asupra culturii. Producția de energie depinde de radiația solară anuală și sezonieră, orientarea și înclinarea panourilor, temperatura modulelor, umbririle reciproce, eficiența inverterului, pierderile electrice și densitatea structurii. În SHV, aceiași factori influențează și lumina disponibilă pentru cultură, ceea ce face necesară o evaluare integrată (figura 10.1; IEA PVPS, 2025).

În sistemele moderne, simularea energetică începe să fie integrată cu simularea distribuției luminii și cu modelarea microclimatului. Astfel, producția energetică nu mai este analizată separat, ci împreună cu răspunsul culturii și cu performanța întregului sistem agro-energetic. Instrumentele de modelare fotovoltaică pot estima producția de energie, dar în SHV este necesară și estimarea radiației care ajunge la cultură (Pascaris, 2023; IEA PVPS, 2025). Performanța energetică trebuie exprimată prin mai mulți indicatori (tabelul 10.1): energia produsă anual, producția specifică raportată la puterea instalată, energia produsă pe unitatea de suprafață, gradul de autoconsum, raportul dintre energia produsă și consumul fermei și, atunci când se analizează utilizarea duală a terenului, Land Equivalent Ratio. Indicatorul LER permite compararea utilizării combinate agricultură–energie cu scenariile în care agricultura și producția fotovoltaică sunt separate (Dupraz și colab., 2011).

O putere instalată mai mare nu înseamnă automat un SHV mai bun. Creșterea densității panourilor poate mări producția energetică, dar poate aduce umbrire excesivă, distribuție neuniformă a luminii, dificultăți de mecanizare, reducerea calității fructelor, ventilație insuficientă sau probleme fitosanitare. De aceea, performanța energetică trebuie interpretată împreună cu performanța agronomică.

Energia produsă de SHV este determinată de resursa solară locală, de configurația tehnică a sistemului – orientare, înclinare, densitate și tipul modulelor–și de eficiența echipamentelor în condiții reale de funcționare.

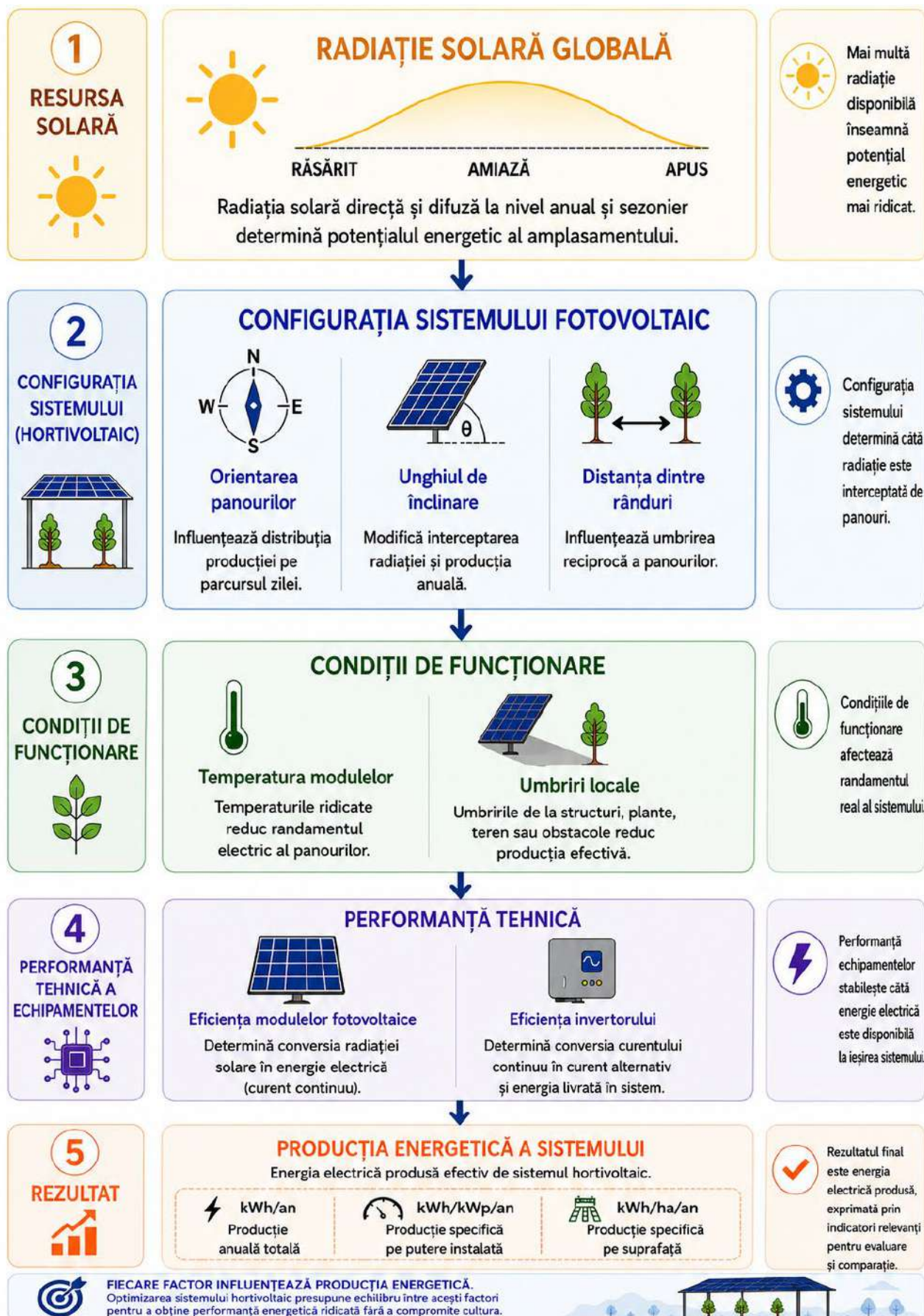


Figura 10.1 – Principali factori care influențează producția energetică (sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

*Tabelul 10.1 – Indicatori utilizați în evaluarea performanței energetice
(sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)*

INDICATOR	CE ARATĂ PRACTIC	IMPORTANȚĂ ÎN SISTEMELE HORTIVOLTAICE
 kWh/an	 producția totală de energie	> estimează contribuția energetică anuală a sistemului.
 kWh/kWp/an	 eficiența instalației	> permite compararea performanței sistemelor între locații și instalații independente.
 kWh/ha/an	 eficiența utilizării terenului	> indică câtă energie se produce pe unitatea de suprafață agricolă.
 Grad de autoconsum	 independența energetică a fermei	> arată procentul din energia produsă care este utilizată local.
 LER (Land Equivalent Ratio)	 eficiența utilizării duale a terenului	> compară performanța combinată agricultură + energie cu utilizarea separată a terenului.

10.3. Autoconsum și integrarea energetică în fermă

Într-o exploatare hortică modernă, valoarea energiei produse nu depinde numai de cantitatea de energie generată, ci și de măsura în care aceasta poate fi utilizată direct în fermă. Energia furnizată de SHV poate alimenta pompele pentru irigare și fertilizare, sistemele de prerăcire a fructelor imediat după recoltare, depozitarea în camere frigorifice cu temperatură sau atmosferă controlată, instalațiile de sortare, ambalare și procesare a produselor hortice, precum și stațiile meteo, senzorii, sistemele de automatizare, echipamentele pentru agricultura de precizie și infrastructura de încărcare a utilajelor și echipamentelor electrice. Astfel, componenta energetică se integrează direct în funcționarea exploatarei și poate contribui la reducerea costurilor operaționale și la creșterea valorii adăugate a producției hortice (figura 10.2). Pentru maximizarea beneficiilor economice, energia produsă este recomandat să fie utilizată cât mai aproape de momentul producerii.

O parte dintre consumurile hortice se suprapun în mod firesc peste intervalele cu producție solară ridicată. Irigarea și fertilizarea sunt exemplele cele mai clare, deoarece necesarul lor crește adesea în perioadele însorite și călduroase. Această coincidență poate mări gradul de autoconsum și valoarea economică a energiei produse (Fraunhofer ISE, 2024; IEA PVPS, 2025). Utilizarea energiei produse pentru susținerea acestor activități poate fi mai avantajoasă decât livrarea acesteia în rețea, întrucât reduce achizițiile de energie și expunerea la variațiile de preț.

Cu toate acestea, gradul de autoconsum depinde de programul zilnic al activităților și de posibilitatea planificării unor consumuri în orele cu producție fotovoltaică. Pomparea apei în rezervoare, irigarea, anumite operațiuni de sortare sau încărcarea echipamentelor electrice pot fi programate în timpul zilei, fără a necesita neapărat baterii. Alte consumuri sunt mai puțin flexibile. Camerele frigorifice și instalațiile de păstrare pot funcționa și noaptea sau în perioade cu radiație redusă. În aceste situații devin importante stocarea energiei, acumularea termică, utilizarea unor rezervoare de apă, managementul inteligent al consumului ori integrarea cu rețeaua electrică.

Înainte de dimensionarea SHV este necesară realizarea profilului energetic al fermei. Acesta trebuie să includă consumurile lunare, sezoniere și orare, perioadele de vârf, echipamentele cu funcționare continuă și consumatorii care pot fi programați. Este utilă și separarea consumurilor

critice de cele flexibile, deoarece această diferență influențează atât puterea instalată, cât și nevoia de stocare.

Puterea sistemului nu ar trebui stabilită doar în funcție de suprafața disponibilă pentru amplasarea panourilor, pentru că pot să apară surplusuri dificil de valorificat, iar o producție energetică prea mică poate acoperi doar o parte redusă din necesar. O dimensionare corectă trebuie să urmărească echilibrul între producția estimată, consumul real, posibilitatea planificării unor consumuri, stocarea, racordarea la rețea și dezvoltarea viitoare a exploatației.

Pe scurt, un SHV bine integrat nu urmărește doar să producă multă energie, ci să o furnizeze în momentele și pentru procesele în care aduce cea mai mare valoare fermei.

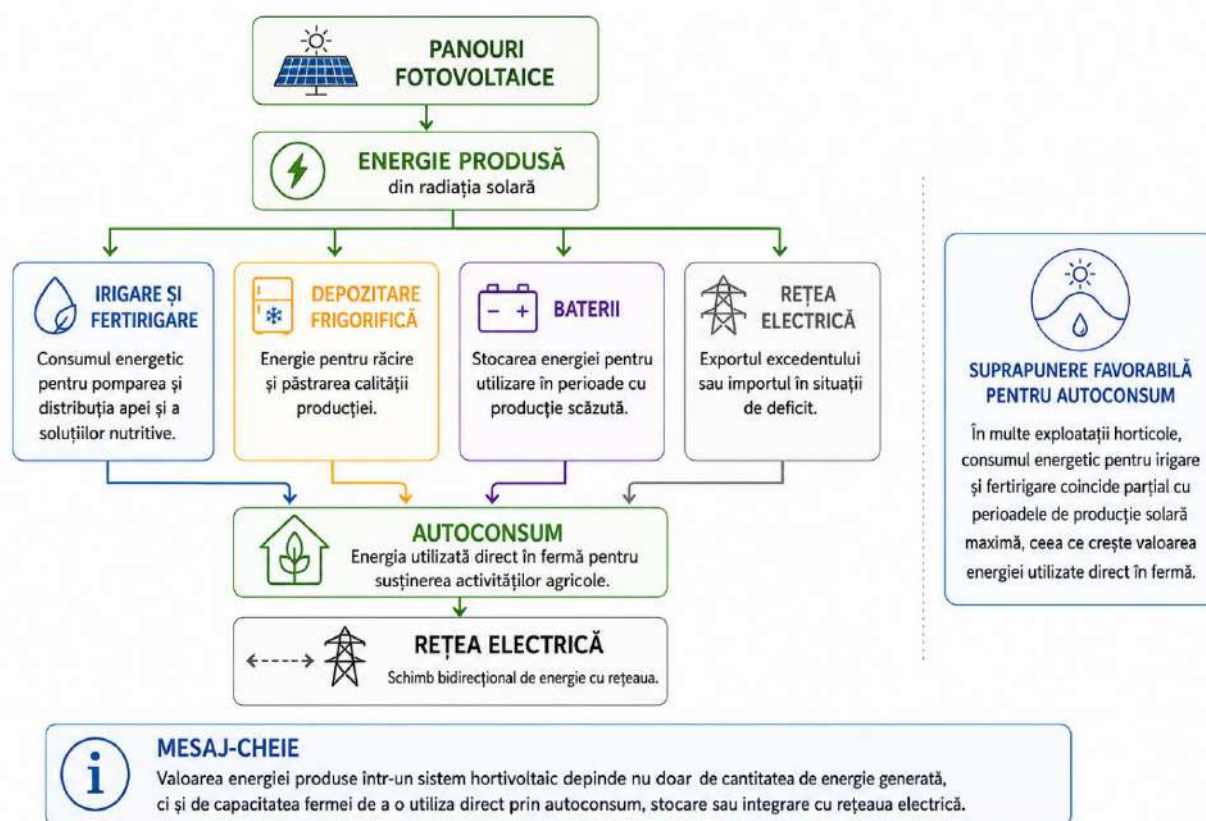


Figura 10.2 – Integrarea producției, consumului și stocării energiei într-o fermă hortivoltaică (sursa: elaborare proprie)

10.4. Dimensionarea sistemului energetic

Dimensionarea unui SHV trebuie realizată gradual și integrat. În horticultură, proiectarea nu începe cu numărul de panouri care pot fi instalate, ci cu cerințele culturii.

Prima etapă este dimensionarea agronomică. Se analizează cantitatea de lumină necesară, gradul acceptabil de umbră, distribuția radiației în coronament și compatibilitatea speciei și a solului cu sistemul propus.

La unele culturi, o umbră moderată poate reduce stresul termic și supraîncălzirea fructelor. La altele, aceeași reducere a luminii poate afecta colorarea, acumularea zaharurilor, diferențierea mugurilor de rod sau uniformitatea maturării. Din acest motiv, limitele agronomice trebuie stabilite înaintea celor energetice (figura 10.3).

Urmează dimensionarea tehnologică și mecanică, etapă în care se stabilesc poziția stâlpilor, înălțimea structurii, culoarele tehnologice, spațiile de manevră și compatibilitatea cu utilajele existente. Sistemul trebuie să permită desfășurarea normală a tăierilor, tratamentelor fitosanitare, irigației, întreținerii solului, recoltării și transportului producției.

Abia după definirea acestor limite se definitivează componenta energetică: numărul și tipul modulelor, puterea instalată, orientarea și înclinarea panourilor, tipul invertorului, schema de conectare electrică, producția estimată și capacitatea de racordare.

Estimarea producției nu trebuie făcută doar la nivel anual. Pentru fermă contează și momentul în care energia este disponibilă. Consumul pentru irigare este concentrat în special în perioadele calde, în timp ce camerele frigorifice pot funcționa și noaptea sau după încheierea recoltării. Această diferență influențează gradul de autoconsum, nevoia de stocare și cantitatea de energie schimbată cu rețeaua.

Ultima etapă este analiza economică, dar aceasta nu se limitează la calcularea perioadei de amortizare. Trebuie luate în considerare investiția inițială, costurile de exploatare, energia utilizată direct, energia livrată în rețea și efectele asupra culturii. În anumite situații, o parte importantă a beneficiului poate proveni din reducerea pierderilor cauzate de arșiță, arsuri solare sau deficit hidric.

În practică, soluția propusă trebuie comparată cu trei scenarii: cultura fără panouri, sistemul fotovoltaic amplasat separat și utilizarea duală a terenului prin SHV, pentru a înțelege dacă integrarea aduce un avantaj real. Dimensionarea corectă înseamnă că SHV produce energie fără să compromită lumina disponibilă, accesul tehnologic și funcția productivă a culturii.

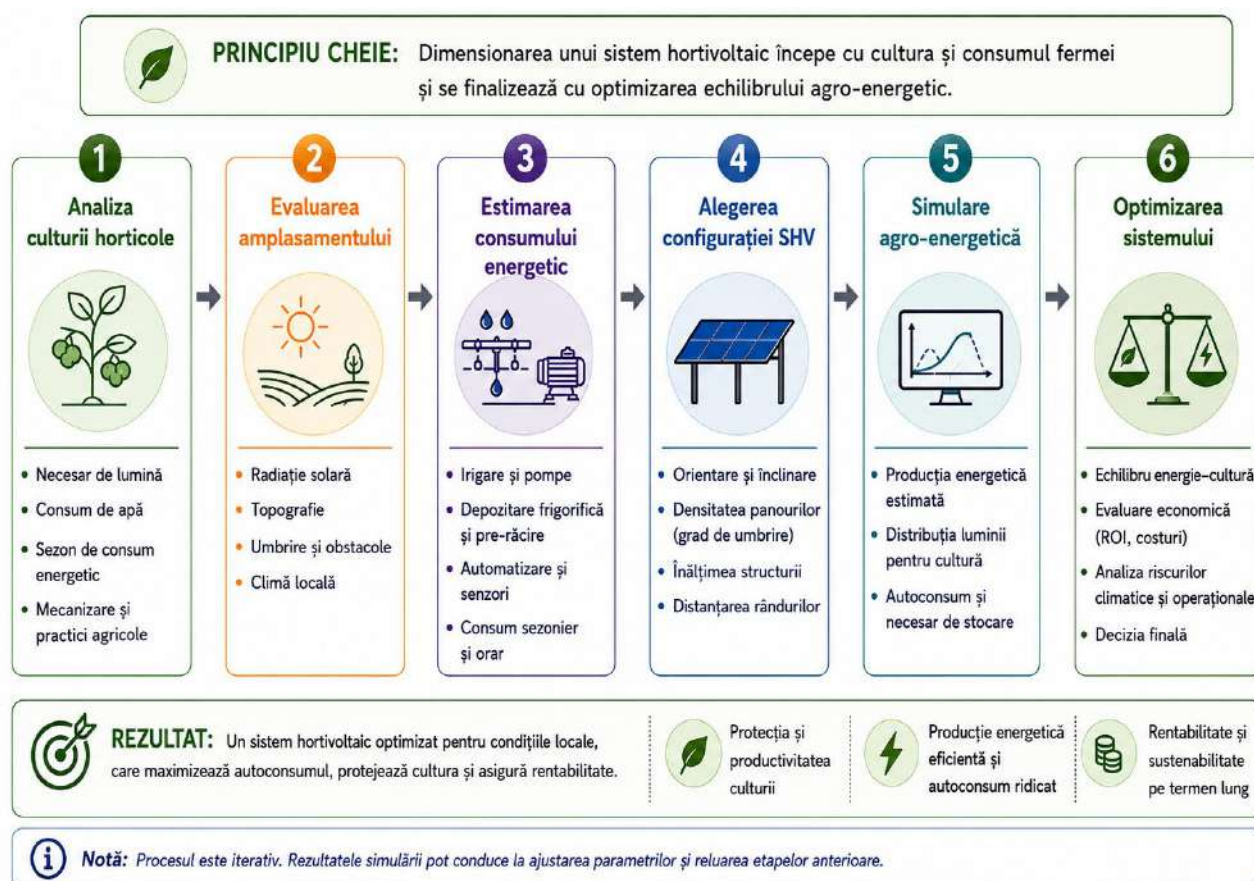


Figura 10.3 – Etapele dimensionării unui SHV
(sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

10.5. Temperatura modulelor și interacțiunea cu microclimatul

În SHV, relația dintre cultură și panouri este bidirecțională. Panourile influențează microclimatul culturii, dar cultura poate influența la rândul ei performanța energetică.

În perioadele foarte calde, temperatura ridicată a modulelor poate reduce randamentul electric, iar evapotranspirația culturii poate contribui la răcirea locală a aerului și poate influența indirect temperatura panourilor (Barron-Gafford și colab., 2019).

Acest aspect contează deoarece SHV funcționează într-un mediu microclimatic diferit de cel al parcurilor fotovoltaice convenționale. În livezi, temperatura modulelor poate fi influențată de evapotranspirația culturii, umiditatea aerului, circulația aerului, densitatea coronamentului, tipul solului și ventilația locală. Totuși, efectul nu trebuie generalizat fără măsurători locale, deoarece depinde de arhitectura sistemului și de condițiile climatice.

Notă tehnică: cultura poate influența indirect performanța energetică a sistemului prin modificarea microclimatului din zona panourilor. Evapotranspirația, umiditatea solului și circulația aerului pot contribui la menținerea unor temperaturi mai reduse ale modulelor fotovoltaice, dar efectul trebuie verificat prin monitorizare locală.

În viitor, integrarea dintre modelarea energetică și modelarea microclimatică va deveni tot mai importantă pentru optimizarea simultană a performanței agricole și energetice.

10.6. Integrarea cu alte sisteme energetice și cu agricultura de precizie

În exploatarea horticolă modernă, SHV pot deveni componente ale unei infrastructuri energetice integrate. Energia produsă poate susține irigarea, fertilizarea, controlul pompelor, refrigerarea, depozitarea, sortarea, monitorizarea climatică și automatizarea unor procese tehnologice. Prioritatea trebuie să fie utilizarea energiei acolo unde aceasta adaugă valoare directă exploatarea și reduce costurile sau riscurile operaționale.

Integrarea energetică trebuie analizată în funcție de profilul real de consum. Pentru unele exploatarea, cea mai eficientă soluție poate fi autoconsumul direct în intervalele cu producție solară ridicată. Pentru altele, pot deveni relevante stocarea, managementul consumurilor critice sau coordonarea irigației și refrigerării cu disponibilitatea energiei. Bateriile, platformele digitale și sistemele inteligente de control sunt utile numai dacă răspund unor nevoi reale și pot fi operate și întreținute corespunzător.

Pe termen lung, SHV pot evolua către platforme agro-energetice integrate, în care producția de energie, monitorizarea microclimatică și managementul culturii funcționează coordonat. În etapa actuală, integrarea trebuie să rămână pragmatică, dimensionată în funcție de consumul exploatarea, valoarea culturii, disponibilitatea apei și capacitatea de operare a sistemului.

Componenta energetică a unui SHV trebuie proiectată împreună cu componenta horticolă, nu separat de aceasta. În horticultură, performanța energetică nu poate fi evaluată exclusiv prin cantitatea de energie produsă. Un sistem eficient este cel care produce energie, menține lumina necesară culturii, susține mecanizarea, contribuie la reducerea riscului climatic, se integrează cu tehnologia fermei și crește reziliența economică a exploatarea.

În practică, SHV performante sunt cele în care producția energetică și producția horticolă funcționează ca un sistem integrat. Întrebarea-cheie nu este doar câtă energie produce sistemul, ci dacă energia produsă adaugă valoare exploatarea fără să compromită funcția horticolă a terenului.

Capitolul 11.

Analiza economică

11.1. Sursele de valoare economică ale unui sistem hortivoltaic

Analiza economică a unui SHV trebuie realizată diferit față de analiza unui parc fotovoltaic convențional. În horticultură, investiția nu urmărește doar producerea energiei electrice, ci și integrarea acesteia într-un sistem agricol complex, în care producția de fructe, calitatea recoltei, riscurile climatice, consumul de apă, mecanizarea și costurile energetice influențează împreună rentabilitatea finală (figura 11.1).

Sursa de valoare	Mecanism economic principal	Exemple de manifestare	Observație practică
1 Producție energetică	Venituri din energie și/sau reducerea cheltuielilor energetice	vânzare în rețea; autoconsum; reducerea costurilor energetice	Este, de regulă, componenta economică dominantă.
2 Producție horticola	Creșterea valorii producției comercializabile și stabilizarea acesteia	fructe de calitate; procent mai mare de fructe comerciale; producție mai stabilă în ani dificili	Beneficiul depinde de specie, soi, climă și configurația sistemului.
3 Economii de apă	Reducerea consumului de apă și a costurilor asociate irigației	evapotranspirație mai redusă; necesar mai mic de irigare; utilizare mai eficientă a apei	Mai relevantă în zonele cu deficit hidric sau cost ridicat al apei.
4 Reducerea riscului climatic	Limitarea pierderilor de producție și de calitate	protecție față de grindină; reducerea arsurilor solare; atenuarea temperaturilor extreme	Valoarea economică apare mai ales în anii cu stres climatic accentuat.
5 Eficiența utilizării terenului	Valorificarea simultană a terenului pentru producție horticola și energetică	producție duală pe același teren; productivitate totală mai mare; utilizare mai eficientă a capitalului	Este un argument strategic pentru fermele cu presiune pe suprafață.
6 Reducerea costurilor operaționale și autonomie energetică	Scăderea cheltuielilor curente și creșterea rezilienței energetice	alimentarea irigației și a pompelor; camere frigorifice; automatizare și senzori; încărcarea echipamentelor electrice	Devine importantă când energia este integrată direct în fluxul tehnologic al fermei.
 Concluzie: Valoarea economică reală a unui SHV depășește suma beneficiilor individuale, deoarece efectele agro-energetice și climatice pot genera sinergii și reziliență.			
 Notă: Importanța relativă a acestor surse variază în funcție de climă, cultură, configurația sistemului și managementul fermei.			
 Surse principale: Dupraz et al., 2011; Marrou et al., 2013; Barron-Gafford et al., 2019; Adeh et al., 2019; Zhong et al., 2020; Weselek et al., 2021; Williams et al., 2023.			

*Figura 11.1 – Sursele de valoare economică într-un SHV
(sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)*

De aceea, un SHV nu trebuie evaluat doar prin puterea instalată, energia produsă sau perioada simplă de amortizare. Un sistem aparent mai puțin eficient energetic poate fi mai valoros pentru fermă dacă reduce pierderile climatice, crește proporția de fructe comerciale, stabilizează producția în anii dificili sau reduce consumurile energetice critice. În literatura agrivoltaică, evaluarea economică este tratată din ce în ce mai mult ca o analiză integrată a producției agricole, a producției energetice și a utilizării duale a terenului (Dupraz și colab., 2011; Dinesh și Pearce, 2016; Fraunhofer ISE, 2022).

Într-o exploatare horticola, valoarea economică a sistemului se construiește din mai multe surse: energia autoconsumată, energia injectată în rețea, economia de apă, reducerea pierderilor produse de arsurile solare sau a celor cauzate de alte fenomene climatice, menținerea calității fructelor și scăderea dependenței de energie externă. Ponderele fiecărei componente variază în funcție de specie, climat, configurația sistemului, prețul energiei și modelul de valorificare a producției. Beneficiile agronomice pot fi la fel de importante ca beneficiile energetice. De exemplu, reducerea arsurilor solare, a stresului termic sau a pierderilor prin decasare poate crește valoarea producției comerciale chiar și atunci când producția totală nu crește proporțional.

În alte situații, dacă umbrirea este excesivă sau structura îngreunează lucrările, beneficiile energetice pot fi anulate de pierderile horticole (Barron-Gafford și colab., 2019; Weselek și colab., 2019). De aceea, rentabilitatea unui SHV nu trebuie redusă la un singur indicator economic. O analiză limitată a producției de energie poate subestima valoarea agronomică a sistemului. La fel, o analiză limitată a producției de fructe poate ignora beneficiile energetice și climatice. Evaluarea corectă trebuie să integreze energia, producția horticolă, calitatea, riscul climatic, costurile de operare și durata de viață a investiției.

11.2. Costurile inițiale ale investiției

SHV presupun investiții inițiale mai mari decât o livadă convențională și, în multe cazuri, mai mari decât un sistem fotovoltaic standard montat la sol, deoarece infrastructura trebuie să îndeplinească simultan funcții energetice și horticole. Structura nu trebuie doar să susțină panourile, ci trebuie să permită și accesul utilajelor, efectuarea tratamentelor fitosanitare și a tăierilor, recoltarea, precum și ventilația și menținerea unei cantități suficiente de lumină pentru cultură.

Costurile inițiale includ panourile fotovoltaice, structura de susținere, fundațiile, stâlpii, invertoarele, cablurile, sistemele de protecție electrică, racordarea la rețea, proiectarea, autorizarea, monitorizarea climatică și, în anumite cazuri, bateriile sau adaptarea sistemelor de fertirigare (tabelul 11.1).

Tabelul 11.1 – Principalele componente ale investiției într-un sistem hortivoltaic și aspectele care trebuie evaluate înainte de implementare (sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

COMPONENTĂ	ROL PRINCIPAL	ASPECTE CRITICE DE EVALUAT
 Panouri fotovoltaice	Producția de energie electrică.	➤ Puterea instalată, eficiența modulelor, garanția producătorului.
 Structură de susținere	Susținerea panourilor și integrarea cu activitatea horticolă.	➤ Înălțime liberă, distanță între rânduri, sarcini de vânt și zăpadă, compatibilitatea cu mecanizarea.
 Fundații și stâlpi	Stabilitatea și siguranța sistemului pe termen lung.	➤ Condițiile solului, adâncimea fundațiilor, materialele utilizate și costurile de execuție.
 Invertoare	Conversia energiei electrice DC în AC.	➤ Compatibilitatea cu puterea instalată, randamentul, posibilitatea de extindere.
 Cabluri și protecții electrice	Transportul energiei și protecția instalației.	➤ Dimensionarea corectă, pierderile electrice, protecțiile la supratensiune și scurtcircuit.
 Racordare la rețea	Valorificarea energiei excedentare în rețea.	➤ Capacitatea rețelei disponibile, costurile de racordare și termenele.
 Monitorizare și senzori	Urmărirea performanței energetice și climatice.	➤ Integrarea datelor energetice și agricole, accesul la date în timp real.
 Sisteme de stocare (opțional)	Creșterea gradului de autoconsum și stabilitatea consumurilor critice.	➤ Costul bateriilor, capacitatea utilă, ciclurile de încărcare și beneficiul economic real.
 Adaptarea infrastructurii agricole	Compatibilizarea tehnologiei SHV cu cerințele culturii.	➤ Irigare și fertirigare, mecanizare, accesul utilajelor și fluxurile de lucru.
 MESAJ-CHEIE: Investiția într-un SHV nu înseamnă doar panouri fotovoltaice. Succesul depinde de integrarea corectă a componentelor energetice cu cerințele horticole ale fermei.		

În livezi, structura de susținere este frecvent una dintre cele mai costisitoare componente, deoarece trebuie dimensionată pentru vânt și zăpadă, dar și pentru cerințe agricole: înălțime suficientă, culoare tehnologice, compatibilitate cu atomizoarele, platformele de lucru și utilajele de întreținere.

În plus, sistemele mobile, cele cu urmărire solară sau structurile foarte înalte au costuri mai ridicate, deoarece includ componente mecanice, senzori, sisteme automate de control și structuri mai robuste. Aceste costuri pot fi justificate doar dacă flexibilitatea sistemului aduce beneficii clare pentru cultură, producția energetică sau reducerea riscurilor climatice.

De asemenea, nivelul și structura costurilor depind de etapa în care componenta fotovoltaică este inclusă în proiect (figura 11.2).



IDEA-CHEIE:

Integrarea într-o plantație existentă implică adaptarea SHV la constrângerile existente și poate genera costuri suplimentare și compromisuri. Proiectarea unei plantații noi permite optimizarea simultană a sistemului horticola și a celui fotovoltaic, dar presupune o planificare inițială mai complexă și un orizont investițional mai lung.

ASPECT ANALIZAT	PLANTAȚIE EXISTENTĂ (integrarea unui SHV)	PLANTAȚIE NOUĂ PROIECTATĂ PENTRU SHV (proiectare integrată cultură + PV)	OBSERVAȚII PRACTICE
 GEOMETRIA RÂNDURILOR și orientarea	- Distanțele între rânduri și pe rând sunt deja fixate. - Orientarea N-S / E-V poate fi nefavorabilă pentru producția PV. - Posibile dificultăți de aliniere a structurii cu rândurile.	- Distanțele, direcția și alinierea sunt stabilite optim pentru cerințele culturii și ale sistemului fotovoltaic. - Înălțimea și deschiderea rândurilor pot fi dimensionate în funcție de cerințele de lumină și mecanizare.	 Verifică dacă orientarea existentă permite un compromis acceptabil între producția agricolă și cea fotovoltaică.
 MECANIZAREA și accesul utilajelor	- Utilajele existente pot avea gabarit incompatibil cu structura (înălțime liberă, lățime rând). - Necesită verificarea și eventuală adaptări ale echipamentelor sau a traseelor.	- Culoare și înălțimi proiectate pentru utilajele utilizate în fermă. - Compatibilizare completă încă din faza de proiectare.	 Măsoară gabaritul real al utilajelor (actuale și viitoare) și rândurilor (margine de siguranță).
 SISTEMUL DE IRIGARE și infrastructura existentă	- Rețelele de irigare pot interfera cu fundațiile/stâlpii. - Relocarea sau modificarea circuitelor poate genera costuri suplimentare.	- Poziționarea conductelor, a aspersoarelor/picurătorilor și a stâlpilor este planificată integrat. - Eficiență și accesibilitate mai bune.	 Verifică traseele conductelor, presiunile, punctele de hidranți și posibilele relocări.
 VÂRSTA PLANTAȚIEI și durată de exploatare rămasă	- Rentabilitatea depinde de anii de exploatare rămași. - Integrarea are sens economic doar dacă durata de viață a plantației justifică investiția.	- Plantații și SHV au orizonturi de viață compatibile (20–30 ani). - Se pot alege soiuri, portaltoi și sisteme de conducere potrivite condițiilor de umbră parțială.	 Evaluează raportul dintre anii de exploatare rămași și durata de recuperare a investiției în SHV.
 COSTURILE DE IMPLEMENTARE	- Costuri suplimentare de adaptare și reorganizare (mecanizare, irigare, lucrări civile). - Risc de lucrări neprevăzute și timp mai lung de implementare.	- Cost inițial al infrastructurii mai ridicat, însă integrat și mai eficient. - Mai puține compromisuri și costuri indirecte.	 Solicită oferte care includ toate lucrările de adaptare și costurile ascunse (relocări, opriri de producție).
 FLEXIBILITATEA DE PROIECTARE	- Flexibilitate redusă; multe constrângeri. - Optimizările sunt limitate de situația existentă.	- Flexibilitate ridicată pentru optimizarea agronomică, energetică și economică. - Possibilitatea de a testa scenarii înainte de implementare.	 În faza de proiectare nouă, realizează simulări agro-energetice și teste de umbră.
 RISC AGRONOMIC și performanță	- Risc mai mare de compromisiuri privind lumina, microclimatul, accesul și productivitatea. - Necesită monitorizare atentă și ajustări continue.	- Configurație optimizată pentru microclimat, luminare, ventilație și mecanizare. - Potențial mai ridicat de menținere/creștere a producției și de calitate fructelor.	 Planifică sisteme de monitorizare (microclimat, radiație, umiditate, producție) încă din faza inițială.
 COMPLEXITATEA IMPLEMENTĂRII și durata proiectului	- Proces mai complex: analiză detaliată, adaptări, lucrări de relocare și teste. - Durată de implementare mai lungă. - Possibile întreruperi temporare ale operațiunilor.	- Proces mai simplu și mai predictibil. - Implementare etapizată planificată în paralel cu înființarea plantației. - Timp de integrare mai scurt relativ la complexitatea totală.	 În plantațiile existente, planifică din timp, pentru a reduce întreruperile, relocările și întârzierile.



CONCLUZIE PRACTICĂ: Integrarea într-o plantație existentă este fezabilă dacă se realizează o analiză tehnico-economică detaliată a constrângerilor existente, iară, integrat și obiectivă de producție. Proiectarea unei plantații noi permite optimizarea simultană a tuturor componentelor (cultură, sistem agro-energetic și economic) și oferă cele mai bune șanse pentru performanță și rentabilitate.

PAȘI ESENȚIALI ÎNAINTE DE DECIZIE

- ✓ Audit al plantației existente și al obiectivelor (producție)
- ✓ Simulări agro-energetice (umbră, microclimat, producție)
- ✓ Analiză economică comparativă (scenarii existente vs. nou)
- ✓ Consultare cu specialiști și management al riscurilor



Notă: Recomandările trebuie adaptate speciei, sistemului de conducere, condițiilor pedoclimatice, nivelului tehnologic al fermei și obiectivelor de producție. Consultă specialiști pentru evaluări de caz.

Surse principale: Dupraz et al., 2011; Marrou et al., 2013; Barron-Gafford et al., 2019; Aden et al., 2019; Zhong et al., 2020; Weselek et al., 2021; Williams et al., 2023.

Figura 11.2 – Integrarea într-o plantație existentă versus proiectarea unei plantații noi (sursa: elaborare proprie)

Integrarea infrastructurii fotovoltaice într-o livadă existentă presupune adaptarea structurii la distanțele dintre rânduri, rețeaua de irigare, drumurile tehnologice și sistemul de conducere deja existente, ceea ce poate genera lucrări suplimentare și costuri mai mari. În cazul plantațiilor noi, proiectarea simultană a livezii și a componentei energetice permite o mai bună corelare a celor două sisteme, reduce riscul apariției unor incompatibilități tehnice și poate limita costurile ulterioare de adaptare.

Un element frecvent subestimat este racordarea la rețeaua electrică. Limitările de rețea pot reduce puterea instalată sau pot genera costuri suplimentare importante. Din acest motiv, verificarea condițiilor de racordare trebuie realizată înaintea dimensionării finale a sistemului, nu după finalizarea proiectării tehnice.

Recomandarea practică este ca, înainte de proiectare, să fie evaluate simultan costurile structurii, posibilitățile de racordare, compatibilitatea cu mecanizarea și impactul asupra culturii. În multe situații, aceste elemente influențează investiția mai mult decât costul modulelor fotovoltaice.

11.3. Alternative de amplasare a panourilor în fermele horticole

Instalarea panourilor deasupra culturilor este una dintre cele mai complexe și costisitoare forme de integrare a energiei regenerabile într-o exploatare horticolă. De aceea, înainte de alegerea unei soluții hortivoltaice, trebuie analizate și alte suprafețe disponibile care pot produce energie fără impact direct asupra culturii: acoperișuri, hale, depozite, parcuri, bazine de irigare, terenuri marginale sau suprafețe degradate (figura 11.3).

Aceste alternative pot avea costuri structurale mai mici, execuție mai simplă și mentenanță mai ușoară decât structurile elevate deasupra culturii. Sistemele montate pe hale, depozite sau alte clădiri pot fi avantajoase mai ales atunci când în apropiere se află consumatorii principali, precum sistemele de refrigerare, depozitare, sortare, ambalare sau de pompare a apei. În asemenea cazuri, energia fotovoltaică poate fi integrată eficient fără modificarea microclimatului culturii și fără riscuri directe asupra lucrărilor horticole.

O opțiune suplimentară este utilizarea sistemelor fotovoltaice plutitoare pe bazine de irigare sau rezervoare. Acestea nu ocupă teren agricol, pot reduce parțial evaporarea apei și pot împiedica dezvoltarea algelor, dar implică cerințe specifice privind ancorarea, accesul tehnic, coroziunea, siguranța electrică și mentenanța.

Întrebarea economică esențială este simplă: când se justifică amplasarea panourilor deasupra culturii? Dacă sistemul produce doar energie, fără beneficii clare pentru cultură, soluțiile pe acoperișuri, bazine, parcuri sau terenuri neproductive pot fi mai simple și mai eficiente. În schimb, soluția hortivoltaică se justifică mai bine atunci când panourile contribuie și la reducerea stresului termic, limitarea arsurilor solare, stabilizarea producției, reducerea pierderilor climatice sau îmbunătățirea utilizării apei.

Alegerea nu trebuie însă redusă întotdeauna la o singură variantă de amplasare. În exploatarea cu suprafețe și consumuri energetice diverse poate fi mai potrivită o soluție mixtă, în care acoperișurile și terenurile neproductive asigură partea principală a producției de energie, iar panourile deasupra culturii sunt instalate numai în parcelele unde există o nevoie reală de protecție climatică. O asemenea abordare permite dimensionarea mai atentă a investiției și evită acoperirea inutilă a culturilor. De asemenea, implementarea poate fi realizată etapizat, începând cu suprafețele cel mai ușor de utilizat și continuând cu componenta hortivoltaică după verificarea consumurilor și a răspunsului culturii.

Recomandarea practică este ca, înainte de alegerea unei soluții hortivoltaice, să fie comparate cel puțin trei scenarii: panouri pe infrastructura existentă, panouri pe teren neproductiv și panouri deasupra culturii. Varianta hortivoltaică este justificată mai ales atunci când aduce simultan energie și beneficii agronomice măsurabile.



IDEA-CHEIE:

Înainte de alegerea unei soluții fotovoltaice, trebuie analizate toate suprafețele disponibile care pot produce energie fără impact direct asupra culturii. Fiecare variantă are avantaje, limitări și costuri diferite.

VARIANTĂ DE AMPLASARE	AVANTAJE PRINCIPALE	LIMITĂRI / PROVOCĂRI	PROFIL ECONOMIC RELATIV*			CÂND MERITĂ?
			COST INVESTIȚIE (CAPEX)	OPERARE / ÎNTREȚINERE (OPEX)	IMPACT ASUPRA CULTURII	
 1. PE ACOPERIȘURI (hale, depozite, clădiri administrative)	- Costuri mai mici (fără structură la sol) - Execuție rapidă - Aproape de consumatori - Nu ocupă teren agricol - Protejează acoperișul de radiația solară	- Suprafață disponibilă limitată - Orientarea și înclinarea uneori nefavorabile - Verificarea capacității structurale - Acces pentru mentenanță la înălțime	 Scăzut – Mediu	 Scăzut	 Fără impact direct	Când ferma are consum energetic ridicat (depozite frigorifice, sortare, ambalare, ateliere) și acoperișuri disponibile.
 2. PE PARCĂRI ȘI GARAJE SOLARE	- Produce energie și oferă umbră vehiculelor - Dublă utilizare a suprafeței - Fără consum de teren agricol productiv - Acces ușor pentru întreținere	- Suprafață disponibilă, de regulă, limitată - Orientare nu întodeauna optimă - Necesită proiectare pentru rezistența la vânt, zăpadă și trafic	 Mediu	 Scăzut – Mediu	 Fără impact direct	Când există spații pentru autoturisme, utilaje, camioane, vizitatori.
 3. PE BAZINE DE IRIGARE ȘI REZERVOARE (sisteme plutitoare)	- Nu ocupă teren agricol - Reduce evaporarea apei (10–30%) - Reduce necesarul energetic de pompare/irigare - Poate fi integrat în sistemele de irigare	- Costuri mai ridicate (flotoare, ancorare) - Acces tehnic mai dificil - Necesită soluții concrete și siguranță electrică - Necesită verificarea nivelului apei și a vântului	 Mediu – Ridicat	 Mediu – Ridicat	 Efect pozitiv: reduce evaporarea și temperatura apei	Când ferma are bazine sau rezervoare existente și urmărește simultan energie + economie de apă.
 4. PE TERENURI MARGINALE SAU NEPRODUCTIVE	- Nu impactează zona culturilor - Posibilități de suprafețe mari și orientare optimă - Execuție relativ simplă - Poate absorbi o valorificare sezonieră - Degradare redusă	- Distanță mai mare față de consumatori (pierderi și costuri de cablare) - Necesită acces și racordare - Poate necesita lucrări de nivelare	 Mediu	 Scăzut – Mediu	 Fără impact direct	Când există suprafețe neutilizate disponibile și distanța până la punctele de consum este acceptabilă.
 5. DEASUPRA CULTURILOR (SISTEME HORTIVOLTAICE – SHV)	- Poate aduce beneficii agronomice: - reduce stresul termic și arșița și stresul termic - economie de apă prin reducerea evaporării - protecție la grindină, ploi torențiale, vânt - utilizarea infrastructurii a suprafeței - Valoare adăugată din dublă activitate pe același teren	- Costuri de investiție cele mai ridicate - Structuri înalte, proiectare complexă - Execuție și mentenanță mai complexe - Necesită fundamentații și structuri rezistente - Poate reduce lumina dacă nu este proiectat corect	 Ridicat – Foarte ridicat	 Ridicat	 Poate fi pozitiv (dacă sunt beneficii agronomice dovedite)	Când sistemul aduce simultan energie și beneficii agronomice măsurabile care compensează costurile structurale mai mari.
LEGENDA – PROFIL ECONOMIC RELATIV*  Scăzut  Mediu  Ridicat  Foarte ridicat  Scăzut  Mediu  Ridicat  Foarte ridicat  Fără impact direct  Efect pozitiv (protecție)  Neutru / variabil  Efect negativ (posibil) *Valorile sunt relative la raportările curente din literatură de specialitate convenționale pentru fermele la sol (ground-mounted PV).						



RECOMANDARE PRACTICĂ: Înainte de alegerea soluției, compară cel puțin trei scenarii de profitabilitate investiției, luând în calcul producția și prețurile energiei, suprafețele disponibile și beneficiile agronomice.

Varianta SHV este justificată mai ales atunci când aduce simultan energie și beneficii agronomice.

SURSE PRINCIPALE:

- Fraunhofer ISE. 2023. Agri-Photovoltaics: Guidelines for Decision Makers. (context real mapl pertem 55W, la herovila de structură 51.8mood)
- NREL. 2020. Benchmarking Floating Photovoltaic Systems on Existing Reservoirs. System Cost, O&M Value, COE vs PV.
- Prává, M. et al., 2022. Design guidelines: tooree for larger mestimk light/buutmed io environmental awareness. Renewable Energy, 190, 301–310.
- Trommsdorff et al., 2021. Agri-photovoltaics: Opportunities for Agriculture and the energy transition. WIREs Energy Environ.

- Audit al plantației existente și al obiectivelor (producție)
- Simulări agro-energetice (umbră, microclimat, producție)
- Analiză economică comparativă (scenarii existente vs. nou)
- Consultare cu specialiști și managementul riscurilor

Figura 11.3 – Variante de amplasare a sistemelor fotovoltaice în exploatarea horticolă (sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

11.4. Costuri de operare și mentenanță

Costurile de operare și mentenanță apar după instalarea sistemului și reflectă exploatarea simultană a componentei energetice, a culturii horticole și a interacțiunilor dintre acestea. Ele trebuie diferențiate de costurile inițiale ale investiției, deoarece nu se referă la achiziția panourilor, construcția structurii sau racordarea sistemului, ci la cheltuielile recurente necesare pentru menținerea funcționalității pe durata de viață a proiectului (tabelul 11.2).

Tabelul 11.2 – Principalele categorii de costuri de operare și mentenanță într-un sistem hortivoltaic
(sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

CATEGORIA	EXEMPLE	PARTICULARITĂȚI ÎN SHV
 Mentenanța panourilor fotovoltaice	• Curățarea panourilor • Inspecții periodice • Verificarea conectorilor și a cadrelor	› Frecvența curățării depinde de praf, polen, praf saharian și depuneri specifice zonei.
 Mentenanța structurii de susținere	• Verificarea elementelor metalice • Strângerea îmbinărilor și șuruburilor • Tratarea coroziunii (dacă este cazul)	› Structura este expusă la factori climatici și la solicitări mecanice generate de activitatea agricolă și de utilaje.
 Mentenanța echipamentelor electrice (invertoare, protecții, tablouri)	• Verificări periodice • Testarea protecțiilor • Actualizări de firmware	› Defecțiunile echipamentelor pot reduce producția și veniturile; recomandate contracte de service.
 Monitorizare și management de date	• Platforme de monitorizare • Stocarea și analiza datelor • Alerte și rapoarte periodice	› Monitorizarea continuă permite identificarea rapidă a problemelor și optimizarea performanței și a autoconsumului.
 Integrarea cu activitatea agricolă	• Întreținerea sistemelor de irigare și fertigare • Adaptarea lucrărilor la prezența structurii • Managementul microclimatului	› Unele operațiuni agricole pot necesita timp suplimentar sau echipamente adaptate (înălțime liberă, acces, manevrabilitate).
 Reparații și înlocuiri neprevăzute	• Înlocuirea componentelor defecte • Cabluri, siguranțe, module, senzori etc. • Intervenții după fenomene extreme	› Este recomandat un fond de rezervă (1-2% din valoarea investiției/an) pentru cheltuieli neprevăzute.



MESAJ-CHEIE:

Costurile de operare și mentenanță trebuie analizate împreună cu economiile generate de sistem. O monitorizare corectă și o mentenanță planificată mențin performanța energetică și agricolă pe termen lung.



Notă: Costurile variază în funcție de dimensiunea sistemului, localizare, tipul culturii, tehnologiile utilizate și nivelul de automatizare.

În componenta energetică, costurile de operare includ curățarea panourilor, verificarea periodică a modulelor, cablurilor, invertoarelor, sistemelor de protecție și echipamentelor de monitorizare, precum și intervențiile tehnice specializate. În sistemele mobile, cu urmărire solară sau cu elemente adaptive, mentenanța poate fi mai complexă deoarece apar componente mecanice, senzori și sisteme de control care necesită verificări periodice.

Aceste costuri trebuie tratate ca recurente, nu doar ca elemente ale investiției inițiale.

În componenta horticolă, costurile recurente pot fi influențate de modul în care structura modifică lucrările din plantație. Prezența panourilor, a stâlpilor, a cablurilor și a zonelor de protecție poate crește timpul necesar pentru efectuarea lucrărilor de întreținere a livezii, precum și a eventualelor intervenții sau verificări ale sistemului de irigare.

Dacă accesul utilajelor este mai dificil, dacă manevrele trebuie realizate mai lent sau dacă unele lucrări necesită intervenții manuale suplimentare, costurile de muncă și exploatare pot crește față de o plantație neacoperită.

O categorie distinctă este reprezentată de costurile de integrare, adică acele cheltuieli care apar din interacțiunea dintre sistemul fotovoltaic și tehnologia horticolă și care pot include re poziționarea sau reglarea periodică a liniilor de picurare, verificarea suplimentară a senzorilor de

umiditate a solului, adaptarea tratamentelor fitosanitare la zonele cu ventilație mai slabă, întreținerea zonelor de scurgere a apei de pe panouri și corectarea unor diferențe locale de umiditate. În aceste cazuri, costul nu aparține exclusiv nici componentei energetice, nici culturii, ci rezultă din funcționarea lor împreună.

Managementul apei poate deveni o sursă importantă de costuri operaționale. Deși umbrirea poate reduce evapotranspirația în anumite condiții, panourile pot redistribui precipitațiile și pot crea zone cu aport neuniform de apă. Dacă precipitația efectivă ajunsă în zona radiculară este redusă sau neuniformă, pot fi necesare udări mai frecvente, monitorizare mai densă, reglaje ale debitului de picurare sau lucrări de dirijare a apei de pe panouri.

În fermele cu surse limitate de apă sau cu costuri ridicate de pompare, aceste intervenții pot influența semnificativ costurile anuale de exploatare (Elamri și colab., 2018; Weselek și colab., 2019).

Ventilația și riscul fitosanitar pot genera, la rândul lor, costuri indirecte. În configurațiile în care circulația aerului este redusă, iar frunzele și fructele se usucă mai lent după ploi, rouă sau tratamente, pot fi necesare o monitorizare fitosanitară mai atentă, intervenții mai bine temporizate și lucrări de tăiere care să mențină coronamentul aerisit. Aceste costuri nu trebuie atribuite simplu „panourilor”, ci modului în care configurația sistemului modifică microclimatul și tehnologia culturii.

Analiza costurilor de operare trebuie să separe trei categorii: costuri energetice recurente, costuri horticole recurente și costuri de integrare. Această separare ajută cultivatorul să înțeleagă dacă sistemul funcționează ca o infrastructură complementară culturii sau dacă generează cheltuieli suplimentare care reduc beneficiile obținute prin producția de energie.

Un SHV bine proiectat nu este doar un sistem care produce energie, ci și un sistem care poate fi întreținut, lucrat și monitorizat fără a destabiliza tehnologia horticola.

11.5. Venituri și economii generate de sistem

Principalul avantaj economic al unui SHV este faptul că aceeași suprafață poate susține simultan obținerea unui venit agricol, producția energetică și diminuarea unor efecte produse de manifestări climatice extreme. Totuși, aceste componente trebuie analizate împreună, nu separat.

Venitul energetic poate proveni din autoconsum, reducerea energiei cumpărate, livrarea în rețea sau mecanisme de compensare. Pentru fermele horticole, autoconsumul direct este frecvent una dintre cele mai eficiente forme de valorificare a energiei, deoarece irigarea, fertirigarea, răcirea, sortarea, ambalarea și monitorizarea consumă energie în perioade importante ale sezonului de producție.

Valoarea agricolă a sistemului depinde de modul în care panourile influențează producția, calitatea și pierderile climatice. În anumite situații, producția totală poate scădea ușor, dar procentul de fructe comerciale poate crește datorită reducerii arsurilor solare sau a altor daune climatice. În alte cazuri, dacă umbrirea este excesivă, pierderea de calitate poate depăși beneficiile energetice.

Contribuția diferitelor componente la venitul total poate varia semnificativ în funcție de specie, climă, configurația sistemului, nivelul autoconsumului și condițiile pieței. În numeroase exploatații horticole, producția agricolă rămâne principala componentă a valorii economice totale, iar venitul energetic și beneficiile climatice completează și stabilizează performanța economică.

În anii normali din punct de vedere climatic, venitul agricol și venitul energetic tind să domine structura valorii economice. În anii cu secetă, arșiță, fenomene extreme sau prețuri ridicate la energie, contribuția beneficiilor climatice și a economiilor operaționale poate crește semnificativ. De aceea, veniturile trebuie analizate în mai multe scenarii: an climatic normal, an foarte cald și secetos, an cu pierderi ridicate prin arsuri solare și an cu prețuri ridicate la energie.

Din punct de vedere practic, se recomandă calcularea venitului total prin însumarea valorii producției pomicole, a energiei autoconsumate sau livrate în rețea și a beneficiilor economice rezultate din evitarea sau diminuarea pierderilor cauzate de factorii climatici. Doar această abordare reflectă economia reală a SHV.

11.6. Modele de afaceri

SHV pot fi dezvoltate prin mai multe modele economice. Alegerea depinde de dimensiunea exploatației, profilul energetic, accesul la capital, nivelul de risc acceptat și obiectivele pe termen lung ale exploatației (vezi figura 11.4).

Primul model este investiția proprie cu autoconsum. Cultivatorul sau compania agricolă finanțează sistemul și utilizează energia produsă pentru consumul intern al exploatației. Avantajul principal este controlul complet asupra sistemului și reducerea dependenței de energie externă. Dezavantajul este investiția inițială ridicată.

Al doilea model este producția de energie cu livrare în rețea. Acesta poate genera venit energetic suplimentar, dar depinde mai mult de tarife, legislație, condiții de racordare și regimul de prosumator sau producător. În horticultură, acest model trebuie analizat cu atenție, deoarece maximizarea energiei livrate nu trebuie să afecteze cultura.

Un al treilea model este parteneriatul dintre cultivator și un investitor energetic. Investitorul finanțează sistemul, iar cultivatorul continuă activitatea agricolă și poate primi chirie, energie la preț redus sau o parte din venituri. Acest model poate reduce bariera investițională pentru cultivatori, dar necesită contracte foarte clare privind accesul în livadă, responsabilitățile tehnice, mentenanța, dreptul de intervenție și distribuția riscurilor.

Există și modele demonstrative sau de cercetare, utilizate în institute, universități și ferme pilot. Acestea au valoare mare pentru colectarea de date și testarea configurațiilor, dar nu trebuie confundate cu modele comerciale complet validate.

Modelul economic trebuie ales după analiza consumului energetic, a valorii culturii, a riscului climatic, a capacității de investiție și a controlului pe care cultivatorul dorește să îl păstreze asupra exploatației.

11.7. Perioada de amortizare și analiza scenariilor

Perioada de amortizare a unui SHV depinde de costul investiției, de producția și valoarea energiei, de costurile de operare, de impactul asupra culturii și de beneficiile obținute ca urmare a diminuării pierderilor cauzate de factorii climatici. În general, SHV pot avea perioade de amortizare mai lungi decât sistemele fotovoltaice convenționale, deoarece structura este mai complexă, costurile inițiale sunt mai mari, iar puterea instalată pe hectar este limitată de cerințele culturii.

Totuși, comparația cu sistemul fotovoltaic convențional este incompletă dacă nu include valoarea agricolă a sistemului. Dacă panourile reduc arsurile solare, stabilizează producția, scad consumul de apă sau cresc procentul de fructe comerciale, beneficiul economic total poate fi mai mare decât sugerează o analiză energetică simplă.

În horticultură, amortizarea trebuie calculată în scenarii multiple. Un sistem care pare marginal într-un an normal poate deveni valoros într-un an cu secetă severă, arșiță, pierderi comerciale ridicate sau prețuri mari la energie. Invers, un sistem cu umbrire excesivă poate părea rentabil energetic, dar devine nefavorabil dacă reduce calitatea fructelor sau crește costurile tehnologice.

SHV trebuie evaluat pe întreaga durată de viață a investiției și în scenarii climatice multiple. Beneficiile economice devin adesea mai evidente în anii cu secetă, arșiță, fenomene extreme sau prețuri ridicate la energie decât în anii climatici normali.

Pentru culturile perene, evaluarea economică nu trebuie făcută pe baza unui singur sezon. Efectele asupra producției, calității, diferențierii mugurilor și stabilității pot varia între ani. Perioada reală de amortizare trebuie calculată pe durata de viață a investiției, ideal pe o perioadă de 15–25 de ani, în scenarii diferite privind prețul energiei, producția agricolă, pierderile din cauze de natură climatică și costurile de mentenanță.



IDEA-CHEIE: Există mai multe modele economice pentru dezvoltarea unui SHV. Alegerea modelului optim depinde de capacitatea de investiție, nivelul de control dorit și obiectivele pe termen lung.

ASPECT	1. INVESTIȚIE PROPRIE CU AUTOCONSUM	2. PRODUCȚIE DE ENERGIE CU LIVRARE ÎN REȚEA	3. PARTENERIAT CU INVESTITOR ENERGETIC (PPA / LEASING / CHIRIE)	4. MODEL DEMONSTRATIV SAU DE CERCETARE	5. MODEL COOPERATIV SAU ASOCIATIV
DESCRIERE	Fermierul finanțează sistemul și utilizează energia produsă pentru consumul intern al fermei.	Energia produsă este livrată în rețea, generând venituri energetice suplimentare.	Investitorul finanțează și deține sistemul, iar fermierul continuă activitatea agricolă și poate primi chirie, energie la preț redus sau o parte din venituri.	Sisteme pilot utilizate în institute, universități și ferme experimentale pentru testare, monitorizare și colectare de date.	Mai mulți fermieri se asociază pentru a dezvolta și exploata împreună un SHV.
CINE INVESTEȘTE?	Fermierul / compania agricolă	Fermierul / compania agricolă	Investitorul energetic	Proiecte de cercetare, finanțări publice / granturi	Cooperativă / asociație de fermieri
CINE DEȚINE SISTEMUL?	Fermierul	Fermierul	Investitorul	Instituții de cercetare sau parteneri	Cooperativă / asociație
ENERGIE UTILIZATĂ	Autoconsum integral sau parțial	Livrare în rețea (prosumator sau producător)	Autoconsum (la preț redus) sau livrare în rețea	Autoconsum / testare / monitorizare	Autoconsum comun și/sau livrare în rețea
VENITURI POSIBILE	Economii la factura de energie (evitarea costurilor)	Venituri din vânzarea energiei (tarife / piață)	Chirie, energie la preț redus sau procent din venituri	Nu este scop comercial; valoare științifică și tehnologică	Împărțirea economiilor sau a veniturilor energetice
AVANTAJE	- Control complet asupra sistemului independent energetic - Protecție împotriva creșterii prețurilor la energie	- Venit energetic suplimentar - Posibilă amortizare mai rapidă - Scalabilitate mai ușoară	- Barieră investițională redusă - Acces la tehnologie avansată - Risc financiar transferat către investitor	- Testare și optimizare tehnologică - Adaptare la condiții locale - Generare de date și know-how	- Economii de scară - Acces mai ușor la finanțare - Împărțirea riscurilor
LIMITĂRI / RISCURI	- Investiție inițială ridicată - Fără venit energetic direct - Recuperare mai lentă a investiției	- Dependență de tarife și legislație - Condiții de racordare - Regim de prosumator / producător	- Contracte complexe necesare - Accesul investitorului în livadă trebuie reglementat contractual - Distribuția riscurilor și veniturilor trebuie clar definită	- Nu este un model comercial validat - Scalabilitate limitată - Dependent de finanțare	- Necesită organizare și încredere - Decizii mai lente - Management mai complex
POTRIVIT PENTRU	Firme cu consum energetic semnificativ și capacitate de investiție.	Firme cu profil energetic variabil și acces la rețea.	Firme cu capital limitat, dar interesate de beneficii energetice și climatice.	Institute, universități, proiecte pilot, ferme de cercetare și inovare.	Grupuri de fermieri cu obiective comune și interes pentru energie regenerabilă.

LEGENDA – PROFIL ECONOMIC RELATIV*	COST INVESTIȚIE (CAPEX)				OPERARE / ÎNTREȚINERE (OPEX)				IMPACT ASUPRA CULTURII				*Valorile sunt relative la raportările curente din literatură de specialitate convenționale pentru fermele la sol (ground-mounted PV).
	Scăzut	Mediu	Ridicat	Foarte ridicat	Scăzut	Mediu	Ridicat	Foarte ridicat	Fără impact direct	Efect pozitiv (protecție)	Neutru / variabil	Efect negativ (posibil)	

	RECOMANDARE PRACTICĂ: Înainte de alegerea soluției, compară cel puțin trei scenarii profitabilitate investiției, luând în calcul producția și prețurile energiei, suprafețele disponibile și beneficiile agronomice.				SURSE PRINCIPALE:							
	Varianta SHV este justificată mai ales atunci când aduce simultan energie și beneficii agronomice.				- Fraunhofer ISE. 2023. Agri-Photovoltaics Guidelines for Decision Makers. (context real map) pentru SSW, to hortivij de structuraal SI.Bitrood - NREL. 2020. Benchmarking Floating Photovoltaic Systems on Existing Reservoirs. System Cost, O&M Value, COE vs PV. - Prăvă, M. et al., 2022. Design guidelinescore for larger mesitmic lighthousetered on environmental aweness. Renewable Energy, 190, 301-310. - Trommsdorff et al., 2021. Agri-photovoltaics: Opportunities for Agriculture and the energy transition. WIREs Energy Environ.				- Audit al plantației existente și al obiectivelor (producție) - Simulări agro-energetice (umbrire, microclimat, producție) - Analiză economică comparativă (scenarii existente vs. nou) - Consultare cu specialiști și managementul riscurilor			

Figura 11.4 – Modele de afaceri în SHV (sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

11.8. Când este justificat economic un sistem hortivoltaic?

Justificarea economică a unui SHV trebuie privită ca rezultat al unei combinații de factori, nu ca efect automat al producerii de energie. Contează deopotrivă:

- profilul energetic al fermei,
- valoarea și sensibilitatea culturii,
- riscul climatic al amplasamentului,
- posibilitatea de autoconsum,
- costurile suplimentare ale structurii și
- existența unor alternative fotovoltaice mai simple.

De aceea, înainte de realizarea investiției, este utilă diferențierea factorilor care susțin viabilitatea economică a sistemului hortivoltaic de cei care o diminuează sau care pot justifica orientarea fermei către o soluție fotovoltaică convențională.

Un SHV este justificat economic atunci când beneficiile totale depășesc costurile suplimentare generate de structura mai complexă și de adaptarea tehnologiei horticole. Justificarea este mai puternică în exploatarea pomilor cu consum energetic ridicat, acces bun la autoconsum, culturi cu valoare mare, risc climatic ridicat și nevoie reală de protecție microclimatică. În aceste situații, panourile nu produc doar energie; ele contribuie la stabilitatea economică a exploatarei.

În schimb, dacă ferma dispune de acoperișuri, hale sau terenuri neproductive suficiente pentru producția de energie, iar cultura nu beneficiază clar de umbră sau protecție climatică, SHV poate fi mai greu de justificat economic. În acest caz, un sistem fotovoltaic convențional integrat în infrastructura fermei poate fi o soluție mai simplă și mai ieftină. Această analiză trebuie realizată înainte de investiție, deoarece un SHV greșit dimensionat poate genera simultan costuri mari, producție agricolă redusă și beneficii energetice sub așteptări (tabelul 11.3).

Tabelul 11.3 – Întrebări-cheie înainte de investiția într-un sistem hortivoltaic
(sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

Nr.		ÎNTREBAREA-CHEIE	SEMNAL FAVORABIL (indicatori pozitivi)	SEMNAL DE AVERTIZARE (indicatori negativi / risc)
1		Cultura are beneficii agronomice clare din umbră sau protecție microclimatică?	 Se reduce arșița, arsura solară, stresul termic sau consumul de apă.	 Cultura depinde mult de lumină pentru producție, culoare sau calitate.
2		Există alternative mai simple pentru amplasarea panourilor?	 Nu există hale, bazine, parcuri sau terenuri neproductive suficiente.	 Panourile pot fi amplasate mai simplu în alte zone, fără impact asupra culturii.
3		Ferma are consum energetic important în sezonul de vegetație?	 Autoconsumul poate valorifica energia pentru irigare, frig sau procesare.	 Consumul este redus, iar o parte mare din energie ar rămâne slab valorificată.
4		Racordarea la rețea este fezabilă tehnic și economic?	 Există punct de racordare și condiții rezonabile pentru integrarea sistemului.	 Racordarea este limitată, costisitoare sau impune restricții importante.
5		Structura permite mecanizarea, tratamentele fitosanitare și recoltarea?	 Sunt asigurate înălțimea, culoarele și manevrele necesare lucrărilor.	 Structura poate bloca utilajele sau poate îngreuna aplicarea tratamentelor.
6		Există risc de deficit de lumină pentru cultură?	 Simulările arată lumină suficientă în zona productivă.	 Umbrărea poate afecta colorarea, acumularea zaharurilor sau maturarea.
7		Se poate testa sistemul pe lot pilot cu variantă martor?	 Sistemul poate fi evaluat la scară mică înainte de extindere.	 Extinderea directă pe suprafețe mari crește riscul deciziilor greșite.
8		Sunt prevăzute mentenanța, demontarea și reciclarea componentelor?	 Există plan pentru întreținere, înlocuire și gestionarea sfârșitului de viață.	 Responsabilitățile, costurile și soluțiile pentru finalul ciclului de viață nu sunt clarificate.
 RECOMANDARE PRACTICĂ Investiția într-un SHV este justificată atunci când predomină semnalele favorabile și beneficiile totale depășesc costurile suplimentare. În caz contrar, trebuie analizate mai întâi alternativele cu impact minim asupra culturii.				

Analiza economică a SHV trebuie să depășească logica simplă a producției de energie. În horticultură, rentabilitatea depinde de interacțiunea dintre costurile investiției, energia produsă, autoconsumul, calitatea fructelor, pierderile climatice evitate, costurile de operare și stabilitatea producției.

Un sistem eficient nu este neapărat cel care produce cea mai multă energie, ci cel care oferă cel mai bun echilibru între performanța horticolă, protecția climatică, consumul energetic și stabilitatea economică a exploatației. Înainte de implementare, fiecare proiect trebuie comparat cu alternative mai simple, precum panourile montate pe hale, bazine sau terenuri neproductive. Numai atunci când beneficiile agronomice și energetice justifică structura suplimentară, soluția hortivoltaică devine competitivă.

Capitolul 12.

Reglementări și aspecte legale

12.1. Relația dintre agricultură și producția de energie

SHV ocupă o poziție particulară între agricultură și producția de energie regenerabilă. În SHV, terenul trebuie să rămână activ din punct de vedere agricol și după instalarea infrastructurii energetice. Această diferență schimbă atât logica proiectării, cât și modul în care proiectul este analizat administrativ și juridic.

Dezvoltarea rapidă a energiei regenerabile a adus în prim-plan și problema protejării terenurilor agricole productive. În acest context, sistemele agrivoltaice și hortivoltaice sunt analizate ca soluții de utilizare duală a terenului: produc energie solară, dar mențin producția agricolă pe aceeași suprafață (Fraunhofer ISE, 2022; IEA PVPS, 2025). În practică, integrarea este mai complexă decât montarea unor panouri deasupra culturilor. Livezile și plantațiile intensive au nevoie de lucrări continue: întreținere, tăieri, tratamente, irigare, monitorizare, mecanizare și recoltare. De aceea, infrastructura energetică trebuie proiectată astfel încât activitatea horticolă să rămână practic posibilă, nu doar declarată.

12.2. Contextul european al dezvoltării sistemelor agrivoltaice

La nivel european, dezvoltarea sistemelor agrivoltaice este influențată de politicile privind energia regenerabilă, securitatea energetică și protejarea terenurilor agricole. Interesul pentru agrivoltaic provine tocmai din posibilitatea de a produce energie solară fără eliminarea completă a funcției agricole a terenului.

Principalele direcții europene relevante pentru dezvoltarea SHV și implicațiile lor practice sunt sintetizate în tabelul 12.1 (Joint Research Centre, 2023; IEA PVPS, 2025).

Tabelul 12.1 – Principii europene și implicațiile practice pentru SHV
(sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

PRINCIPIU EUROPEAN	CE ÎNSEAMNĂ PENTRU SHV	IMPLICAȚIE PRACTICĂ ÎN PROIECTARE
 1. Menținerea funcției agricole a terenului	Activitatea agricolă trebuie să continue după instalarea infrastructurii energetice, iar terenul trebuie să rămână funcțional pentru producție.	Structura trebuie dimensionată pentru a permite accesul utilajelor, lucrările tehnologice, întreținerea culturilor și menținerea nivelului de producție.
 2. Utilizarea duală a terenului	Aceași suprafață este utilizată simultan pentru producție agricolă și pentru producția de energie regenerabilă.	Evaluarea proiectului trebuie să includă atât performanța agricolă (producție, calitate, stabilitate), cât și performanța energetică (producție, autoconsum, venit).
 3. Integrarea agriculturii și energiei regenerabile	Sistemul energetic trebuie să producă energie fără a compromite funcționarea normală a culturii și a tehnologiei agricole.	Configurația panourilor, înălțimea structurii, distanțele dintre rânduri și orientarea trebuie adaptate speciilor horticole și tehnologiei agricole utilizate.
 4. Adaptarea la schimbările climatice	SHV pot contribui la reducerea unor riscuri climatice (arsuri solare, stres termic, stres hidric) și la creșterea rezilienței sistemelor horticole.	Se urmăresc beneficii precum reducerea temperaturii extreme, protecția împotriva fenomenelor severe, economisirea apei și stabilizarea producției în anii dificili.
 5. Utilizarea eficientă a resurselor	Terenul, apa, energia și infrastructura trebuie valorificate cât mai eficient prin utilizare integrată.	Proiectarea trebuie să maximizeze sinergiile dintre agricultură și producția energetică și să reducă consumul de resurse per unitate de produs.
 6. Dezvoltarea durabilă a exploatațiilor agricole	Investițiile trebuie să susțină simultan obiective agricole, economice și energetice pe termen lung.	Analiza proiectului trebuie să includă rentabilitatea economică, impactul asupra mediului, viabilitatea pe termen lung și posibilitatea de scalare.

Notă importantă

Informațiile prezentate în acest capitol au caracter orientativ și urmăresc evidențierea principalelor aspecte administrative și juridice asociate SHV. Deoarece legislația privind utilizarea terenurilor agricole, autorizarea construcțiilor și dezvoltarea proiectelor de energie regenerabilă se află într-o continuă evoluție, fiecare proiect trebuie analizat individual împreună cu specialiști în proiectare, urbanism, energie și legislație agricolă.

Cadrul european privind sistemele agrivoltaice este încă în dezvoltare, iar condițiile concrete diferă între statele membre. Direcția generală este însă clară: sunt favorizate proiectele în care activitatea agricolă continuă real după instalarea infrastructurii energetice, iar evaluarea corectă a unui sistem nu poate fi realizată numai prin raportare la energia produsă. Trebuie verificat și dacă sistemul permite menținerea activității agricole în condiții funcționale (Joint Research Centre, 2023; IEA PVPS, 2025).

Promovarea energiei din surse regenerabile și simplificarea procedurilor de autorizare sunt susținute, la nivelul Uniunii Europene, prin Directiva (UE) 2018/2001, astfel cum a fost modificată prin Directiva (UE) 2023/2413. Aceste acte nu instituie însă criterii agronomice unitare pentru sistemele agrivoltaice, condițiile concrete privind utilizarea terenurilor agricole fiind stabilite în principal la nivel național.

În horticultură, această condiție este esențială. Culturile sunt sensibile la lumină, circulația aerului, accesul pentru lucrări, mecanizare și managementul microclimatic. Simpla existență a unei culturi sub panouri nu dovedește că sistemul funcționează din punct de vedere agricol. Proiectul trebuie să permită pomilor să rodească, întreținerea livezii, recoltarea și accesul tehnologic real.

12.3. Aspecte generale privind cadrul legislativ din România

În România, regimul amplasării capacităților de producere a energiei din surse regenerabile pe terenuri agricole este stabilit în principal prin Legea fondului funciar nr. 18/1991, cu modificările și completările ulterioare. Legea nr. 254/2022 a introdus posibilitatea utilizării unor terenuri agricole situate în extravilan în sistem dual, atât pentru producția agricolă, cât și pentru producerea energiei electrice din surse regenerabile. Potrivit art. 92 alin. (4²) din Legea nr. 18/1991, această posibilitate nu se aplică terenurilor având categoria de folosință arabil. În cazurile admise de lege, scoaterea definitivă sau temporară din circuitul agricol privește numai suprafețele ocupate efectiv de obiectivele de investiție, restul suprafeței rămânând în circuitul agricol (Legea nr. 18/1991; Legea nr. 254/2022).

Prin urmare, înaintea elaborării unui proiect hortivoltaic trebuie verificată cu exactitate categoria de folosință înscrisă în documentele cadastrale, amplasarea în intravilan sau extravilan și aplicabilitatea regimului de utilizare duală. Această verificare este deosebit de importantă pentru proiectele hortivoltaice amplasate pe terenuri încadrate cadastral ca arabil, pentru care dispoziția actuală privind utilizarea în sistem dual nu este direct aplicabilă.

Fiecare proiect hortivoltaic trebuie analizat individual. În horticultură, menținerea caracterului agricol are o miză specială, deoarece livezile și plantațiile intensive presupun investiții pe termen lung și o tehnologie de cultură complexă. Sistemul energetic trebuie să permită desfășurarea normală a lucrărilor hortivoltaice și funcționarea plantației.

Înainte de proiectare trebuie verificate situația juridică a terenului, regimul urbanistic, categoria de folosință, posibilitățile de racordare la rețeaua electrică și compatibilitatea dintre infrastructura energetică și tehnologia culturii. Aceste verificări se realizează potrivit Legii fondului funciar nr. 18/1991, Legii nr. 350/2001 privind amenajarea teritoriului și urbanismul, Legii nr. 50/1991 privind autorizarea executării lucrărilor de construcții și Legii nr. 123/2012 privind energia electrică și gazele naturale, împreună cu reglementările subsecvente aplicabile.

12.4. Parcursul administrativ al proiectelor hortivoltaice

Din punct de vedere administrativ, proiectele hortivoltaice sunt mai complexe decât cele aferente unei plantații convenționale. Ele combină elemente agricole, constructive și energetice. De regulă, analiza începe cu verificarea situației terenului, a regimului urbanistic și a condițiilor de racordare la rețeaua electrică, apoi continuă cu avizele, documentațiile tehnice, autorizațiile și eventualele cerințe de mediu. Orientativ, verificările inițiale trebuie să includă situația juridică și dreptul de utilizare a terenului, categoria de folosință, amplasarea în intravilan sau extravilan și condițiile privind menținerea ori scoaterea terenului din circuitul agricol, potrivit Legii fondului funciar nr. 18/1991, cu modificările și completările ulterioare.

Regimul urbanistic, necesitatea elaborării sau modificării unei documentații de urbanism, certificatul de urbanism, avizele solicitate prin acesta și autorizația de construire se analizează în conformitate cu Legea nr. 350/2001 privind amenajarea teritoriului și urbanismul și cu Legea nr. 50/1991 privind autorizarea executării lucrărilor de construcții.

Pentru componenta energetică trebuie verificate posibilitatea și condițiile de racordare, soluția de racordare, regimul de autorizare și, după caz, de licențiere, în conformitate cu Legea energiei electrice și a gazelor naturale nr. 123/2012 și cu reglementările ANRE aplicabile.

Procedura de mediu se stabilește în funcție de caracteristicile și amplasamentul proiectului, potrivit Legii nr. 292/2018 privind evaluarea impactului anumitor proiecte publice și private asupra mediului și Ordonanței de urgență a Guvernului nr. 195/2005 privind protecția mediului. Pentru proiectele care pot afecta arii naturale protejate sau situri Natura 2000 devin aplicabile și prevederile Ordonanței de urgență a Guvernului nr. 57/2007.

Aspectele referitoare la cursuri de apă, drenaj, evacuarea apelor pluviale sau lucrările care pot afecta corpurile de apă se verifică potrivit Legii apelor nr. 107/1996 și procedurilor de emitere a avizului de gospodărire a apelor. Lista concretă a documentațiilor, avizelor și autorizațiilor depinde de amplasament, categoria terenului, dimensiunea și puterea proiectului, soluția constructivă și modul de utilizare a energiei produse.

O prezentare sintetică a cadrului juridic aplicabil proiectelor agrivoltaice în România este oferită de CMS (2025), fără ca această sursă profesională să înlocuiască verificarea legislației și a reglementărilor în vigoare.

Succesiunea generală a etapelor prin care trece un proiect hortivoltaic, de la verificarea terenului până la autorizare, racordare și implementare, este prezentată în figura 12.1.



Figura 12.1 – Etapele generale ale dezvoltării unui proiect hortivoltaic (sursa: elaborare proprie)

Cerințele concrete diferă de la un proiect la altul, în funcție de amplasament, dimensiune, configurație, regimul terenului și destinația energiei produse.

În unele cazuri pot fi necesare documentații urbanistice, avize tehnice de racordare, autorizații de construire, evaluări de mediu sau alte avize specifice (Legea nr. 350/2001; Legea nr. 50/1991; Legea nr. 292/2018; Legea nr. 123/2012 și reglementările ANRE aplicabile). Principalele aspecte care trebuie verificate înaintea dezvoltării unui proiect hortivoltaic sunt sintetizate în tabelul 12.2.

Tabelul 12.2 – Aspecte care trebuie analizate înaintea dezvoltării unui proiect hortivoltaic (sursa: elaborare proprie pe baza surselor citate în text)

DOMENIU ANALIZAT	CE TREBUIE VERIFICAT	DE CE ESTE IMPORTANT
 1. Juridic	Situația juridică a terenului, drepturile de utilizare, eventuale restricții sau sarcini.	Poate permite sau bloca dezvoltarea proiectului.
 2. Urbanistic	Regimul urbanistic al amplasamentului și compatibilitatea cu investiția propusă.	Determină procedurile administrative și documentațiile necesare.
 3. Energetic	Posibilitatea racordării la rețeaua electrică și condițiile de valorificare a energiei.	Condiționează fezabilitatea energetică și economică a proiectului.
 4. Agronomic	Compatibilitatea dintre infrastructura energetică și tehnologia culturii horticole.	Asigură menținerea funcției agricole și a productivității.
 5. Operațional	Accesul utilajelor, mecanizarea și desfășurarea lucrărilor horticole (tăieri, stropiri, recoltare).	Permite exploatarea eficientă a plantației.
 6. Administrativ	Avize, acorduri și autorizații necesare (agricole, mediu, urbanism, energie etc.).	Pot influența durata, costul și complexitatea proiectului.
 7. Economic	Eligibilitatea pentru finanțare și structura investiției (costuri, venituri, subvenții).	Influențează rentabilitatea și perioada de recuperare a investiției.
 8. Resurse și infrastructură	Disponibilitatea apei, sistemele de irigații și infrastructura existentă (drumuri, utilități).	Pot condiționa performanța tehnică și economică a proiectului.
 9. Riscuri climatice	Riscuri relevante: secetă, arsură solară, grindină, vânt, temperaturi extreme.	Pot crește valoarea agronomică a SHV prin reducerea impactului climatic.
 10. Obiectivele fermei	Obiectivele principale: autoconsum, reducerea costurilor, protecția culturii, venit suplimentar din energie sau altele.	Determină alegerea configurației optime a sistemului hortivoltaic.
 MESAJ-CHEIE: Cele mai multe probleme ale proiectelor hortivoltaice apar atunci când analiza juridică, energetică și agronomică sunt realizate separat. Evaluarea integrată din faza de proiectare reduce riscurile tehnice, administrative și economice.		

Racordarea la rețea poate deveni unul dintre principalele elemente limitative ale proiectului. Verificarea posibilităților reale de racordare trebuie făcută încă din fazele inițiale.

Etapele și procedurile de racordare sunt stabilite prin Legea nr. 123/2012 și prin Regulamentul privind racordarea utilizatorilor la rețelele electrice de interes public, aprobat prin Ordinul ANRE nr. 59/2013, cu modificările și completările ulterioare.

Un proiect agronomic bun poate deveni dificil de implementat dacă puterea instalabilă este limitată, costurile de racordare sunt ridicate sau condițiile tehnice impun modificări majore. Problemele apar frecvent atunci când infrastructura energetică este proiectată fără integrarea tehnologiei horticole.

Structurile prea joase, stâlpii amplasați necorespunzător sau accesul limitat al utilajelor pot afecta exploatarea livezii. Din acest motiv, analiza administrativă și proiectarea tehnică trebuie corelate cu analiza agronomică.

12.5. Menținerea funcției agricole a terenului

Una dintre condițiile esențiale ale SHV este menținerea funcției agricole reale a terenului după instalarea infrastructurii energetice. În cazul terenurilor pentru care este aplicabil regimul de utilizare în sistem dual prevăzut de Legea fondului funciar nr. 18/1991, funcția agricolă trebuie menținută pe suprafața care rămâne în circuitul agricol, scoaterea din circuit fiind limitată la suprafețele ocupate efectiv de obiectivele de investiție (Legea nr. 18/1991, art. 92).

Infrastructura energetică trebuie să permită accesul utilajelor, întreținerea culturii, tratamentele fitosanitare, monitorizarea plantației și recoltarea.

Dacă sistemul reduce excesiv lumina, limitează mecanizarea sau împiedică dezvoltarea normală a culturii, pot apărea dificultăți tehnice și administrative. Existența unei culturi sub panouri nu demonstrează automat funcționarea agricolă eficientă a sistemului.

Proiectul trebuie să permită producție reală, acces tehnologic, mecanizare, management fitosanitar și menținerea unei structuri productive funcționale.

În proiectarea SHV trebuie urmărite simultan funcționarea agricolă a plantației, accesul pentru lucrări, compatibilitatea cu mecanizarea și menținerea unei cantități suficiente de lumină pentru cultură. Proiectele sunt mai ușor de exploatat atunci când infrastructura energetică este adaptată tehnologiei horticole și arhitecturii plantației încă din faza de proiectare.

12.6. Finanțări și eligibilitate

SHV pot deveni eligibile pentru forme de finanțare dedicate energiei regenerabile, modernizării exploatațiilor agricole sau adaptării la schimbările climatice. Condițiile de eligibilitate diferă însă în funcție de program, tipul beneficiarului, dimensiunea proiectului, modul de utilizare a energiei și menținerea activității agricole. Eligibilitatea nu rezultă automat din caracterul hortivoltaic al investiției, ci se stabilește prin ghidul solicitantului, schema de ajutor și condițiile specifice ale apelului de finanțare. Aceste documente trebuie verificate în forma aplicabilă la data depunerii proiectului. Pe lângă aceste forme de sprijin, sistemele hortivoltaice pot crea oportunități economice suplimentare în contextul tranziției către o agricultură cu emisii reduse de carbon. Pe măsura dezvoltării mecanismelor europene de remunerare a serviciilor climatice, acestea ar putea fi incluse în instrumente de sprijin specifice și, acolo unde cadrul de reglementare și metodologiile de certificare permit, în scheme voluntare de valorificare a reducerilor de emisii sau a creditelor de carbon. În multe situații, demonstrarea faptului că activitatea agricolă rămâne funcțională după instalarea sistemului energetic poate fi importantă pentru justificarea proiectului. Condițiile de finanțare și criteriile administrative se modifică frecvent, motiv pentru care fiecare proiect trebuie verificat individual înaintea depunerii documentațiilor.

Recomandarea practică este ca, înaintea investiției sau a depunerii cererii pentru finanțare, proiectul să fie analizat simultan de proiectant, specialist energetic, consultant juridic, specialist agronom și operatorul de distribuție sau de rețea. Această abordare reduce riscul ca proiectul să fie fezabil energetic, dar problematic agronomic, juridic sau administrativ.

Ca o privire de ansamblu, reglementările privind SHV sunt încă în evoluție, atât la nivel european, cât și la nivel național. De aceea, fiecare proiect trebuie analizat individual și adaptat condițiilor locale. În horticultură, succesul unui proiect nu depinde doar de producția energetică. La fel de importantă este capacitatea sistemului de a păstra funcționalitatea agricolă a plantației.

Cele mai echilibrate proiecte sunt cele în care infrastructura energetică este integrată încă din faza de proiectare cu tehnologia horticola, mecanizarea și cerințele reale ale culturii. Practic, un SHV trebuie să demonstreze simultan producție agricolă funcțională, infrastructură energetică sigură, acces tehnologic, racordare fezabilă și conformitate administrativă. Înaintea investiției, proiectul trebuie verificat simultan din perspectivă agricolă, urbanistică, energetică, constructivă și de mediu. O limitare apărută într-una dintre aceste zone poate modifica soluția tehnică sau chiar fezabilitatea economică.

Capitolul 13.

Sustenabilitate și impact asupra mediului

13.1. Sustenabilitatea sistemelor hortivoltaice

SHV sunt frecvent prezentate ca soluții sustenabile, deoarece permit producția simultană de fructe și energie regenerabilă pe aceeași suprafață agricolă. Totuși, sustenabilitatea nu rezultă doar din prezența panourilor sau din cantitatea de energie produsă. În horticultură, un sistem poate fi considerat sustenabil atunci când infrastructura energetică funcționează fără a compromite pe termen lung plantația și fără a degrada solul, apa și celelalte resurse necesare exploatației horticole (Chatzipanagi și colab., 2023; FAO, 2011).

Literatura de specialitate analizează tot mai frecvent sistemele agrivoltaice prin prisma utilizării duale a terenului: aceeași suprafață contribuie simultan la producția alimentară și la producția energetică.

În horticultură, această idee este importantă deoarece livezile moderne utilizează terenuri cu valoare agricolă ridicată, iar integrarea energiei regenerabile trebuie făcută fără pierderea funcției productive a terenului (Dupraz și colab., 2011; Weselek și colab., 2019; Joint Research Centre, 2023).

Totuși, producția de energie regenerabilă nu garantează automat un impact pozitiv asupra mediului. SHV utilizează structuri metalice, fundații, cabluri, invertoare, module fotovoltaice și, uneori, baterii. Toate acestea au costuri materiale și energetice asociate producției, transportului, instalării, mentenanței și sfârșitului de viață.

Din acest motiv, impactul asupra mediului trebuie analizat pe întreaga durată de viață a sistemului, nu evaluat doar prin energia produsă anual (Fraunhofer ISE, 2022; IEA PVPS, 2021; Nain și Anctil, 2024).

În practică, sustenabilitatea depinde de integrarea culturii cu infrastructura energetică, managementul horticola și protecția resurselor naturale. Un sistem greșit proiectat poate produce energie regenerabilă, dar poate crea probleme de sol, drenaj, biodiversitate sau funcționare a plantației. În schimb, un sistem adaptat condițiilor locale poate contribui simultan la producția energetică, la stabilitatea producției horticole și la reducerea presiunii asupra resurselor.

13.2. Reducerea amprentei de carbon și eficiența utilizării terenului

Unul dintre principalele avantaje ale SHV este posibilitatea reducerii emisiilor asociate consumului de energie din surse fosile, fără eliminarea funcției agricole a terenului. În exploatațiile horticole moderne, consumul de energie produsă hortivoltaic poate fi important pentru irigare, fertilizare, pompare, depozitare frigorifică, sortare și automatizare. Energia produsă local poate reduce dependența de surse externe și poate contribui la scăderea amprentei de carbon, mai ales atunci când este utilizată prin autoconsum (figura 13.1).

Avantajul major al SHV apare prin utilizarea mai eficientă a aceleiași suprafețe agricole. Comparativ cu separarea completă dintre agricultură și producția energetică, utilizarea duală poate limita presiunea asupra terenurilor productive și poate reduce necesitatea ocupării unor suprafețe suplimentare cu infrastructură energetică. În aceste situații, indicatori precum Land Equivalent Ratio sunt utili pentru a compara utilizarea combinată cu utilizările separate ale terenului (Dupraz și colab., 2011).

În horticultură, beneficiile climatice pot apărea și indirect. Reducerea stresului termic, limitarea arsurilor solare sau stabilizarea producției în perioadele foarte calde pot diminua pierderile de resurse, apă, energie și muncă asociate unei producții instabile.

Sustenabilitatea sistemelor hortivoltaice trebuie evaluată pe întreg ciclul de viață și comparată cu scenarii convenționale de utilizare a terenului.



Figura 13.1 – Evaluarea sustenabilității unui sistem hortivoltaic din perspectiva ciclului de viață (LCA) (sursa: elaborare proprie pe baza surselor citate în text)

În același timp, aceste beneficii depind de proiectare. O densitate excesivă a panourilor sau reducerea prea mare a radiației solare poate afecta cultura și poate anula o parte dintre avantajele produse asupra mediului. Din acest motiv, evaluarea de tip Life Cycle Assessment (LCA) este utilă prin aceea că include producția componentelor, montajul, mentenanța, durata de utilizare, înlocuirea componentelor și reciclarea infrastructurii. Sustenabilitatea climatică trebuie demonstrată prin indicatori măsurabili și prin comparație cu variante martor sau cu alte soluții de utilizare a terenului (IEA PVPS, 2021; Nain și Anctil, 2024).

13.3. Biodiversitatea și funcțiile ecologice ale sistemelor hortivoltaice

Impactul SHV asupra biodiversității depinde de proiectare și management. În anumite condiții, infrastructura poate crea o diversitate mai mare de microhabitate decât suprafețele agricole foarte simple și uniform exploatate. Diferențele de lumină, umiditate și temperatură dintre zonele aflate sub panouri și cele dintre rânduri pot influența vegetația spontană, insectele, polenizatorii și organismele din sol (figura 13.2). În horticultură, biodiversitatea are rol funcțional, nu doar ecologic. Polenizarea, activitatea organismelor din sol, prădătorii naturali și vegetația gestionată dintre rânduri pot influența stabilitatea ecosistemului agricol.

În horticultură, biodiversitatea are un rol funcțional, nu doar ecologic. Polenizarea, activitatea organismelor din sol, prădătorii naturali și vegetația gestionată dintre rânduri pot influența stabilitatea ecosistemului agricol. În acest context, gardurile vii, benzile florale și menținerea unei vegetații diversificate pot crea condiții mai favorabile pentru organismele utile și pot contribui la protecția solului. Efectul depinde însă de proiectare și management (Ludzuweit și colab., 2025; SolarPower Europe, 2023).

Efectele nu sunt obligatoriu pozitive. Dacă sistemul este foarte dens, uniform și lipsit de vegetație diversificată, biodiversitatea poate scădea, iar anumite grupuri de organisme utile pot fi afectate. În plus, gestionarea necorespunzătoare a vegetației dintre rânduri poate influența ventilația, umiditatea și dinamica unor boli sau dăunători. De aceea, măsurile favorabile biodiversității trebuie integrate în managementul general al plantației și adaptate astfel încât să rămână compatibile cu mecanizarea, tratamentele, irigarea și recoltarea.

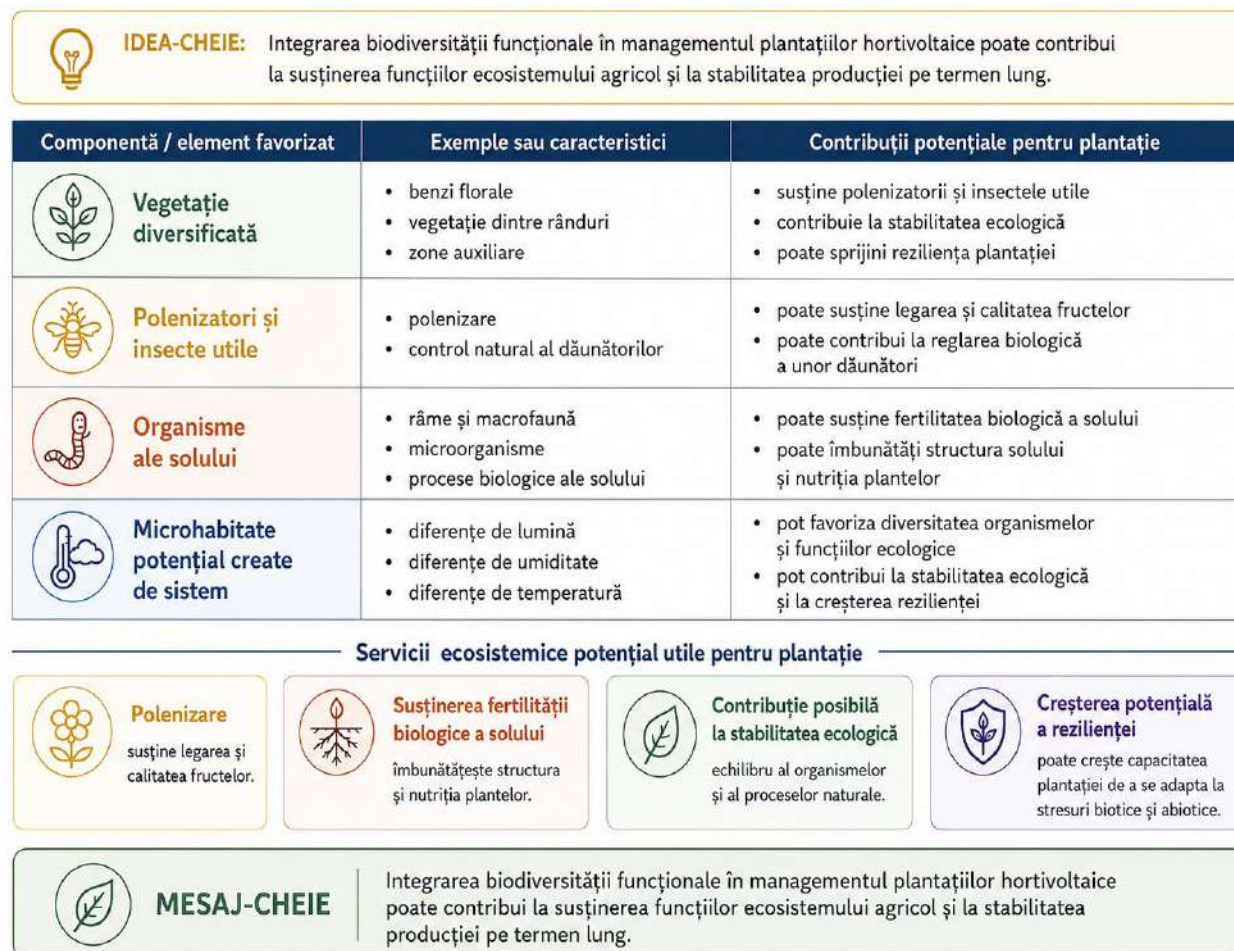


Figura 13.2 – Biodiversitatea funcțională și integrarea acesteia în managementul plantațiilor hortivoltaice (sursa: elaborare proprie pe baza surselor citate în text)

13.4. Solul și gestionarea resurselor de apă

Integrarea panourilor fotovoltaice într-o cultură horticola modifică nu doar microclimatul aerian, ci și procesele de la suprafața solului. Prin umbră, panourile pot reduce temperatura solului și evaporarea directă, ceea ce poate contribui la conservarea apei în perioadele calde și secetoase.

Totuși, efectele nu sunt repartizate uniform. În funcție de configurația sistemului, unele zone pot rămâne mai umede pentru perioade mai lungi, în timp ce altele pot primi mai puțină apă din precipitații și pot deveni dependente de irigare (Adeh și colab., 2018; Barron-Gafford și colab., 2019).

Un efect important asupra solului este redistribuirea precipitațiilor. Panourile pot adăposti parțial suprafața cultivată și pot redirecționa apa către marginea inferioară a modulelor. Ca urmare, poate să apară o alternanță între suprafețele mai uscate de sub panouri și cele cu umiditate excesivă, din dreptul zonelor de scurgere.

Din punct de vedere agronomic, această neuniformitate poate influența dezvoltarea rădăcinilor, absorbția nutrienților, activitatea microbiologică, salinitatea locală și uniformitatea creșterii plantelor (Elamri și colab., 2018).

În plus, zonele de scurgere concentrată pot deveni puncte vulnerabile pentru sol. În funcție de intensitatea ploilor, pantă, textură și gradul de acoperire vegetală, apa acumulată la marginea panourilor poate favoriza eroziunea locală, formarea crustei, compactarea superficială sau băltirea temporară. În solurile ușoare, riscul principal poate fi pierderea rapidă a apei și levigarea unor elemente nutritive. În solurile grele sau slab drenate, riscul poate fi excesul temporar de apă, reducerea aerării solului și afectarea activității radiculare. De aceea, impactul SHV asupra solului trebuie evaluat diferențiat, nu printr-o concluzie generală de tipul „conservă apa”.

Gestionarea durabilă a solului într-un SHV trebuie să urmărească uniformitatea apei disponibile și protecția structurii solului. Sunt utile menținerea unei acoperiri vegetale controlate, mulcirea, evitarea compactării prin trafic repetat, protejarea liniilor de scurgere, dirijarea apei de pe panouri și monitorizarea umidității pe adâncimi diferite.

În plantațiile horticole, aceste măsuri trebuie corelate cu poziția rândurilor, distribuția sistemului radicular, sistemul de irigare și necesarul de acces pentru lucrările tehnologice. În același timp, trebuie evitată interpretarea exclusiv pozitivă a efectului SHV asupra regimului hidric. Reducerea evapotranspirației poate fi benefică, dar numai dacă apa disponibilă ajunge în zona activă a rădăcinilor și este distribuită suficient de uniform. Dacă structura reduce precipitația efectivă sub panouri, creează scurgeri concentrate sau impune irigare suplimentară, beneficiul de conservare a apei poate fi parțial diminuat.

De aceea, sustenabilitatea unui SHV trebuie analizată prin bilanțul real al apei la nivel de parcelă, luând în calcul aportul de apă din precipitații, prin irigare, pierderile prin evapotranspirație, scurgerile, infiltrațiile și disponibilitatea în zona radiculară.

Dar, pe termen lung, solul trebuie monitorizat nu doar prin umiditate, ci și prin indicatorii de fertilitate și structură: pH, materie organică, azot, fosfor, potasiu, conductivitatea electrică, densitatea aparentă, compactare, capacitatea de infiltrare a apei și activitatea biologică. În sistemele în care apa și fertilizantii sunt redistribuiți neuniform, pot apărea diferențe locale care nu sunt surprinse printr-o singură probă medie de sol.

Din acest motiv, prelevarea probelor trebuie adaptată geometriei sistemului: sub panouri, la marginea de scurgere, între panouri și în zona martor. Numai astfel poate fi evaluat corect impactul SHV asupra solului și asupra resurselor de apă.

Configurația panourilor poate crea zone cu umiditate diferită, temperaturi diferite și distribuție neuniformă a apei, ceea ce impune monitorizare locală (Barron-Gafford și colab., 2019; Weselek și colab., 2019).

În solurile grele sau slab drenate, excesul de umiditate poate favoriza compactarea, aerarea insuficientă și problemele radiculare. Dacă drenajul nu este gestionat corespunzător, apa provenită de pe suprafața panourilor poate genera scurgeri concentrate, eroziune locală sau degradarea structurii solului.

În horticultură, aceste probleme sunt importante deoarece degradarea solului poate afecta plantația pe termen lung chiar dacă sistemul energetic funcționează corect.

Proiectarea infrastructurii trebuie corelată cu tipul solului, panta terenului, drenajul natural și tehnologia de irigare. În practică, monitorizarea umidității și temperaturii solului în diferite zone ale sistemului oferă informații importante privind evoluția condițiilor locale. Protecția solului trebuie să rămână prioritară, deoarece degradarea acestuia poate influența funcționarea plantației pe perioade foarte lungi.

13.5. Durata de viață a sistemului și economia circulară

Sustenabilitatea sistemelor hortivoltaice depinde și de modul în care sunt gestionate materialele și componentele infrastructurii energetice pe întreaga lor durată de viață. Panourile fotovoltaice, structurile metalice, cablurile, invertoarele și eventualele sisteme de stocare necesită resurse pentru producție, transport, instalare și mentenanță, iar la final trebuie demontate, reutilizate sau introduse în fluxuri corespunzătoare de reciclare.

Această perspectivă este deosebit de importantă în horticultură. Plantațiile perene funcționează pe perioade lungi, în timp ce modulele, invertoarele și celelalte componente electrice nu au întotdeauna aceeași durată de viață. Din acest motiv, infrastructura trebuie proiectată astfel încât intervențiile de întreținere, înlocuire sau modernizare să poată fi realizate fără afectarea majoră a culturii, a solului ori a lucrărilor tehnologice.

Tabelul 13.1 – Aspecte recomandate pentru verificarea sustenabilității unui SHV în exploatare (sursa: elaborare proprie pe baza surselor citate în text)

DOMENIU	ÎNTREBAREA-CHEIE	SEMNAL FAVORABIL (indicatori pozitivi)	SEMNAL DE AVERTIZARE (indicatori negativi)
 1. Cultura horticola	Cultura își menține funcționalitatea și performanța?	 Producție și calitate stabile, o creștere normală a arborilor, lucrări realizate fără dificultăți.	 Reduceri persistente ale producției sau ale calității, dificultăți în executarea lucrărilor.
 2. Solul și apa	Solul și regimul de apă își păstrează funcțiile esențiale?	 Umiditate a solului echilibrată, fără semne de compactare, eroziune sau băltire.	 Compactare, scăderea infiltrației, băltire, eroziune sau scăderea conținutului de materie organică.
 3. Microclimatul	Condițiile de microclimat sunt compatibile cu nevoile culturii?	 Reducerea stresului termic, temperaturi mai moderate, protecție mpotriva arsurilor solare.	 Umbrire excesivă, temperaturi prea scăzute, umiditate crescută favorabilă bolilor sau limitarea circulației aerului.
 4. Biodiversitatea funcțională	Sunt menținute sau susținute organismele utile și habitatele?	 Polenizatori activi, diversitate de vegetație, activitate biologică ridicată în sol.	 Simplificarea habitatelor, scăderea polenizatorilor, reducerea activității organismelor din sol.
 5. Infrastructura energetică	Sistemul energetic funcționează eficient și în siguranță?	 Randamente stabile, funcționare sigură, pierderi reduse, mentenanță la zi.	 Defecțiuni frecvente, performanță energetică scăzută, pierderi ridicate sau lipsă de siguranță.
 6. Integrarea agricultură-energie	Sunt atinse simultan obiectivele agricole și energetice?	 Beneficii agricole și energetice realizate concomitent, fără compromiterea uneia dintre ele.	 Unul dintre obiective limitează sau afectează negativ atingerea celuilalt.
 7. Durata de viață și mentenanța	Există o strategie clară pentru întreținere și management pe termen lung?	 Plan de întreținere, monitorizare periodică și strategie de modernizare/înlocuire.	 Lipsa planificării, mentenanță insuficientă, risc de scădere a performanței în timp.


MESAJ-CHEIE:
Sustenabilitatea unui SHV nu este dată doar de energia produsă, ci de capacitatea sistemului de a menține pe termen lung productivitatea, funcțiile ecologice și eficiența resurselor.

Economia circulară nu trebuie redusă la reciclarea componentelor după scoaterea lor din funcțiune. Ea trebuie introdusă încă din faza de proiectare, prin alegerea unor materiale durabile și a unor componente accesibile pentru mentenanță, reparabile, înlocuibile și ușor de demontat. Pentru sistemele care includ baterii, analiza trebuie extinsă, deoarece stocarea adaugă echipamente cu durate de viață, riscuri și cerințe de colectare și reciclare diferite (tabelul 13.1).

Pe măsură ce primele generații de instalații fotovoltaice ajung la sfârșitul perioadei de utilizare, gestionarea modulelor scoase din funcțiune devine o problemă tot mai importantă. Reciclarea panourilor fotovoltaice este posibilă, dar rămâne dificilă din punct de vedere tehnic și economic. Sticla și aluminiul, care reprezintă cea mai mare parte din masa modulului, pot fi recuperate relativ ușor. În schimb, separarea straturilor laminate și recuperarea siliciului, argintului și a altor materiale valoroase la o puritate suficientă pentru reutilizare necesită procese mai complexe, consumatoare de energie și încă insuficient dezvoltate la scară industrială.

De aceea, o rată ridicată de reciclare exprimată în masă nu înseamnă automat și recuperarea circulară a tuturor materialelor valoroase. În multe cazuri, obiectivele de reciclare pot fi atinse în principal prin valorificarea sticlei și aluminiului, în timp ce recuperarea siliciului, argintului sau a polimerilor rămâne mai dificilă și mai costisitoare (Heath și colab., 2020; IEA PVPS, 2024, 2025).

În Uniunea Europeană, panourile fotovoltaice sunt încadrate în categoria deșeurilor de echipamente electrice și electronice. Directiva 2012/19/UE stabilește obligații privind colectarea separată, tratarea, valorificarea și reciclarea acestora. În România, aceste prevederi sunt transpuse

prin OUG nr. 5/2015, care include panourile fotovoltaice în categoria echipamentelor electrice și electronice de mari dimensiuni. Prin urmare, gestionarea lor la sfârșitul duratei de utilizare trebuie planificată încă din etapa de proiectare a investiției.

Sustenabilitatea unui SHV nu este determinată exclusiv de cantitatea de energie regenerabilă produsă. Ea depinde de felul în care infrastructura energetică este integrată în plantație, de menținerea calității solului și a resurselor de apă, de continuitatea producției agricole și de posibilitatea întreținerii sistemului pe termen lung.

În horticultură, un sistem poate fi considerat sustenabil atunci când produce energie fără să compromită funcționarea plantației și fără să degradeze resursele de care depinde exploatarea. Această sustenabilitate trebuie demonstrată prin monitorizarea solului și a prin apei, menținerea producției agricole și planificarea realistă a duratei de viață, a demontării și a reciclării infrastructurii.

Capitolul 14.

Studii de caz și lecții practice

14.1. Interpretarea studiilor de caz și limitele transferului tehnologic

Studiile de caz arată modul în care au fost adaptate SHV la culturi, climate și obiective diferite. Unele proiecte urmăresc în primul rând protecția fructelor față de arșiță și arsuri solare, în timp ce altele încearcă să înlocuiască structurile de protecție deja utilizate în plantații sau să mențină un echilibru între producția de fructe și cea de energie. Rezultatele nu pot fi însă transferate direct de la o specie la alta. Efectul panourilor depinde de cantitatea de lumină transmisă, durata și momentul umbririi, de forma de coroană, de condițiile climatice, precum și de standardele de calitate ale fructelor. În plus, multe dintre studiile disponibile au fost realizate pe perioade scurte sau în configurații experimentale diferite, ceea ce limitează comparațiile directe (Magarelli și colab., 2024).

În acest capitol, exemplele internaționale sunt prezentate ca surse de învățare, nu ca modele care trebuie copiate. Pentru fiecare caz sunt urmărite configurația sistemului, modificarea luminii sau a microclimatului, răspunsul culturii și lecția practică rezultată.

14.2. Rezultate internaționale relevante

Franța – protecția livezilor de măr prin sisteme dinamice

În Franța au fost dezvoltate sisteme agrivoltaice dinamice în care poziția panourilor poate fi modificată în funcție de radiație, temperatură și obiectivele culturii. Spre deosebire de sistemele fixe, acestea permit concentrarea umbrei în orele cu risc ridicat de supraîncălzire și o expunere mai mare a culturii în restul zilei (figura 14.1).

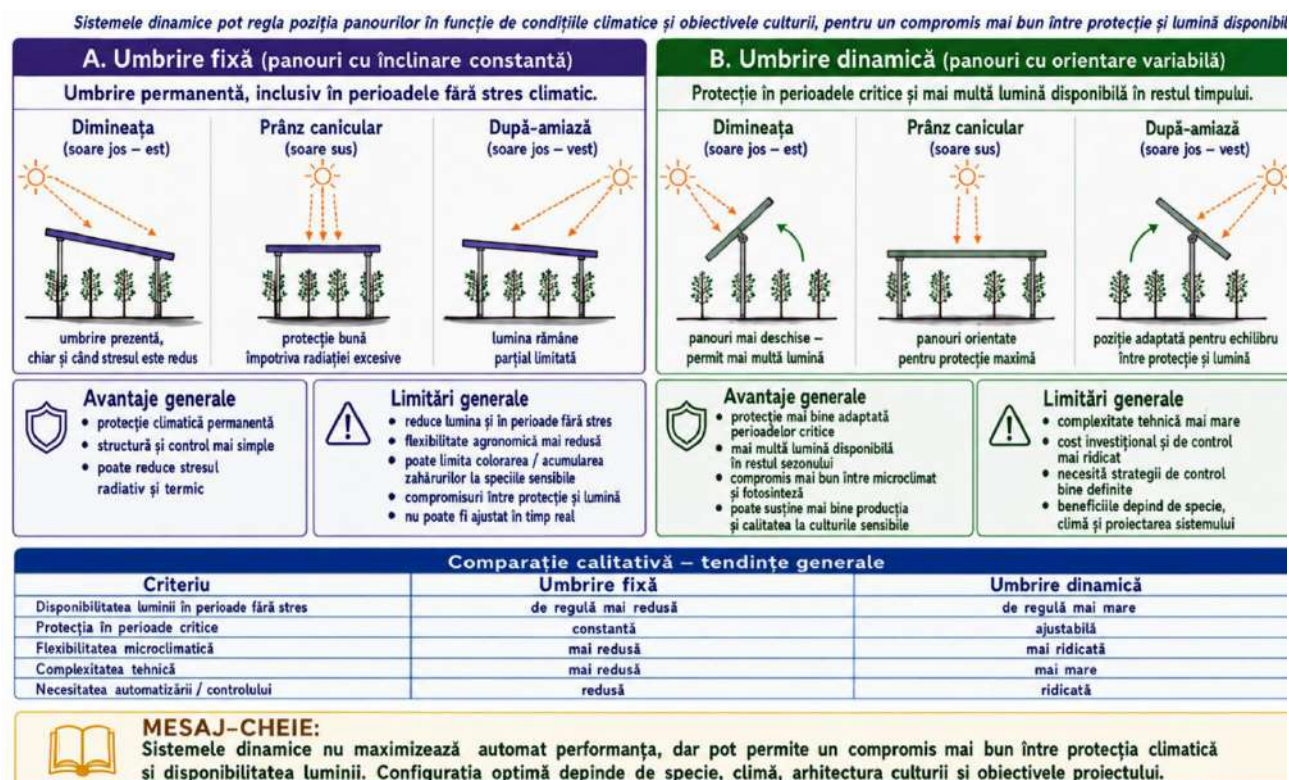


Figura 14.1 – Umbrirea fixă și umbrirea dinamică într-o livadă de măr, în funcție de poziția soarelui și de orientarea panourilor fotovoltaice (sursa: elaborare proprie pe baza surselor citate în text)

Într-o livadă de măr, umbrirea aplicată în perioadele cu radiație și temperatură ridicată a redus temperatura maximă a suprafeței fructelor cu până la 3,3 °C.

În anul cu presiune mai mare de apariție a arsurilor solare, proporția fructelor afectate a fost de 13% în varianta neacoperită și de 2% în sistemul hortivoltaic, fără să se înregistreze modificări ale diametrului fructelor (Lopez și colab., 2024).

Rezultatul arată că panourile mobile pot funcționa ca mijloc de protecție climatică. Studiul nu demonstrează însă că orice strategie de umbră dinamică menține automat producția și calitatea, deoarece efectul depinde de durata umbrei și de cantitatea totală de lumină rămasă disponibilă culturii.

Belgia – păr ‘Conference’ sub panouri semitransparente

În Belgia, un sistem cu module fotovoltaice semitransparente a fost evaluat timp de trei sezoane într-o plantație de păr ‘Conference’. Panourile au redus, în medie, cu 24% lumina disponibilă la nivelul coroanei (Reher și colab., 2025).

Producția a fost cu aproximativ 15% mai mică decât în varianta neacoperită în fiecare dintre cei trei ani. Înflorirea și legarea inițială a fructelor nu au fost afectate, iar performanța fotosintetică a frunzelor a rămas apropiată de cea a pomilor neacoperiți.

Reducerea producției a fost asociată în principal cu fructe de calibr mai mic și cu o proporție mai mare de fructe alungite, în timp ce majoritatea indicatorilor de calitate și comportamentul după recoltare s-au menținut (Reher și colab., 2025).

Acest rezultat este important deoarece arată că menținerea calității fructelor nu înseamnă neapărat menținerea producției. În climatul temperat maritim, o reducere moderată, dar permanentă, a luminii a produs o pierdere productivă repetabilă.

Totuși, valoarea calculată a raportului de echivalență a terenului, de 1,44, a indicat o utilizare totală mai eficientă a suprafeței atunci când au fost luate în considerare împreună producția de fructe și cea de energie.

Concluzia practică este că transmitanța panourilor trebuie stabilită nu doar pentru menținerea calității, ci și pentru limitarea pierderilor de producție. Rezultatul trebuie interpretat împreună cu beneficiile energetice și cu eventualele funcții de protecție climatică ale structurii.

Țările de Jos – răspunsuri diferite la zmeur și căpșun

În Țările de Jos, integrarea panourilor fotovoltaice a fost analizată în culturi de fructe moi, unde structurile de protecție împotriva ploii sunt deja frecvent utilizate. Din acest motiv, panourile pot prelua parțial o funcție tehnologică existentă, pe lângă producerea energiei.

La zmeurul ‘Lagorai’, radiația fotosintetic activă disponibilă sub panouri a reprezentat aproximativ 42% din nivelul exterior, comparativ cu aproximativ 58% sub sistemul convențional de protecție.

Plantele au format frunze mai subțiri și o suprafață foliară totală mai mare, ceea ce indică aclimatizarea la lumină redusă. Producția a fost cu aproximativ 5% mai mică, dar fructele au prezentat un conținut mai redus de zaharuri și o ușoară diminuare a conținutului de substanță uscată (Helsen și colab., 2022).

La căpșun, răspunsul a fost mai puțin favorabil. În două configurații, PAR disponibilă a reprezentat aproximativ 50%, respectiv 37% din nivelul exterior, iar producția s-a redus cu 23–40%, în funcție de configurație și de data plantării. În condițiile experimentului, umbrirea a depășit capacitatea culturii de a compensa reducerea luminii (Helsen și colab., 2022).

Comparația arată că asemănarea botanică sau apartenența la aceeași categorie comercială nu garantează un răspuns asemănător.

Zmeurul a compensat parțial deficitul de lumină prin modificarea aparatului foliar, în timp ce căpșunul a manifestat pierderi productive mult mai mari.

Australia – protecție față de arsuri, dar pierderi de producție și culoare fructe la păr

În Australia, panouri fotovoltaice fixe au fost instalate deasupra unei plantații de păr bicolor 'ANP-0118'. Au fost testate două configurații orientate spre vest, cu înclinări de 45° și 5°, astfel încât umbra să apară în momente diferite ale zilei (Singh și colab., 2024).

Panourile au redus arsurile solare, dar au avut efecte nefavorabile asupra producției și calității comerciale. În primele evaluări, fructele din variantele umbrite au avut masă și producție mai mici, un conținut mai redus de substanță uscată solubilă și o extindere mai slabă a culorii roșii (Singh și colab., 2024).

Autorii au concluzionat că, în condițiile studiului, aceste pierderi au fost mai importante decât beneficiul obținut prin reducerea arsurilor solare (Singh și colab., 2024).

Rezultatele multianuale publicate ulterior au confirmat compromisul. Pe parcursul a patru sezoane, panourile fixe au redus constant producția și colorarea roșie a fructelor, iar configurația aproape orizontală, care a produs o umbră mai mare, a determinat pierderi mai accentuate.

În același timp, structura a limitat vătămările provocate de radiația excesivă și de grindină (Singh și colab., 2026).

Cazul australian arată de ce reducerea stresului nu trebuie confundată cu îmbunătățirea performanței generale. Pentru un soi bicolor, lumina este necesară nu numai fotosintezei, ci și formării culorii care îi determină valoarea comercială.

O configurație poate proteja fructele și, în același timp, poate reduce proporția de producție încadrată în categoria premium.

14.3. Lecții comparative pentru proiectarea sistemelor hortivoltaice

Studiile prezentate arată că efectul unui sistem hortivoltaic nu este determinat numai de prezența panourilor, ci mai ales de modul în care acestea modifică lumina disponibilă culturii. Aceeași funcție de protecție poate fi obținută prin configurații foarte diferite, iar consecințele asupra producției nu sunt întotdeauna favorabile.

Sistemele dinamice oferă cea mai mare flexibilitate. În cazul livezii de măr din Franța, umbrirea a fost concentrată în perioadele cu risc de supraîncălzire, iar reducerea temperaturii fructelor a fost însoțită de limitarea arsurilor solare, fără modificarea diametrului acestora (Lopez și colab., 2024). Acest rezultat susține folosirea panourilor ca mijloc de protecție temporară, nu menținerea permanentă a culturii sub o umbră puternică.

În sistemele fixe, compromisul este mai dificil de controlat. La părul 'Conference' din Belgia, reducerea medie a luminii cu aproximativ 24% a fost asociată cu o scădere repetată a producției, deși majoritatea indicatorilor de calitate s-au menținut (Reher și colab., 2025).

În Australia, protecția perelor împotriva arsurilor solare și a grindinei a fost însoțită de pierderi de producție și de o colorare mai slabă a fructelor, mai ales în configurația care a generat umbră mai intensă (Singh și colab., 2024, 2026).

Răspunsul diferă și între culturi amplasate în sisteme asemănătoare. În Țările de Jos, zmeurul a compensat parțial reducerea luminii prin modificarea aparatului foliar, iar pierderea de producție a fost relativ redusă. La căpșun, niveluri comparabile sau mai accentuate de umbră au determinat scăderi mult mai mari ale producției (Helsen și colab., 2022).

Toleranța observată la o specie nu poate fi folosită, așadar, pentru justificarea aceleiași configurații la altă cultură.

Rezultatele sunt sintetizate în tabelul 14.1. Valorile nu trebuie citite ca praguri universale, deoarece provin din climate, specii și configurații diferite.

Acestea evidențiază însă o concluzie comună: diminuarea stresului termic sau a arsurilor solare nu garantează menținerea producției și a calității comerciale.

Cultura și locația	Configurația sistemului	Modificarea luminii sau a microclimatului	Efecte asupra culturii		Lecția practică pentru proiectare	Sursa
			Beneficii	Efecte nefavorabile		
 Măr Franța	Sistem dinamic (Sun'Agri) Panouri mobile, poziționate în funcție de condițiile de mediu. 	✦ Umbrirea aplicată în perioadele cu radiație și temperatură ridicată. ✦ Temperatura maximă a suprafeței fructelor: ↓ până la 3,3 °C	• Arsuri solare: 2% sub panouri vs. 13% în maror • Diametrul fructelor nemodificat	• Nu s-au raportat efecte negative semnificative asupra producției și calității.	Controlul dinamic al umbririi permite protecție în orele critice fără reducerea permanentă a luminii disponibile culturii.	Lopez et al., 2024
 Păr 'Conference' Belgia	Sistem fix cu panouri semitransparente Module plasate deasupra rândurilor. 	✦ Reducere medie a luminii la nivelul coroanei: ↓ ~24%	• Calitatea fructelor și comportamentul după recoltare menținute • Legarea inițială a fructelor nemodificată	• Producția: ↓ ~15% în fiecare dintre cei 3 ani • Calibrul mediu al fructelor mai mic	Transmiterea luminii trebuie optimizată pentru a limita pierderea producției, chiar dacă calitatea se menține.	Reher et al., 2025
 Zmeur 'Lagorai' Țările de Jos	Sistem fix cu structură înaltă de protecție Panouri integrate într-o structură de protecție împotriva ploii. 	✦ PAR disponibilă: ↓ ~42% din nivelul exterior (~58% sub structura convențională)	• Pierdere de producție relativ redusă: ↓ ~5% • Frunze mai subțiri și suprafață foliară mai mare (aclimatare)	• Conținut mai redus de zahăr în fructe • Scădere ușoară a conținutului de substanță uscată	Acclimatizarea foliară poate compensa parțial deficitul de lumină, dar nu elimină efectele asupra producției și calității.	Helsen et al., 2022
 Căpșun Țările de Jos	Două configurații fixe Niveluri diferite de transmitere a luminii. 	✦ PAR disponibilă: ↓ ~50% și ↓ ~37% din nivelul exterior (în funcție de configurație)	—	• Producția: ↓ 23–40% (în funcție de configurație și de data plantării)	Reducerea puternică a luminii poate depăși capacitatea culturii de compensare. Configurațiile nu se transferă automat între specii.	Helsen et al., 2022
 Păr bicolor 'ANP-0118' Australia	Sistem fix orientat spre vest Panouri cu înclinări de 45° și 5°. 	✦ Umbra mai accentuată în a doua parte a zilei; configurația cu 5° a produs umbră mai intensă.	• Reducerea arsurilor solare • Reducerea unor vătămări provocate de grindină	• Producția, masa fructelor și conținutul de substanță uscată solubili ↓ • Colorarea roșie mai slabă (mai ales la umbră mai mare)	Protecția față de stresul climatic nu compensează întotdeauna pierderea producției și a calității comerciale, mai ales la soiurile pentru care colorarea este esențială.	Singh et al., 2024, 2026

Mesaj practic Efectul unui sistem hortivoltic depinde de nivelul, durata și momentul umbririi, de specie, soi, climă și tehnologia de cultură. Proiectarea trebuie să echilibreze protecția climatică, lumina disponibilă culturii, **producția și calitatea fructelor** și performanța energetică.

Notă: Rezultatele provin din studii realizate în condiții și pe perioade diferite. Valorile prezentate sunt orientative și nu reprezintă praguri universale.

Tabelul 14.1 – Comparația rezultatelor obținute în sisteme hortivoltice pentru culturi fructifere (sursa: elaborare proprie pe baza surselor citate în text)

Notă: Rezultatele provin din experimente diferite și nu permit compararea directă a procentelor ca într-un singur studiu. Ele trebuie interpretate în raport cu specia, soiul, climatul, nivelul de umbră și configurația sistemului.

Din experiența internațională rezultă câteva criterii clare de proiectare. Transmiterea luminii trebuie adaptată culturii, nu stabilită numai în funcție de producția energetică. La soiurile pentru care colorarea, conținutul de substanță uscată sau acumularea zaharurilor definesc valoarea comercială, riscul umbririi trebuie analizat separat de efectul asupra producției totale.

Contează și momentul în care apare umbra. Protecția în orele foarte calde poate fi utilă, în timp ce limitarea luminii dimineața, în zilele noroase sau pe perioade lungi poate reduce asimilarea zilnică. Din acest motiv, procentul mediu de umbră nu descrie singur condițiile reale întâlnite de cultură.

Un sistem corect proiectat trebuie să ofere un avantaj la nivelul exploatației, nu doar un beneficiu fiziologic izolat. Reducerea temperaturii fructelor este valoroasă numai dacă pierderile de producție, culoare sau calitate rămân acceptabile și dacă energia produsă justifică investiția. Evaluarea trebuie să includă, prin urmare, rezultatele horticole, funcția de protecție, producția energetică și costurile sistemului.

14.4. Relevanța pentru România și legătura cu studiile proprii

Experiența internațională oferă repere utile, dar nu poate înlocui testarea în condițiile din România. Radiația solară de intensitate mare, frecvența valurilor de căldură, disponibilitatea apei, înghețurile târzii și tehnologiile de cultură diferă între regiuni, iar efectele panourilor pot varia de la un sezon la altul. Literatura recomandă, de aceea, adaptarea configurației la cultură și validarea locală înaintea extinderii la scară comercială (Weselek și colab., 2019; Fraunhofer ISE, 2022; Magarelli și colab., 2024).

În zonele cu veri calde și radiație intensă, un SHV poate contribui la reducerea stresului termic și radiativ. Acest avantaj este relevant pentru culturile sensibile la arsuri, deshidratarea fructelor sau supraîncălzirea solului. În anii mai răcoroși ori în plantațiile dense, aceeași umbră poate deveni însă limitativă. Configurațiile fixe prezintă un risc mai mare atunci când reducerea luminii nu poate fi adaptată condițiilor meteorologice și fenofazei.

Din acest motiv, introducerea sistemelor hortivoltaice în horticultura românească trebuie să înceapă prin platforme-pilot și comparații cu suprafețe neacoperite. Monitorizarea trebuie să urmărească lumina și microclimatul, dar și producția comercială, calitatea fructelor, formarea mugurilor de rod, consumul de apă și energia obținută. O evaluare desfășurată într-un singur sezon poate surprinde un răspuns favorabil sau nefavorabil determinat în mare măsură de condițiile anului și nu este suficientă pentru validarea unei configurații destinate unei plantații perene.

Capitolul următor prezintă trei studii proprii, realizate în România la coacăz roșu, asimina și căpșun. Aceste cazuri permit verificarea, în condiții locale, a unor probleme identificate și în literatura internațională: câtă lumină rămâne disponibilă sub panouri, în ce măsură se modifică stresul termic și hidric și dacă beneficiile microclimatice se reflectă în producția și calitatea recoltei.

Mesaj practic: Un sistem hortivoltaic nu este validat doar pentru că reduce temperatura sau protejează cultura într-un episod climatic. El devine o soluție agronomică atunci când menține funcția productivă a terenului, oferă o calitate comercială acceptabilă și produce suficientă energie pentru a justifica infrastructura.

Capitolul 15.

Studii de caz și observații experimentale în cadrul proiectului ADER 6.3.23

Cele trei sisteme analizate în cadrul proiectului au fost concepute ca exemple complementare de integrare a producției horticole cu producerea energiei fotovoltaice. Culturile, tipurile de module și obiectivele agronomice au fost diferite (figura 15.1.1), însă toate studiile au urmărit aceeași întrebare practică: în ce condiții poate infrastructura fotovoltaică să modifice favorabil microclimatul fără a limita funcționarea biologică și productivă a culturii?

Pentru a permite compararea, studiile sunt prezentate după o structură comună: justificarea culturii, organizarea platformei, configurația sistemului, monitorizarea, contextul climatic, efectele asupra microclimatului, solului și plantelor, producției și calității, componenta energetică și economică și concluziile parțiale. Structura rămâne flexibilă acolo unde natura culturii sau volumul datelor disponibile nu permit o corespondență perfectă.

	Coacăz roșu (<i>Ribes rubrum</i>) ICDP Pitești-Mărăcineni	Asimina (<i>Asimina triloba</i>) USAMV București	Căpșun (<i>Fragaria x ananassa</i>) SCDP Băneasa
SISTEM			
CONFIGURAȚIE SHV	• structură înaltă • panouri opace • configurații testate: Est-Vest și Sud	• panouri înclinate dispuse pe rând • umbrire parțială • sistem adaptat unei plantații tinere	• structură metalică mobilă • panouri semitransparente • două niveluri de transparență
CONTEXT / PROBLEMĂ	• radiație solară ridicată • temperaturi mari • interes pentru modificarea microclimatului	• sensibilitate la excesul de radiație • necesar de protecție în faza de dezvoltare • adaptarea la lumină	• stres termic și radiativ • temperaturi ridicate la nivelul culturii și al solului • controlul luminii
OBIECTIVUL EVALUĂRII	• evaluarea răspunsului culturii • compararea configurațiilor SHV • analiza efectelor asupra producției și microclimatului	• evaluarea umbririi parțiale • urmărirea răspunsului speciei • compararea cu variante de protecție existente	• evaluarea efectului a două transparențe • urmărirea microclimatului și a răspunsului culturii • integrarea producției horticole cu producția de energie

Ilustrațiile redau aspectul general al sistemelor pe baza fotografiilor și schițelor disponibile și nu reprezintă desene tehnice la scară.

Figura 15.1.1 – Cele trei sisteme hortivoltaice analizate în proiect: specie, partener, configurație SHV, context agronomic și obiectivul evaluării (sursa: date proprii ale proiectului)

Analizate împreună, studiile permit identificarea efectelor care se repetă în condiții horticole diferite, dar și a celor care rămân specifice unei anumite culturi sau configurații. Ele nu oferă o rețetă unică, ci repere concrete pentru evaluarea echilibrului dintre protecția culturii, menținerea producției și randamentul energetic.

Capitolul are rol aplicativ. Nu urmărește doar prezentarea unor rezultate experimentale, ci și evidențierea modului în care sistemele au fost proiectate, a parametrilor considerați critici, a efectelor observate și a lecțiilor care pot fi transferate către alte exploatații horticole.

Metodele de organizare experimentală, monitorizare microclimatică, evaluare agronomică, analiză a solului și măsurare a producției energetice sunt prezentate în capitolul 3 și particularizate pentru fiecare platformă în subcapitolele 15.1–15.4.

15.1. Studiu de caz – Sistemele hortivoltaice în cultura de coacăz roșu, soiul ‘Rovada’

15.1.1. Alegerea speciei și obiectivul agronomic al sistemului

Coacăzul roșu a fost ales deoarece este sensibil la temperaturi ridicate, radiație excesivă, deficit hidric și deshidratarea fructelor. În condițiile sudului României, aceste probleme au devenit tot mai frecvente, mai ales în perioadele cu valuri de căldură, precipitații reduse și temperaturi ridicate în timpul maturării (figura 15.1.2).



Figura 15.1.2 – Simptome de stres termic și radiativ la coacăz roșu ‘Rovada’: arsuri foliare și decolorări localizate pe fructe (sursa: date proprii ale proiectului)

La coacăzul roșu, stresul termic și radiativ se poate manifesta prin supraîncălzirea frunzelor și a fructelor expuse, pierderea turgescenței și apariția clorozelor și a necrozelor marginale la nivelul frunzelor. Fructele expuse direct la soare pot prezenta decolorări localizate și deshidratare, ceea ce poate conduce la deprecierea calității. Efectele se accentuează atunci când radiația intensă se combină cu temperaturi ridicate, vânt cald și evaporare accentuată la nivelul solului.

În plantațiile comerciale, astfel de fenomene pot reduce fermitatea, aspectul comercial și perioada de valorificare. Din acest motiv, sistemul hortivoltaic pentru coacăz roșu a fost evaluat nu doar ca infrastructură energetică, ci și prin prisma efectului de moderare a microclimatului.

Obiectivul agronomic al sistemului a fost verificarea măsurii în care reducerea controlată a radiației poate diminua stresul termic și hidric fără a afecta negativ producția și calitatea fructelor. În paralel, studiul a urmărit modul în care orientarea panourilor influențează microclimatul, apa din sol, starea de nutriție minerală, funcționarea aparatului foliar și componenta energetică.

15.1.2. Amplasamentul și organizarea platformei experimentale

Plantația experimentală a fost amplasată la ICDP Pitești-Mărăcineni, județul Argeș, într-o zonă reprezentativă pentru climatul temperat-continental din sudul României, unde verile sunt frecvent calde, iar perioadele secetoase pot fi prelungite.

Soiul utilizat a fost 'Rovada', un soi de coacăz roșu cu importanță comercială, valorificat pentru productivitate, lungimea ciorchinului și calitatea fructelor.

Sistemul experimental a inclus o variantă martor neacoperită și două variante hortivoltaice cu panouri fotovoltaice opace, diferite prin orientare și configurație:

- martor neacoperit;
- sistem hortivoltaic cu panouri orientate spre sud, denumit în continuare SHV Sud;
- sistem hortivoltaic cu panouri în configurație est-vest, denumit în continuare SHV Est-Vest.

Organizarea și poziționarea variantelor în platforma experimentală sunt prezentate în figura 15.1.3. Compararea celor trei variante a permis evaluarea efectelor celor două configurații asupra microclimatului, solului, nutriției plantelor, producției horticole, calității fructelor și producției de energie.

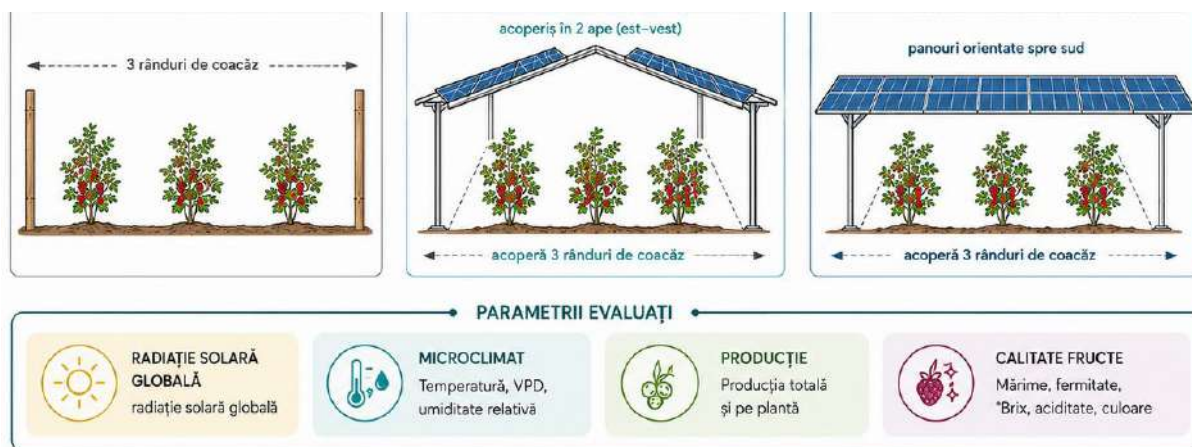


Figura 15.1.3 – Amplasamentul experimental și organizarea variantelor: martor, SHV est-vest și SHV sud.
(sursa: date proprii ale proiectului)

Varianta martor a oferit reperul necesar pentru interpretarea efectelor generate de acoperirea cu panouri. Prin menținerea unei zone neacoperite în aceeași platformă experimentală, diferențele observate în variantele hortivoltaice au putut fi analizate în raport cu condițiile locale ale aceluiași amplasament și ale aceluiași an de studiu.

15.1.3. Configurația constructivă și energetică a sistemului

Sistemul hortivoltaic a fost instalat într-o plantație de coacăz roșu 'Rovada' înființată în anul 2017, la distanțe de 3,0 m între rânduri și 0,75 m între plante pe rând.

La momentul amplasării sistemului, plantele se aflau în anul al optulea de la plantare și erau conduse sub formă de trident.

Plantația dispunea deja de un sistem de susținere alcătuit din stâlpi din lemn gudronat, cu înălțimea de 3,6 m și diametrul de 10 cm, și sârme de palisare cu secțiunea de 3,2 mm.

Această infrastructură a fost integrată în organizarea experimentală, fără modificarea sistemului de conducere al plantelor.

Apa și fertilizantii au fost furnizați printr-un sistem automat de fertirigare. Pentru fiecare dintre cele trei rânduri a fost instalat câte un tub de irigare suprateran, cu diametrul de 16 mm, prevăzut cu picurătoare amplasate la 0,30 m și cu un debit de 1,6 l/oră pentru fiecare emițător.

Sistemul experimental a inclus două configurații fotovoltaice distincte, ambele amplasate deasupra culturii, la înălțimi cuprinse între 3,6 și 6,0 m:

- SHV Est–Vest, cu panouri dispuse în orientare dublă, estică și vestică;
- SHV Sud, cu panouri dispuse într-o singură orientare, spre sud.

Configurația est–vest a fost concepută pentru a distribui diferit captarea radiației și umbrirea între prima și a doua parte a zilei. Configurația sudică a reprezentat varianta cu orientare unică, utilizată frecvent pentru maximizarea captării radiației în intervalele centrale ale zilei.

Prin compararea celor două sisteme a fost posibilă evaluarea simultană a efectelor orientării asupra producției energetice și asupra microclimatului culturii. Diferențele de geometrie au influențat cantitatea și distribuția luminii, temperatura aerului și a solului, umiditatea relativă a aerului și conservarea apei în sol.

Intervalele dintre rânduri au fost menținute înierbate cu specii din flora spontană, cosite periodic și lăsate pe sol pentru compostare. Pe rând, buruienile au fost controlate prin erbicidare, iar drajonii au fost eliminați manual sau prin aplicarea unor produse desicante.

Din punct de vedere funcțional, sistemul a fost proiectat astfel încât să permită menținerea tehnologiei de cultură: accesul între rânduri, irigarea și fertirigarea, lucrările de întreținere a plantelor, monitorizarea și recoltarea. Înălțimea de până la 6,0 m a permis amplasarea panourilor deasupra culturii fără blocarea spațiului tehnologic.

Componenta energetică a fost integrată în ansamblul experimental, însă performanța acesteia este analizată separat în secțiunea 15.1.10. În această secțiune, configurația constructivă este relevantă mai ales prin efectul orientării și al înălțimii panourilor asupra mediului de cultură și asupra compatibilității cu lucrările horticole.

15.1.4. Monitorizarea integrată a sistemului

Evaluarea sistemului hortivoltaic a urmărit simultan componenta climatică, agronomică, pedologică, fiziologică și energetică. Monitorizarea a inclus parametri microclimatici, indicatori ai solului, starea de nutriție minerală și fiziologică a plantelor, producția, calitatea fructelor și producția de energie electrică.

Această abordare integrată a fost necesară deoarece efectele unui sistem hortivoltaic nu pot fi interpretate corect printr-un singur indicator. O reducere a radiației poate fi favorabilă din punct de vedere termic și hidric, dar trebuie verificat dacă nu limitează fotosinteza, producția sau calitatea fructelor (tabelul 15.1.1).

Datele microclimatice au fost utilizate pentru a interpreta modul în care panourile au modificat radiația solară, temperatura aerului și a solului, umiditatea relativă a aerului și umiditatea volumetrică a solului.

Indicatorii agronomici și fiziologici au arătat dacă aceste modificări s-au reflectat în dezvoltarea plantelor, în producție, în calitatea fructelor și în starea aparatului foliar. Analizele de sol și diagnoza foliară au completat interpretarea, oferind informații privind fertilitatea și funcționarea nutrițională a plantelor.

Producția de energie electrică a fost analizată separat, apoi integrată în evaluarea economică agregată a sistemului.

Monitorizarea a fost organizată astfel încât valorile înregistrate sub panouri să poată fi comparate cu cele din zonele neacoperite și interpretate în raport cu particularitățile fiecărui sezon de vegetație. În acest fel, diferențele observate nu au fost tratate ca variații izolate, ci au fost analizate în funcție de poziția față de panouri, intensitatea umbririi, orientarea structurii și condițiile

meteorologice ale anului. Corelarea datelor climatice cu răspunsul plantelor a permis identificarea atât a efectelor favorabile, cât și a limitelor sistemului. Reducerea temperaturii și conservarea umidității pot fi avantajoase în perioadele de arșiță, dar aceste beneficii trebuie analizate împreună cu disponibilitatea luminii, dezvoltarea vegetativă și calitatea recoltei.

Tabelul 15.1.1 – Structura monitorizării integrate realizate în platforma hortivoltaică cu coacăz roșu
(sursa: date proprii ale proiectului)

Componentele monitorizate, parametri evaluați și rolul lor în interpretarea efectelor SHV

COMPONENTĂ MONITORIZATĂ	PARAMETRI EVALUAȚI	ROL ÎN INTERPRETAREA EFECTELOR SHV
 1. MICROCLIMAT	• Radiație solară globală • Temperatura aerului și solului • Umiditatea aerului și solului • Deficitul de presiune a vaporilor (VPD)	 Evidențiază modul în care panourile modifică bilanțul radiativ, termic și hidric al culturii.
 2. FIZIOLOGIA PLANTELOR	• Conținutul de clorofilă (CCI/ICC) • Biometrie (înălțime, număr lăstari, diametru) • Dezvoltare fenologică și vegetativă	 Arată răspunsul biologic al plantelor la modificarea luminii și microclimatului.
 3. PRODUCȚIA	• Producția totală și pe plantă (kg) • Masa medie a fructelor (g) • Numărul de fructe pe ciorchine (nr.) • Lungimea ciorchinului (cm)	 Permite evaluarea efectelor SHV asupra performanței productive a culturii.
 4. CALITATEA FRUCTELOR	• Masa fructelor (g) • Fermitatea (N) • Conținut de substanță uscată solubilă (SST/°Brix) • pH	 Arată dacă protecția microclimatică influențează valoarea comercială și păstrarea fructelor.
 5. SOLUL	• Proprietăți agrochimice (pH, humus, N total, P, K) • Status nutrițional (P, K accesibile) • Indicatori de fertilitate și capacitate de schimb	 Integrează răspunsul edafic și nutritiv al sistemului sol–plantă în condiții SHV.
 6. ENERGIE	• Producția de energie electrică a ansamblului SHV • Energia produsă lunar și anual (kWh) • Performanța sistemului (randament)	 Permite evaluarea funcției energetice și a utilizării duale a terenului.


MESAJ-CHEIE
 Monitorizarea integrată permite interpretarea efectelor SHV ca rezultat al interacțiunii dintre lumină, microclimat, răspunsul plantei, sol, producție, calitatea fructelor și producția de energie.

 **Notă:** Parametrii au fost monitorizați continuu sau periodic pe toată durata perioadei de studiu (2024–2025).

Prin această abordare a fost obținută o imagine mai realistă asupra funcționării sistemului hortivoltaic. Rezultatele au putut fi utilizate ulterior pentru formularea unor recomandări de proiectare și exploatare adaptate culturii, amplasamentului și obiectivelor urmărite.

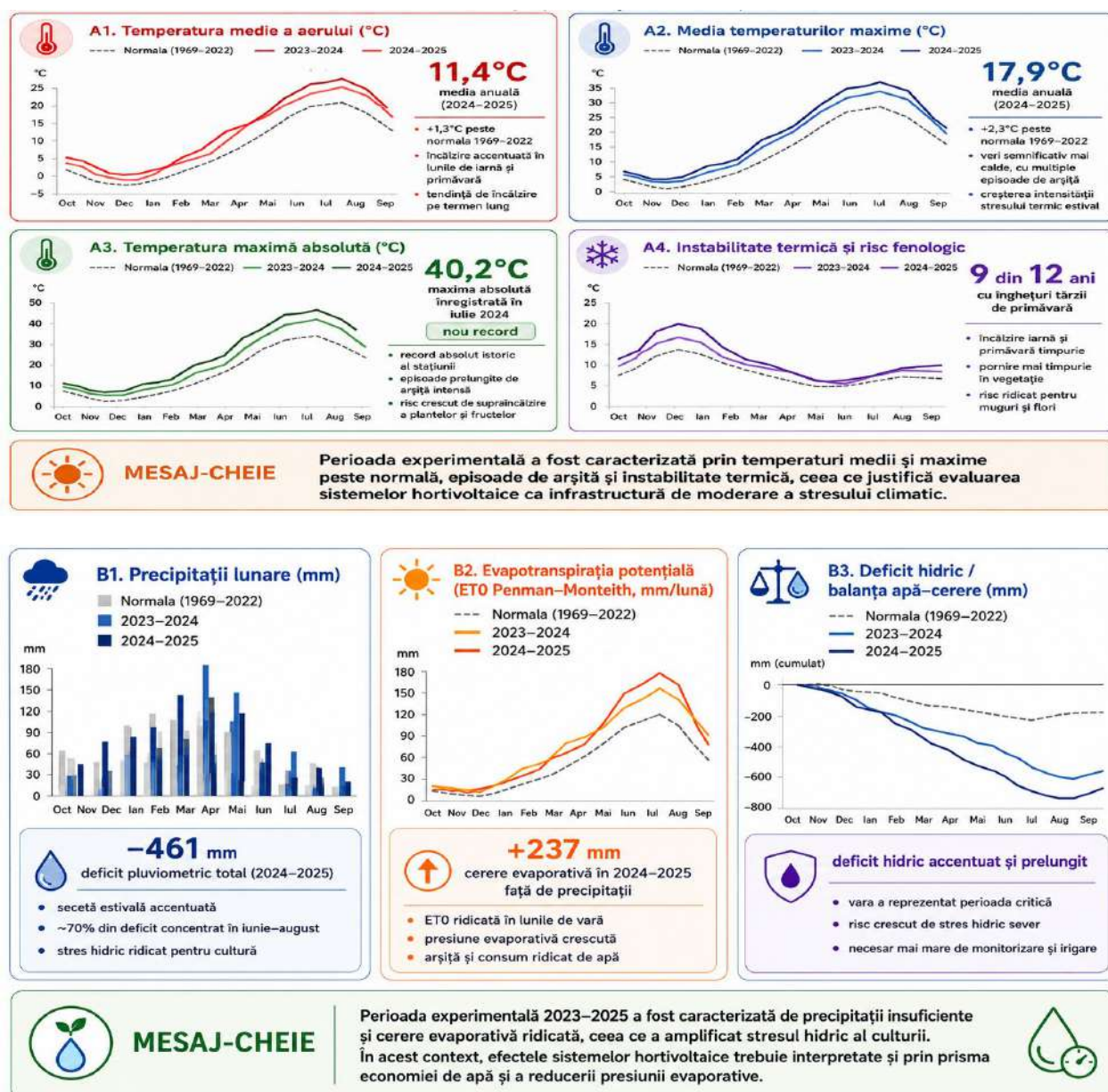
15.1.5. Contextul climatic al perioadei de studiu

Perioada de studiu a fost caracterizată prin variații climatice relevante pentru evaluarea sistemelor hortivoltaice. Episoadele cu radiație intensă, temperaturi mari și deficit hidric au creat condiții favorabile pentru testarea rolului sistemului în moderarea stresului radiativ și termic. Diferențele dintre ani au permis observarea răspunsului sistemului în condiții climatice variabile, de la perioade foarte calde și secetoase până la intervale în care aportul de lumină a devenit mai important pentru funcționarea culturii.

Contextul climatic este esențial deoarece efectele sistemelor hortivoltaice nu rămân constante de la un an la altul. În perioadele cu radiație intensă și temperaturi ridicate, reducerea parțială a radiației poate avea un rol protector, prin limitarea supraîncălzirii frunzelor, fructelor și solului. În schimb, atunci când radiația devine limitativă, aceeași reducere poate influența procesele dependente de lumină, inclusiv fotosinteza, diferențierea mugurilor și acumularea substanțelor solubile în fructe. Prin urmare, avantajele și limitele sistemului trebuie raportate la succesiunea concretă a condițiilor meteorologice, nu doar la valorile medii ale perioadei.

Intensitatea și durata episoadelor de arșiță, distribuția precipitațiilor și alternanța dintre intervalele însorite și cele noroase pot modifica răspunsul plantației. De aceea, rezultatele studiului

de caz trebuie interpretate în raport cu condițiile climatice ale perioadei analizate, sintetizate în figura 15.1.4.



Notă: Figura sintetizează componentele hidrice principale ale contextului meteorologic utilizat pentru interpretarea rezultatelor experimentale.

Figura 15.1.4 – Contextul climatic al perioadei de studiu (2023–2025) în raport cu normala multianuală (1969–2022; sursa: date proprii ale proiectului)

15.1.6. Efectul sistemelor hortivoltaice asupra microclimatului

Sistemele hortivoltaice au modificat evident regimul radiativ la nivelul culturii. Reducerea radiației solare a fost asociată cu modificări ale temperaturii aerului, temperaturii solului, amplitudinii termice a solului și regimului de umiditate, iar efectele au depins de configurația panourilor.

În general, influența asupra suprafeței solului a fost mai bine evidențiată decât influența asupra temperaturii aerului, ceea ce indică faptul că panourile au modificat în primul rând bilanțul energetic local al culturii (figura 15.1.5; Marrou și colab., 2013; Barron-Gafford și colab., 2019; Weselek și colab., 2019).

Comparativ cu martorul neacoperit, radiația solară globală, determinată punctual, la o înălțime de 2 m deasupra solului, s-a redus cu aproximativ 80–94% în varianta SHV Est–Vest și cu

64–83% în varianta SHV Sud, în funcție de lună. Diferențele dintre cele două configurații arată că orientarea panourilor controlează nu numai cantitatea de radiație interceptată, ci și durata și distribuția zilnică a umbrei la nivelul culturii.

Efectul asupra temperaturii maxime a aerului a fost mai moderat decât cel asupra radiației. În varianta SHV Est–Vest, maximele lunare au fost cu aproximativ 0,6–1,8 °C mai reduse decât în martor, iar în varianta SHV Sud cu aproximativ 0,2–1,2 °C. Deși diferențele medii au fost relativ mici, ele pot avea importanță agronomică în zilele caniculare, când reducerea temperaturii maxime contribuie la limitarea stresului termic asupra frunzelor și fructelor.

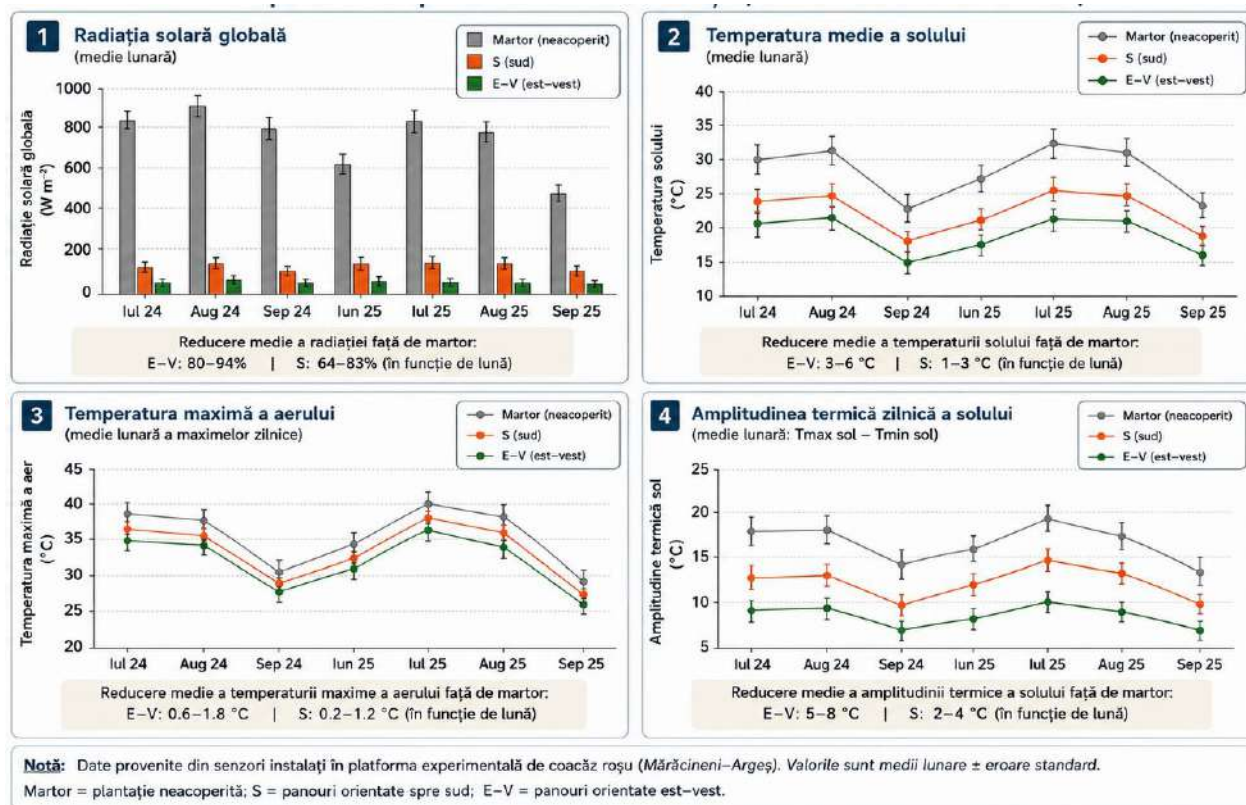


Figura 15.1.5 – Efectul configurației sistemului de panouri asupra radiației solare și regimului termic în platforma experimentală de coacăz roșu din zona Mărăcineni–Argeș (sursa: date proprii ale proiectului)

Amplasarea panourilor a avut un efect mai puternic la nivelul solului. Temperatura medie lunară a solului s-a redus cu aproximativ 3–6 °C în varianta SHV Est–Vest și cu 1–3 °C în varianta SHV Sud. În același timp, amplitudinea termică zilnică a solului a fost diminuată cu aproximativ 5–8 °C în configurația est-vest și cu 2–4 °C sub panourile orientate spre sud. Acest efect este important pentru coacăzul roșu, deoarece temperaturile ridicate ale solului și evaporarea intensă pot accentua deficitul hidric și pot diminua confortul fiziologic al plantelor în perioadele calde.

Prin urmare, varianta SHV Est–Vest a creat cel mai stabil regim termic al solului, reducând atât încălzirea medie, cât și diferențele dintre temperaturile diurne și nocturne.

Efectele asupra umidității au completat modificările radiative și termice. În variantele hortivoltaice, reducerea radiației și moderarea temperaturii au contribuit la menținerea unui microclimat mai protejat. Evoluția lunară și mediile sezoniere ale umidității relative a aerului și umidității volumetrică a solului sunt prezentate în figura 15.1.6.

Valorile cele mai ridicate au fost asociate variantei SHV Est–Vest, varianta SHV Sud a avut valori intermediare, iar martorul neacoperit a înregistrat cele mai reduse valori. Această ierarhie s-a menținut în toate anotimpurile. Diferențele au fost mai mari în sezonul rece, când valorile din varianta SHV Est–Vest au depășit frecvent martorul cu aproximativ 6–10 puncte procentuale. Vara, diferențele au fost mai reduse, dar s-a păstrat aceeași ordine: SHV Est–Vest, SHV Sud și martor.

Creșterea umidității relative a aerului sub panouri trebuie interpretată împreună cu reducerea temperaturii. Un aer mai răcoros poate avea o umiditate relativă mai ridicată chiar dacă umiditatea absolută nu crește în aceeași proporție.

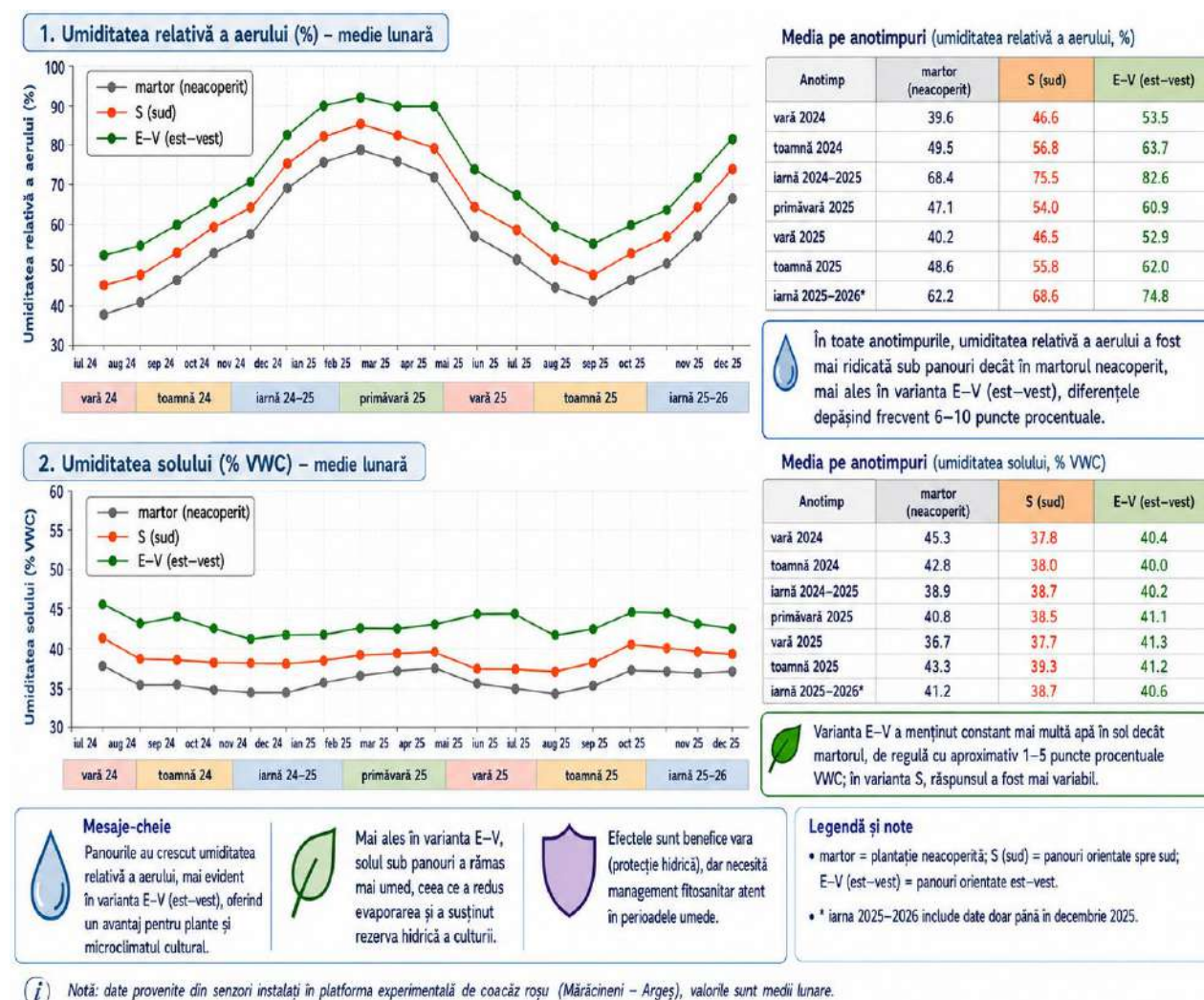


Figura 15.1.6 – Efectul sistemelor hortivoltaice asupra umidității aerului și solului în platforma experimentală de coacăz roșu în zona Mărăcineni-Argeș (sursa: date proprii ale proiectului)

Regimul apei din sol a evidențiat, de asemenea, diferențe între variante. Configurația SHV Est-Vest a menținut constant cele mai ridicate valori ale umidității volumetrice a solului. Diferențele față de martor au fost, în general, de aproximativ 1-5 puncte procentuale VWC, în funcție de anotimp. Varianta SHV Sud a avut un răspuns mai variabil. În unele perioade, valorile s-au situat peste cele determinate pentru varianta martor, iar în altele s-au situat în apropiere sau chiar sub nivelul martorului. Aceste rezultate arată că efectul asupra apei din sol depinde nu numai de reducerea radiației, ci și de geometria panourilor, distribuția precipitațiilor, scurgerea apei de pe module, irigare și poziția senzorilor.

Conservarea mai bună a umidității solului poate reduce necesarul de irigare și poate limita stresul hidric al culturii. În același timp, menținerea unui aer mai umed sub panouri trebuie urmărită atent, deoarece, în anumite condiții, poate favoriza uscarea mai lentă a frunzișului și poate crește riscul apariției bolilor.

Efectele microclimatice au variat între sezoane. Influența sistemului a fost mai redusă iarna și mai evidentă vara, când reducerea radiației intense și conservarea apei au devenit mai importante pentru cultură. În ansamblu, datele microclimatice arată că sistemele hortivoltaice au acționat ca

infrastructuri de moderare locală a mediului de cultură. Efectele nu sunt uniform pozitive sau negative, ci trebuie interpretate în raport cu sezonul, configurația sistemului, fenofaza culturii și obiectivul urmărit. Din perspectivă practică, aceste variații arată că managementul sistemului nu trebuie să rămână identic pe tot parcursul anului.

Programarea irigației, frecvența monitorizării și măsurile fitosanitare trebuie adaptate sezonului și diferențelor dintre zonele acoperite, deoarece avantajele microclimatice din perioadele secetoase pot deveni surse de risc în intervalele reci sau umede.

15.1.7. Efectele asupra solului și statusului nutrițional

15.1.7.1. Modificarea proprietăților agrochimice ale solului

În sistemele hortivoltaice, modificarea radiației solare influențează temperatura solului, evaporarea, regimul hidric și procesele biologice din zona radiculară. Prin urmare, efectele SHV nu se limitează la microclimatul aerian, ci pot modifica treptat și dinamica agrochimică a solului.

În cadrul platformei experimentale de coacăz roșu 'Rovada', analizele agrochimice au fost realizate în colaborare cu ICPA București, pentru variantele martor neacoperit, Est–Vest și Sud. Au fost urmărite reacția solului, conținutul de humus, azotul total, fosforul și potasiul accesibile, proprietățile de schimb cationic și microelementele disponibile pentru nutriția plantelor.

Intervalul de monitorizare de trei ani permite caracterizarea variației anuale a indicatorilor agrochimici și identificarea unor tendințe inițiale, dar este prea scurt pentru evidențierea unor modificări stabile și direct atribuibile configurațiilor hortivoltaice. Descompunerea și mineralizarea materiei organice, transformarea rezervelor de elemente minerale și modificarea unor proprietăți ale solului sunt procese lente, ale căror efecte cumulative devin, de regulă, mai clare pe perioade mai îndelungate. În consecință, rezultatele obținute trebuie interpretate ca expresii ale dinamicii inițiale a solului în cele trei configurații, și nu ca efecte edafice consolidate ale sistemului hortivoltaic.

În ansamblu, solul platformei s-a caracterizat printr-o stare agrochimică favorabilă culturii horticole, cu reacție slab acidă spre neutră, aprovizionare bună cu elemente nutritive și proprietăți de schimb cationic corespunzătoare. În unele etape, variantele hortivoltaice au prezentat valori mai ridicate pentru humus, azot total, fosfor și potasiu accesibil, mai ales în varianta Est–Vest. În alte etape, diferențele au devenit mai puțin uniforme, ceea ce sugerează că răspunsul solului nu este liniar și depinde de condițiile anuale.

Principalele diferențe agrochimice observate între martor și variantele hortivoltaice sunt prezentate în figura 15.1.7.

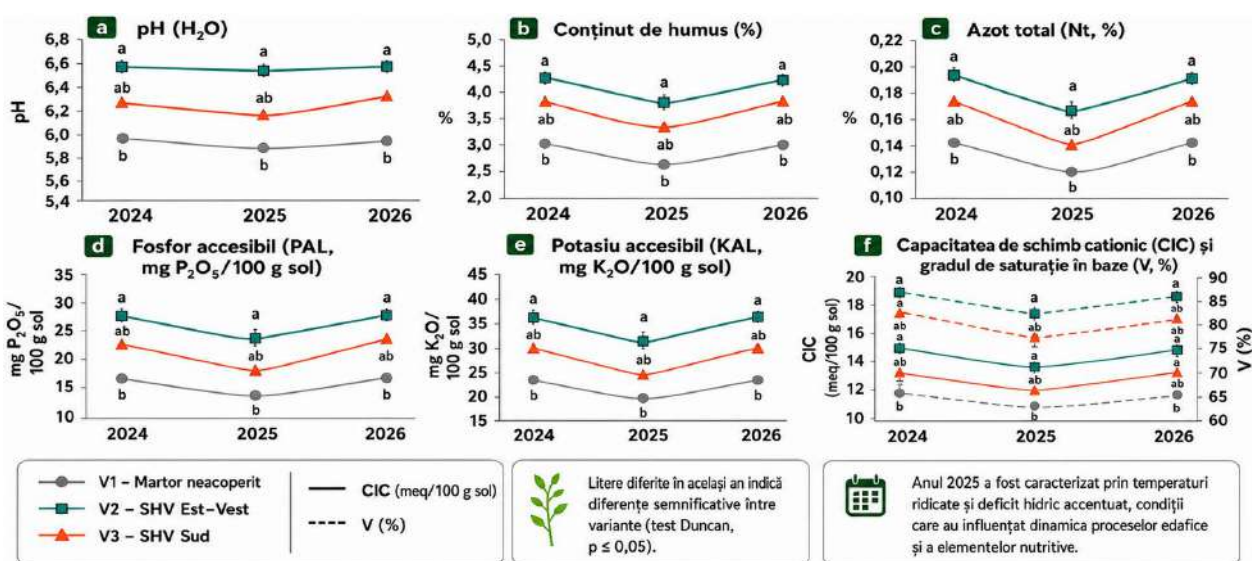


Figura 15.1.7 – Evoluția principalelor proprietăți agrochimice ale solului în variantele hortivoltaice și martor în perioada experimentală 2024–2026 (sursa: date proprii ale proiectului)

Reprezentarea evidențiază faptul că modificările nu au urmat aceeași direcție pentru toți indicatorii, iar avantajele unei variante nu s-au menținut constant pentru toate elementele analizate. Modificările observate ar putea indica o influență indirectă a configurațiilor hortivoltaice asupra proceselor edafice, prin modificarea temperaturii și a regimului hidric al solului.

Reducerea radiației directe și limitarea supraîncălzirii pot modifica evaporarea, conservarea umidității, activitatea biologică, mineralizarea materiei organice și mobilitatea elementelor nutritive. Direcția și amplitudinea acestor procese depind de condițiile meteorologice ale fiecărui an, de distribuția apei, de fertilizare, de absorbția mineralelor de către plante, precum și de heterogenitatea solului.

Amplitudinea acestor schimbări a fost redusă până la moderată și nu a indicat dezechilibre majore ale fertilității în perioada analizată. Interpretarea valorilor trebuie făcută însă cu prudență. Diferențele dintre variante pot reflecta atât efectul configurației panourilor, cât și variabilitatea naturală a solului, distribuția apei, fertilizarea și condițiile meteorologice specifice fiecărui an.

În cazul culturilor perene, monitorizarea agrochimică trebuie continuată pe termen lung pentru a surprinde eventualele acumulări sau pierderi de elemente nutritive, modificările materiei organice și apariția unor diferențe persistente între zonele acoperite și cele neacoperite.

Este important ca probele să fie recoltate din poziții comparabile și, dacă variabilitatea este mare, să nu fie utilizată doar o singură probă medie pentru întreaga variantă.

Includerea componentei pedologice și agrochimice în evaluarea SHV rămâne necesară chiar dacă efectele devin vizibile mai lent decât modificările microclimatului.

Pe termen lung, funcționarea corespunzătoare a unui sistem hortivoltaic depinde nu numai de menținerea producției și de moderarea condițiilor microclimatice, ci și de conservarea fertilității și a funcționării biologice a solului.

15.1.7.2. Modificarea statusului nutrițional al plantelor

Diagnoza foliară completează caracterizarea agrochimică a solului, prin aceea că arată în ce măsură modificările de microclimat, umiditate și disponibilitate a elementelor minerale se reflectă în starea reală de nutriție a plantelor. În sistemele hortivoltaice, această analiză trebuie corelată cu varianta experimentală, anul de observație și nivelul producției, pentru a evita interpretarea izolată a valorilor foliare.

Într-o cultură perenă, frunza nu reflectă doar fertilitatea solului din momentul prelevării. Ea integrează anul climatic, încărcătura de rod, ritmul de creștere, umiditatea disponibilă și modul în care rădăcinile pot utiliza resursele.

Din acest motiv, rezultatele obținute la coacăzul roșu 'Rovada' trebuie citite ca un diagnostic al funcționării plantei în fiecare variantă experimentală, nu ca o simplă comparație între valori mai mari și mai mici.

Analizele foliare efectuate în perioada 2024–2026 arată că sistemele hortivoltaice nu au indus o diminuare generală a nutriției minerale (figurile 15.1.8 și 15.1.9).

Dimpotrivă, pentru unele elemente, frunzele din variantele acoperite au avut frecvent valori mai ridicate decât martorul neacoperit. Cel mai constant semnal apare la potasiu, care a fost mai mare sub SHV în toți anii analizați, atât în varianta E–V, cât și în varianta S.

Azotul a avut, de asemenea, valori superioare martorului în 2025 și 2026, ceea ce sugerează menținerea unei activități vegetative bune sub panouri.

Fosforul, calciul, zincul, cuprul, fierul și manganul au prezentat concentrații foliare mai dependente de an și de configurația structurii.

În 2024, variantele acoperite au fost favorabile mai ales pentru fosfor și potasiu, iar sistemul E–V s-a remarcat prin valori mai ridicate ale calciului, zincului, cuprului și manganului.

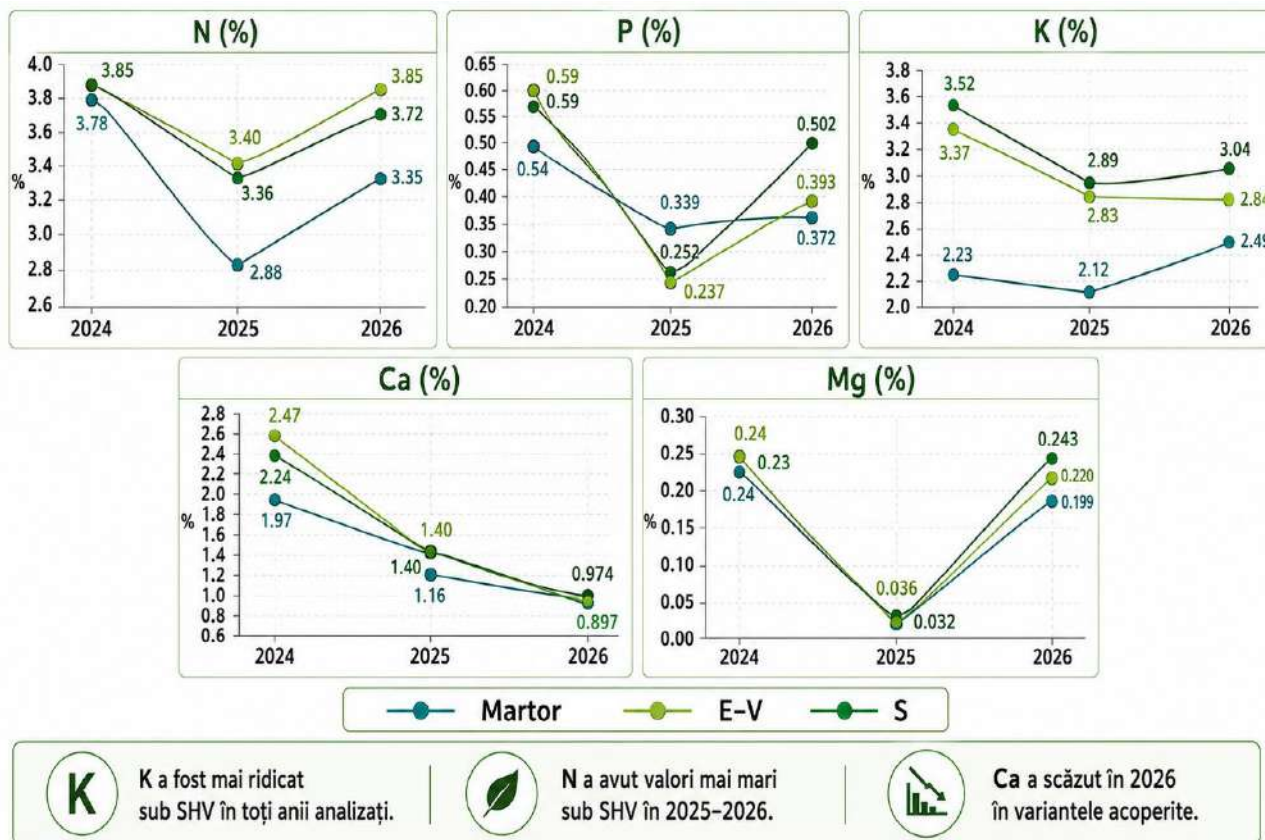


Figura 15.1.8 – Evoluția principalelor macroelemente foliare la coacăzul roșu 'Rovada' în variantele experimentale, 2024–2026 (sursa: date proprii ale proiectului)

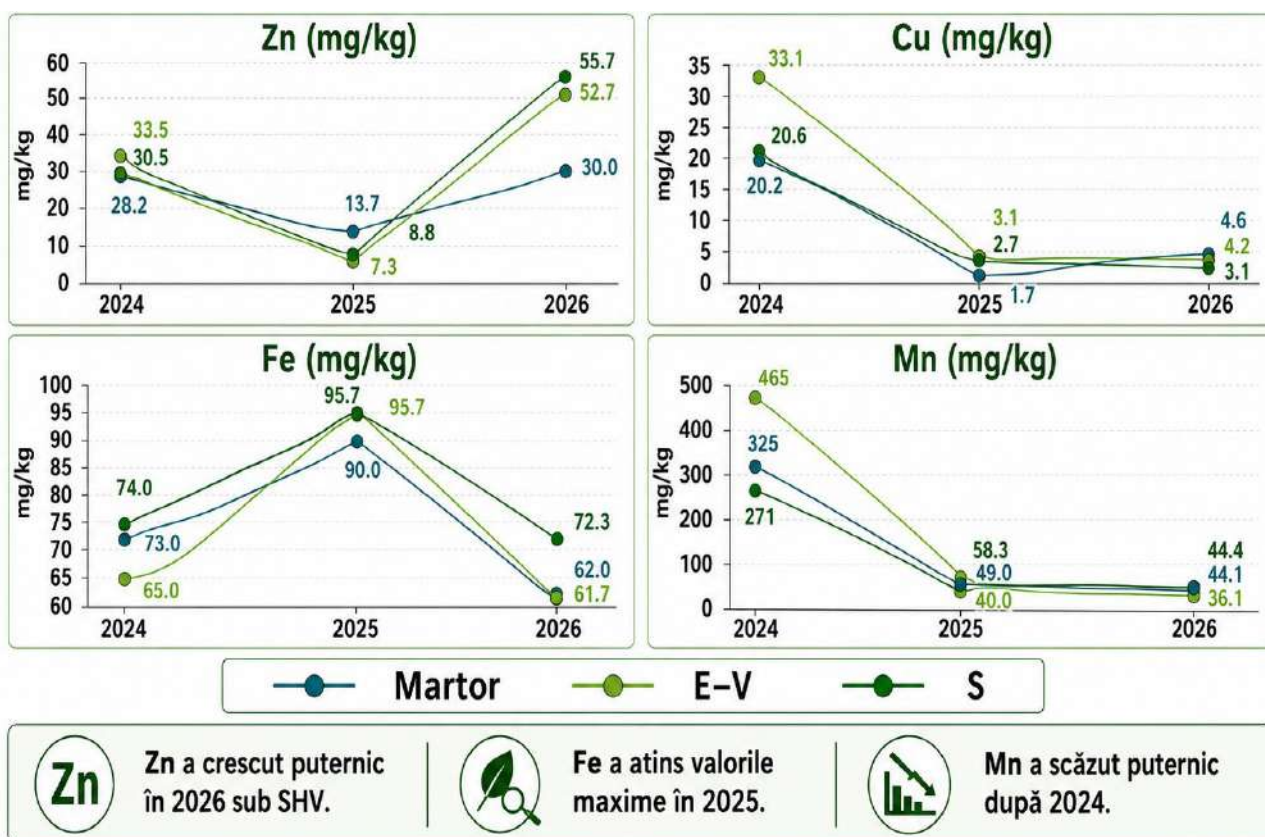


Figura 15.1.9 – Evoluția principalelor microelemente foliare la coacăzul roșu 'Rovada' în variantele experimentale, 2024–2026 (sursa: date proprii ale proiectului)

În 2025, imaginea a fost mai nuanțată: azotul și potasiul au rămas mai mari sub SHV, dar fosforul și zincul au scăzut față de martor. În 2026, profilul foliar a redevenit favorabil variantelor acoperite pentru mai multe elemente, inclusiv N, P, K, Mg și Zn.

Diferențele dintre configurațiile panourilor fotovoltaice, E-V și S, sunt la fel de importante ca diferențele față de martor. Sistemul E-V, cu umbră mai intensă, a avut în unii ani un efect mai evident asupra anumitor microelemente.

Sistemul S a avut, în 2026, cele mai mari valori pentru fosfor, potasiu, magneziu, zinc și fier. Aceste diferențe arată că orientarea panourilor modifică mediul de creștere în moduri care se pot reflecta în compoziția frunzelor. Planta rămâne funcțională sub panouri, dar își schimbă echilibrul mineral în funcție de anul climatic și de configurația sistemului.

Calciul merită urmărit separat. În 2026, valorile sale au fost mai mici în ambele variante SHV, iar această tendință poate avea legătură cu modificarea transpirației și a fluxului de apă prin plantă. Pentru coacăzul roșu, observația este relevantă prin posibila relație cu fermitatea fructelor și integritatea țesuturilor. Pe baza datelor actuale nu se poate vorbi despre un dezechilibru confirmat, dar indicatorul trebuie monitorizat multianual.

Datele referitoare la pigmenții foliari, disponibile pentru 2026, completează această interpretare (figura 15.1.10). Clorofila a și carotenoidele au avut valori ușor mai ridicate sub panouri, în special în varianta S, în timp ce clorofila b a fost mai redusă în ambele configurații. Rezultatul sugerează o ajustare a aparatului fotosintetic la regimul de lumină modificat, nu o reducere pasivă a activității foliare.

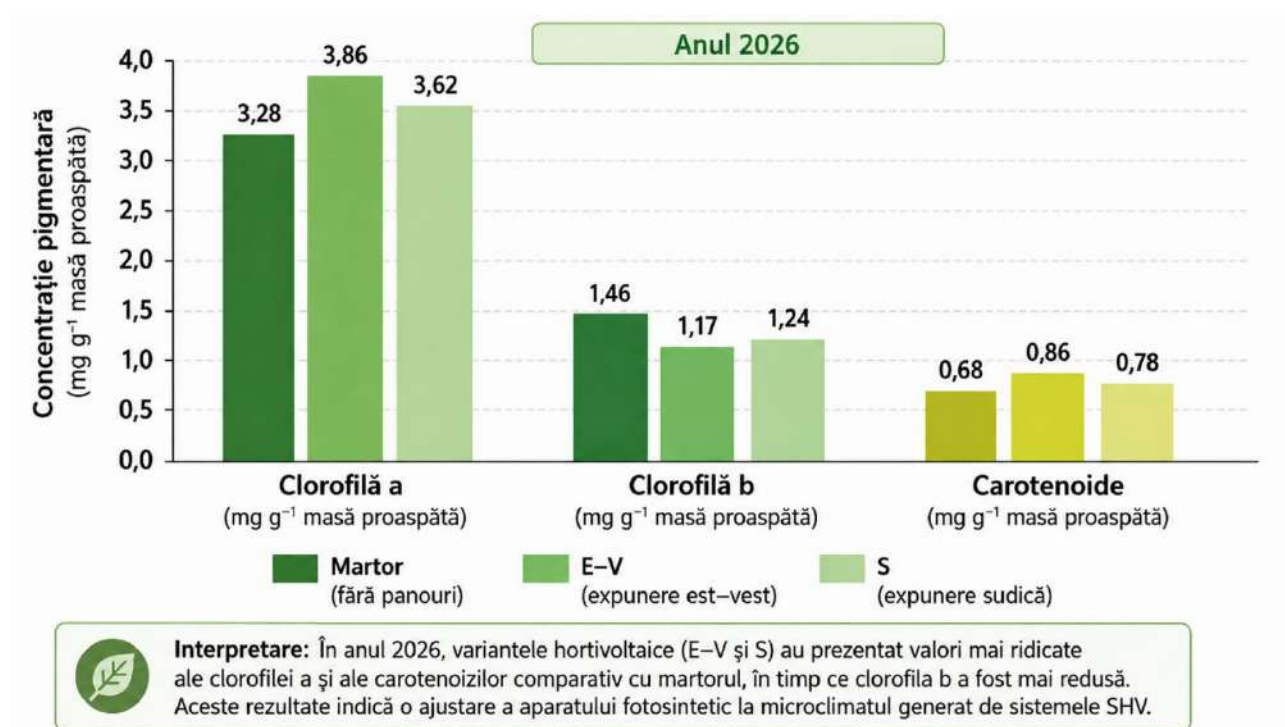


Figura 15.1.10 – Statusul pigmentar al frunzelor de coacăz roșu 'Rovada' în variantele experimentale, anul 2026 (sursa: date proprii ale proiectului)

În ansamblu, diagnoza foliară susține concluziile obținute din microclimat, producție și calitatea fructelor: sistemele hortivoltaice testate nu au afectat negativ funcționarea coacăzului roșu 'Rovada'. Răspunsul este însă diferențiat, iar interpretarea trebuie păstrată în registru prudent. Pentru această specie, în condițiile experimentale analizate, statusul foliar indică adaptare și menținerea funcționalității, nu stres nutrițional evident.

Corelațiile dintre sol și diagnoza foliară au fost analizate exploratoriu, pentru a verifica dacă modificările observate în frunză se leagă de starea agrochimică a solului. Cele mai consistente asocieri au apărut pentru potasiul foliar, care s-a corelat cu unii indicatori edafici și a rămas, în același

timp, unul dintre elementele ale cărui valori s-au menținut constant la nivel ridicat în variantele SHV. Acest rezultat susține interpretarea că sistemele hortivoltaice au influențat indirect funcționarea plantei prin modificarea mediului sol–apă–microclimat, nu doar prin reducerea radiației la nivelul frunzelor.

Totuși, aceste corelații nu trebuie tratate ca relații cauzale definitive. Răspunsul foliar este influențat simultan de anul climatic, varianta constructivă, umiditatea solului, încărcătura de rod și fenofază. În ansamblu, diagnoza foliară confirmă că plantele soiului de coacăz roșu 'Rovada', cultivate sub SHV, și-au menținut un status mineral și pigmentar funcțional. Modificările observate nu indică un dezechilibru nutrițional evident, ci o reconfigurare diferențiată a nutriției și a aparatului fotosintetic, dependentă de an și de configurația panourilor.

15.1.8. Efecte asupra stării fiziologice a plantelor

Evaluarea agronomică a culturii a fost completată prin urmărirea răspunsului fiziologic și spectral al plantelor de coacăz roșu 'Rovada'. Au fost analizate indicii conținutului foliar de clorofilă, conductanța stomatală, fluorescența clorofilei prin raportul Fv/Fm și indicii de vegetație NDVI. Aceste determinări au permis raportarea stării aparatului foliar la regimul radiativ, termic și hidric creat de cele două configurații ale panourilor.

Indicele conținutului foliar de clorofilă a fost mai ridicat în variantele hortivoltaice decât în martor, diferențele dintre orientarea est–vest și cea sudică fiind reduse. Frunzele plantelor cultivate sub panouri și-au menținut astfel un conținut relativ mai ridicat de clorofilă în perioada analizată.

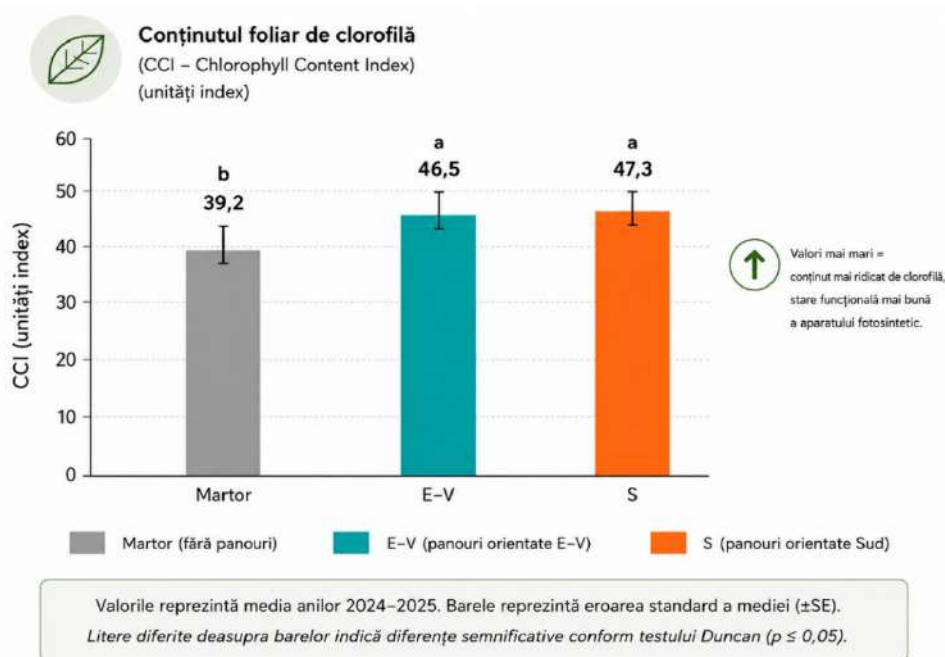


Figura 15.1.11 – Indicele conținutului foliar de clorofilă la soiul de coacăz roșu 'Rovada', în funcție de configurația sistemului hortivoltaic (media anilor 2024–2025; sursa: date proprii ale proiectului)

Valorile CCM pot fi puse în legătură atât cu moderarea radiației și a temperaturii, cât și cu adaptarea frunzelor la un nivel de lumină mai redus. Diagnoza foliară a indicat o stare de nutriție în general echilibrată, fără dezechilibre minerale majore asociate amplasării panourilor. În acest context, diferențele de clorofilă au fost interpretate în principal prin efectul combinat al luminii, temperaturii și disponibilității apei. Datele privind clorofila a, clorofila b și carotenoidele, prezentate în figura 15.1.10, susțin aceeași ajustare a aparatului fotosintetic la condițiile create în sistemele hortivoltaice.

Conductanța stomatală a variat mai mult de la o determinare la alta, iar diferențele dintre variante nu au fost semnificative statistic. Media ușor mai ridicată din configurația est–vest este

compatibilă cu umiditatea mai bine conservată în sol și cu moderarea mai puternică a microclimatului, însă amplitudinea variației nu permite o separare fermă a variantelor. Acest indicator surprinde în special reacția imediată a plantei la radiația, temperatura și umiditatea aerului din momentul măsurării.

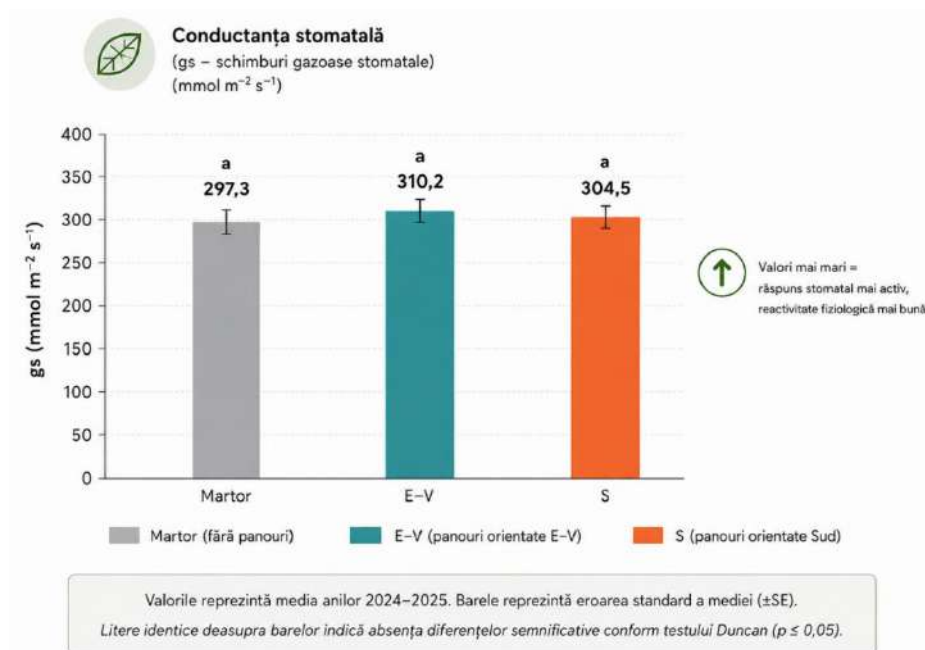


Figura 15.1.12 – Conductanța stomatală a frunzelor la soiul de coacěz roșu ‘Rovada’, în funcție de configurația sistemului hortivoltaic (sursa: date proprii ale proiectului)

Fluorescența clorofilei a fost evaluată prin raportul F_v/F_m , care exprimă eficiența fotochimică maximă a fotosistemului II. Valorile cele mai ridicate au fost înregistrate în varianta cu panouri orientate spre sud, configurația est–vest a ocupat o poziție intermediară, iar martorul a avut media cea mai redusă.

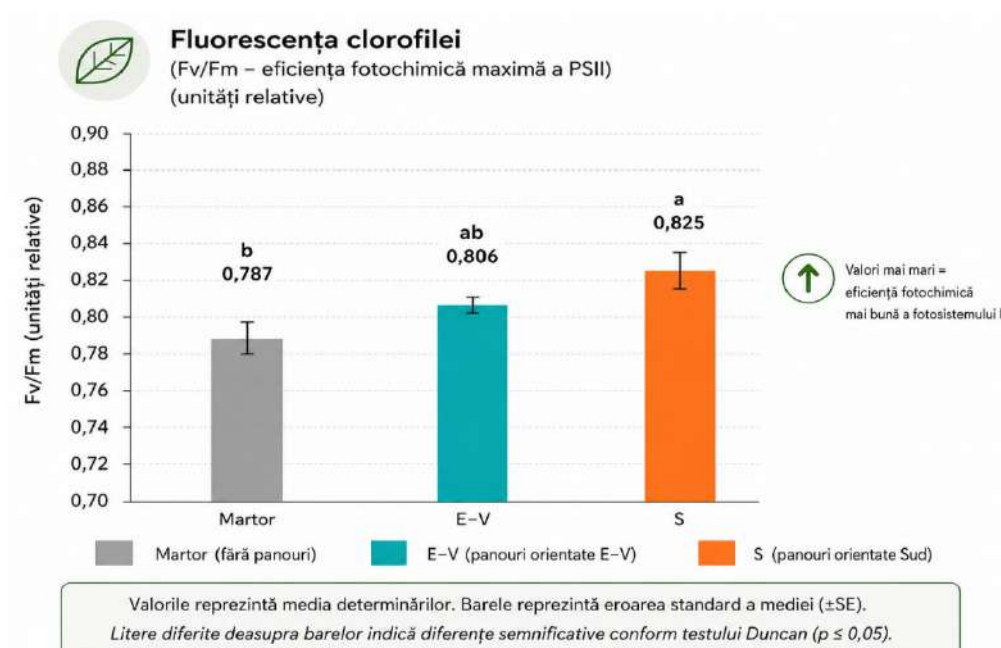


Figura 15.1.13 – Raportul F_v/F_m la soiul de coacěz roșu ‘Rovada’, în funcție de configurația sistemului hortivoltaic (sursa: date proprii ale proiectului)

Răspunsul favorabil din varianta sudică sugerează că această orientare a oferit un echilibru bun între protecția față de radiația excesivă și păstrarea luminii necesare funcționării aparatului fotosintetic. În configurația est-vest, umbrirea mai accentuată a redus mai puternic încălzirea și pierderea apei, fără ca acest avantaj microclimatic să se traducă prin cea mai mare valoare F_v/F_m . Rezultatul arată că eficiența fotochimică depinde de raportul dintre protecția oferită de panouri și lumina efectiv disponibilă plantei.

Indicele NDVI a completat evaluarea la nivelul coronamentului. Ambele variante hortivoltaice au avut valori semnificativ mai ridicate decât martorul, în timp ce diferența dintre orientarea est-vest și cea sudică nu a fost semnificativă. Tendința a fost apropiată de cea observată pentru CCM: starea mai favorabilă a frunzelor s-a regăsit și în răspunsul spectral al masei vegetale.

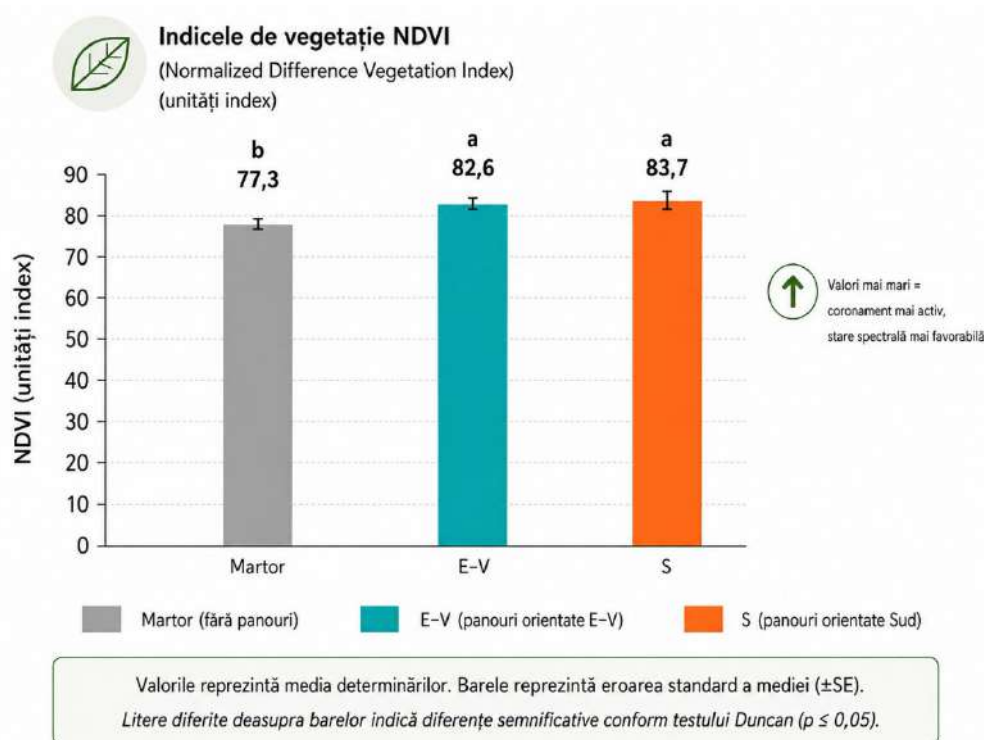


Figura 15.1.14 – Indicele NDVI al coronamentului la soiul de coacăz roșu 'Rovada', în funcție de configurația sistemului hortivoltaic (sursa: date proprii ale proiectului)

Privite împreună, rezultatele descriu un răspuns fiziologic coerent. CCM și NDVI au separat clar plantele cultivate sub panouri de cele din martor și au surprins efectul acumulat al condițiilor de cultură asupra aparatului foliar. F_v/F_m a urmat aceeași direcție generală, dar a evidențiat mai bine diferența dintre cele două regimuri de lumină, cu un avantaj pentru orientarea sudică. Conductanța stomatală a rămas indicatorul cel mai variabil, corespunzător unei reacții rapide la condițiile de moment.

Această distribuție a răspunsurilor este concordantă cu datele microclimatice prezentate anterior. Configurația est-vest a redus mai puternic radiația și a favorizat conservarea apei în sol. Orientarea sudică a păstrat un aport luminos mai mare, menținând în același timp o stare foliară, spectrală și fotochimică favorabilă. La martor, expunerea integrală s-a asociat cu valori mai reduse ale CCM, NDVI și F_v/F_m .

Răspunsul fiziologic s-a reflectat și în comportamentul agronomic al culturii. Producțiile obținute sub panouri au fost mai ridicate, iar principalii parametri de calitate s-au menținut la niveluri corespunzătoare. Fermitatea mai redusă a fructelor din variantele hortivoltaice trebuie însă avută în vedere la alegerea momentului recoltării și a condițiilor de valorificare.

Din punct de vedere practic, ambele configurații s-au dovedit favorabile coacăzului roșu în raport cu martorul neacoperit. Orientarea est-vest este mai potrivită în amplasamente unde supraîncălzirea și pierderea apei reprezintă principalii factori limitativi. Orientarea sudică păstrează mai multă lumină și oferă un compromis mai echilibrat între protecția culturii, funcționarea aparatului fotosintetic și producție.

Pentru urmărirea stării fiziologice a culturii, CCM și NDVI pot fi utilizate împreună ca indicatori ai evoluției generale a aparatului foliar și coronamentului. Raportul Fv/Fm aduce informații asupra funcționării fotosistemului II, iar conductanța stomatală surprinde reacțiile rapide la schimbările de microclimat. Asocierea lor cu umiditatea solului și diagnoza foliară permite o interpretare mai sigură a răspunsului plantelor și separarea efectelor legate de regimul hidric, nutrițional și radiativ.

15.1.9. Efectele asupra producției și calității

Răspunsul agronomic al soiului 'Rovada' a fost evaluat prin producție și calitatea fructelor. Această abordare este importantă deoarece un sistem hortivoltaic nu poate fi apreciat numai prin energia produsă sau prin capacitatea sa de a reduce radiația solară.

Pentru o cultură horticola, efectul real al infrastructurii energetice trebuie verificat prin menținerea productivității, păstrarea calității comerciale a fructelor și starea generală a plantelor. Reducerea stresului termic sau conservarea mai bună a apei au valoare agronomică numai dacă se reflectă favorabil în funcționarea culturii.

Performanța productivă medie a soiului 'Rovada' în variantele martor, Est-Vest și Sud, pentru anii 2024 și 2025, este prezentată în figura 15.1.15.

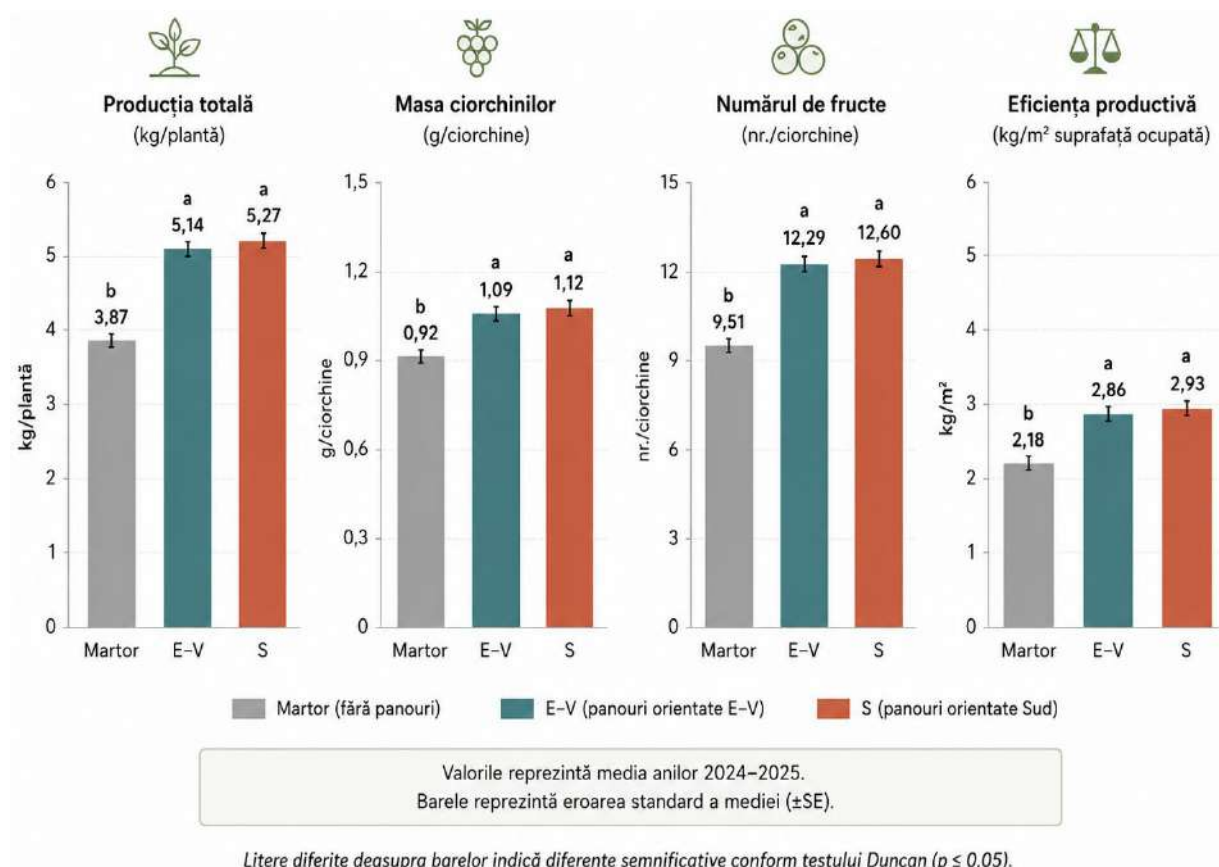


Figura 15.1.15 – Compararea performanței productive a soiului de coacăz roșu Rovada între variantele de acoperire cu panouri fotovoltaice (media anilor 2024-2025; sursa: date proprii ale proiectului)

În perioada analizată, variantele hortivoltaice au fost asociate cu menținerea sau îmbunătățirea performanței productive față de martorul neacoperit. Rezultatul indică faptul că reducerea moderată a radiației nu a afectat negativ cultura în condițiile experimentale studiate.

Dimpotrivă, în anumite situații, moderarea temperaturii și conservarea mai bună a umidității au putut crea condiții mai favorabile pentru dezvoltarea fructelor.

Acest răspuns nu trebuie însă generalizat independent de condițiile anului. Intensitatea radiației, durata episoadelor de arșiță, distribuția precipitațiilor și momentul apariției deficitului hidric pot modifica raportul dintre avantajele protecției oferite de panouri și eventualele limite determinate de reducerea luminii.

Coacăzul roșu prezintă o anumită sensibilitate la temperaturile ridicate și la stresul radiativ, iar efectul umbririi moderate poate deveni mai important în perioadele foarte calde. În anii mai puțin restrictivi din punct de vedere termic, diferențele dintre variante pot fi mai reduse sau pot apărea prin alte componente ale răspunsului culturii.

Calitatea fructelor a fost evaluată prin masa medie, conținutul de substanță uscată solubilă, pH, fermitate și alți indicatori relevanți pentru valoarea comercială și comportarea la recoltare. Rezultatele comparative sunt prezentate în figura 15.1.16.

Efectele asupra calității nu au avut aceeași intensitate pentru toți indicatorii. Variantele hortivoltaice au favorizat obținerea unor fructe cu masă mai ridicată, mai ales în configurația cu expunere sudică, fără modificări importante ale pH-ului sau ale conținutului de substanță uscată solubilă. Acest rezultat sugerează că umbrirea moderată poate susține creșterea fructelor fără să modifice semnificativ echilibrul general dintre aciditate și acumularea zaharurilor.

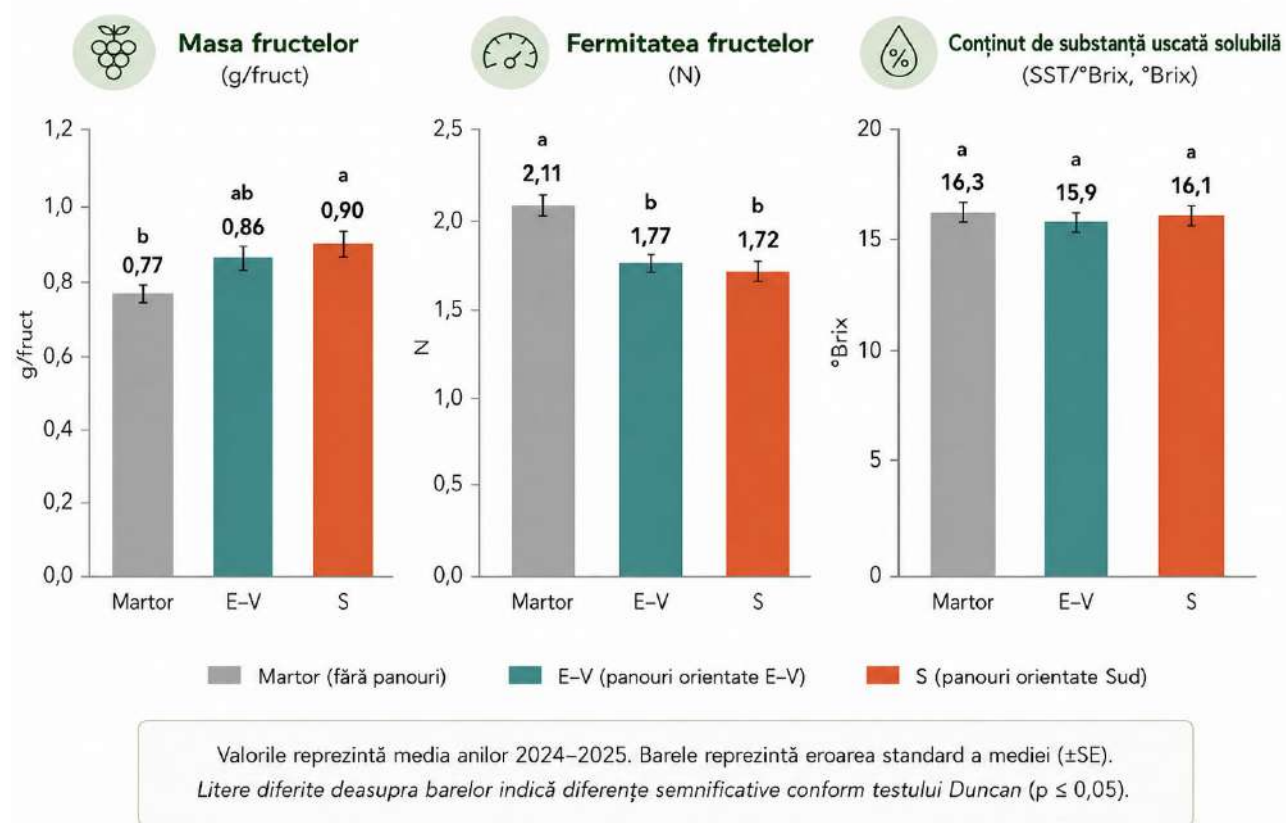


Figura 15.1.16 – Compararea calității fructelor de coacăz roșu Rovada între variantele de acoperire cu panouri fotovoltaice (media anilor 2024-2025; sursa: date proprii ale proiectului)

Masa mai mare a fructelor poate fi asociată cu un regim hidric mai favorabil și cu reducerea stresului termic în perioadele de creștere. Totuși, răspunsul trebuie interpretat împreună cu încărcătura de rod, momentul recoltării și distribuția producției pe parcursul sezonului, deoarece acești factori pot influența atât dimensiunea, cât și compoziția fructelor.

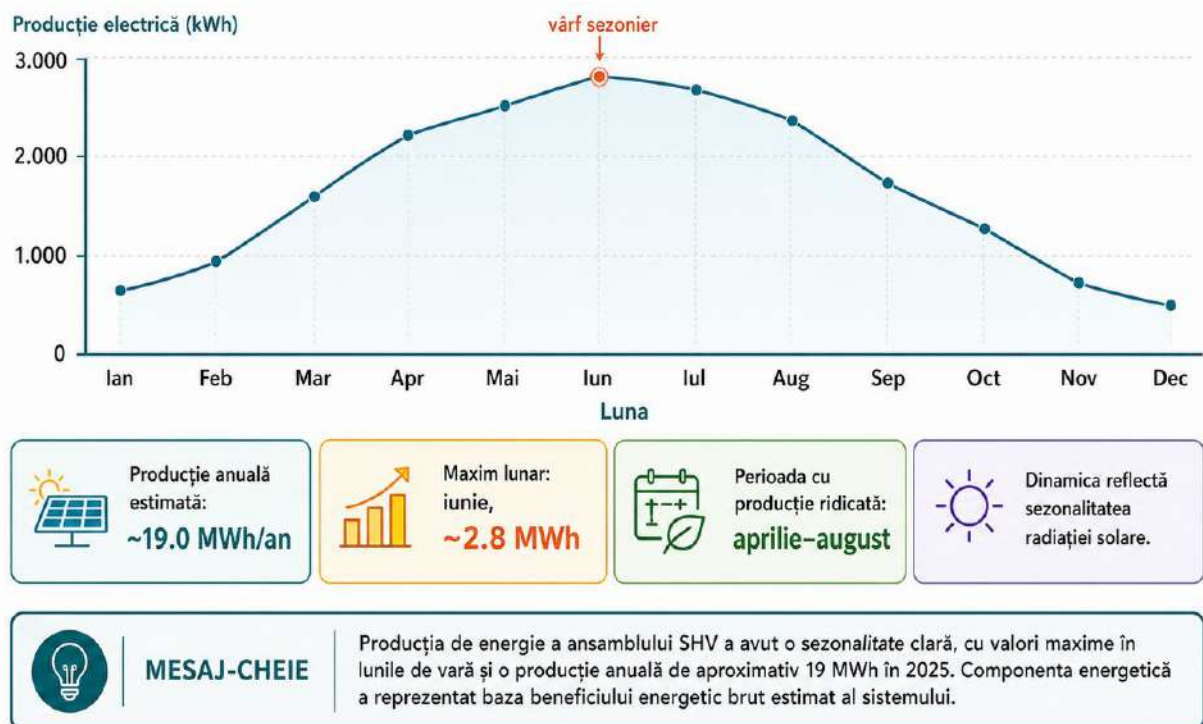
Un efect mai clar a fost observat asupra fermității în anul 2025. Fructele provenite din variantele cu panouri au prezentat valori mai reduse decât cele din martor, ceea ce indică faptul că microclimatul mai protejat poate influența textura și consistența fructelor.

Această observație trebuie corelată și cu prelungirea perioadei de recoltare. Menținerea fructelor pe plantă până la maturități mai avansate poate determina o reducere treptată a fermității, chiar și atunci când masa sau compoziția chimică rămân favorabile. Din perspectivă practică, o astfel de modificare poate influența momentul optim de recoltare, manipularea, transportul și durata de păstrare. Privite împreună, producția, calitatea fructelor și răspunsul fiziologic arată că sistemele hortivoltaice nu au exercitat un efect negativ general asupra culturii de coacăz roșu 'Rovada'. În condițiile experimentale analizate, efectul a fost favorabil sau neutru, cu avantaje mai evidente pentru anumite componente productive și fiziologice și cu unele modificări selective ale calității, precum reducerea fermității. Tocmai de aceea, evaluarea sistemului nu trebuie bazată pe un singur indicator, ci pe concordanța dintre efectul microclimatic, răspunsul solului, producția obținută și calitatea recoltei.

15.1.10. Componenta energetică și economică

Componenta energetică a sistemului a fost evaluată prin producția lunară de energie electrică generată de ansamblul hortivoltaic. Producția a crescut odată cu intensificarea radiației solare în sezonul cald și a scăzut către sezonul rece, reflectând dinamica sezonieră normală a conversiei fotovoltaice. Evoluția lunară a energiei produse în anul 2025 este prezentată în figura 15.1.17. Valorile cele mai ridicate au fost înregistrate în lunile cu durată mare a zilei și niveluri ridicate ale radiației, în timp ce producția din lunile de toamnă și iarnă a fost limitată de reducerea radiației disponibile și de durata mai scurtă a zilei.

Producția anuală de aproximativ 19.000 kWh arată că sistemul a avut o componentă energetică semnificativă, capabilă să contribuie la acoperirea unor consumuri ale exploatației horticole. Într-o fermă, energia generată poate fi utilizată pentru pomparea și distribuția apei de irigare, funcționarea instalațiilor de fertirigare, ventilare, refrigerare, sortare, condiționare, iluminat tehnologic sau pentru alte consumuri auxiliare. Valoarea practică a energiei produse depinde însă de măsura în care producția fotovoltaică se suprapune peste profilul de consum al exploatației. Energia utilizată direct în momentul producerii poate avea o valoare economică diferită de energia livrată în rețea, iar avantajul autoconsumului este mai mare atunci când principalele activități consumatoare se desfășoară în timpul zilei și în sezonul cu producție fotovoltaică ridicată.



Notă: Valorile lunare sunt aproximative și au fost reconstituite pe baza monitorizării energetice realizate prin aplicația invertorului fotovoltaic.

Figura 15.1.17 – Dinamica lunară a producției de energie electrică a ansamblului SHV în anul 2025 (sursa: date proprii ale proiectului)

În cazul exploatațiilor horticole irigate, această suprapunere poate fi favorabilă. Necesarul de pompare crește de regulă în perioadele calde și secetoase, când și producția fotovoltaică este mai mare. Totuși, concordanța dintre producție și consum trebuie verificată pe baza datelor orare sau zilnice, deoarece o valoare anuală agregată nu arată dacă energia a fost utilizată direct, stocată sau injectată în rețea.

Pentru exprimarea orientativă a valorii economice a energiei generate a fost calculat beneficiul energetic brut, ca fiind produsul dintre cantitatea anuală de energie electrică și valoarea unitară considerată în analiză:

$$B_e = E \times P_{kWh},$$

unde E reprezintă producția anuală de energie electrică, iar P_{kWh} reprezintă prețul de valorificare sau de înlocuire al energiei electrice.

În condițiile ipotezelor utilizate, producția anuală de aproximativ 19.000 kWh și valoarea de 1,5 lei/kWh au condus la un beneficiu energetic brut estimat la aproximativ 28.500 lei/an:

$$19.000 \text{ kWh} \times 1,5 \text{ lei/kWh} = 28.500 \text{ lei/an}$$

Valoarea unitară de 1,5 lei/kWh reprezintă o ipoteză de calcul și trebuie adaptată situației reale a exploatației. În practică, valoarea energiei poate varia în funcție de tariful evitat prin autoconsum, contractul de furnizare, regimul de compensare, prețul aplicabil energiei livrate în rețea și eventualele taxe sau costuri asociate.

Din acest motiv, estimarea nu trebuie confundată cu venitul efectiv încasat. Dacă o parte importantă a energiei este autoconsumată, beneficiul constă în principal în reducerea cheltuielilor cu energia cumpărată din rețea. Dacă energia este livrată în rețea, valoarea economică depinde de condițiile contractuale și de mecanismul de valorificare aplicabil.

De asemenea, producția anuală nu este neapărat constantă pe întreaga durată de funcționare a sistemului. Variațiile meteorologice dintre ani, murdărirea modulelor, umbrirea locală, perioadele de indisponibilitate, eficiența inverterului și degradarea treptată a panourilor pot modifica energia efectiv obținută. Pentru o evaluare realistă este necesară urmărirea producției pe mai mulți ani și compararea valorilor măsurate cu estimările de proiectare.

Beneficiul energetic brut nu reprezintă profit net. Calculul nu include investiția inițială, costurile de proiectare și racordare, mentenanța, înlocuirea unor componente, asigurarea, amortizarea echipamentelor sau eventualele costuri de finanțare și stocare. El exprimă numai valoarea brută orientativă asociată energiei produse într-un an, înainte de deducerea cheltuielilor.

Cu toate aceste limite, indicatorul este util pentru înțelegerea contribuției energetice a sistemului hortivoltaic. El permite raportarea producției electrice la nevoile exploatației și oferă baza pentru integrarea ulterioară a componentei energetice cu beneficiul horticol direct.

Evaluarea economică agregată a urmărit integrarea beneficiului horticol direct cu beneficiul energetic brut. Beneficiul horticol a fost estimat prin compararea valorii producției obținute în variantele hortivoltaice cu valoarea producției din varianta martor. Beneficiul energetic brut a fost estimat pe baza producției anuale de energie electrică și a prețului energiei utilizat în calcul.

$$B_h = V_{SHV} - V_{martor},$$

$$V = P \times C,$$

$$B_a = B_h + B_e,$$

unde B_h reprezintă beneficiul horticol, V_{SHV} valoarea producției obținute în sistemul hortivoltaic, iar V_{martor} valoarea producției obținute în varianta martor; V reprezintă valoarea producției horticole, P producția obținută, iar C prețul de valorificare; B_a reprezintă beneficiul economic agregat, iar B_e beneficiul energetic brut.

Prin integrarea celor două componente, beneficiul economic agregat al ansamblului SHV a fost estimat la aproximativ 30.700 lei/an. Componenta energetică a avut ponderea dominantă în această estimare, în timp ce beneficiul horticol direct a avut o contribuție mai redusă, dar relevantă pentru interpretarea valorii duale a sistemului.

Rezultatele trebuie interpretate conservator. Analiza nu a inclus posibile avantaje economice suplimentare asociate calității comerciale, reducerii arsurilor solare, menținerii fructelor pe plantă până târziu în sezon sau reducerii pierderilor postrecoltare.

De asemenea, nu reprezintă o evaluare completă a rentabilității investiției, deoarece nu include costurile totale de investiție, operare, mentenanță și amortizare.

Calculul complet al indicatorului LER ar necesita compararea producției horticole obținute în SHV cu producția martor și compararea producției energetice a ansamblului SHV cu un sistem fotovoltaic separat echivalent.

În lipsa unei referințe energetice separate, evaluarea economică agregată a fost utilizată ca indicator aplicativ al valorii duale a sistemului (Dupraz și colab., 2011).

15.1.11. Concluzii parțiale

Platforma experimentală cu coacăz roșu 'Rovada' a pus în evidență două moduri diferite în care panourile pot modifica mediul culturii. Configurația est-vest a redus mai mult și mai uniform radiația ajunsă la plante, a limitat încălzirea solului și a păstrat mai bine apa în profil. Sub panourile orientate spre sud, intervenția asupra microclimatului a fost mai puțin pronunțată, dar cultura a beneficiat în continuare de o protecție evidentă față de expunerea integrală din martor.

Umiditatea mai ridicată a aerului în variantele hortivoltaice trebuie privită împreună cu scăderea temperaturii și cu conservarea apei din sol. În perioadele calde, această combinație a

reduc condițiile favorabile instalării stresului termic și hidric. În intervalele umede, același microclimat impune însă o supraveghere atentă a aerisirii coronamentului și a riscului fitosanitar.

Analizele de sol și diagnoza foliară au arătat că amplasarea panourilor nu a perturbat major aprovizionarea minerală. Diferențele dintre ani și variante au rămas în limite compatibile cu funcționarea normală a culturii, iar potasiul s-a menținut constant la niveluri mai ridicate sub panouri. Starea de nutriție a permis astfel interpretarea răspunsului fiziologic în primul rând prin schimbările produse asupra luminii, temperaturii și apei, fără indicii că avantajul variantelor acoperite ar fi fost determinat de un dezechilibru mineral al matorului.

Această imagine se regăsește și la nivelul aparatului foliar. CCM și NDVI au separat clar cele două variante hortivoltaice de cultura neacoperită, indicând un conținut mai ridicat de clorofilă și o stare spectrală mai favorabilă a coronamentului. Raportul Fv/Fm a avut cea mai ridicată medie în varianta sudică; orientarea est-vest a ocupat o poziție intermediară, iar matorul a înregistrat valoarea cea mai mică. Protecția radiativă cea mai puternică nu a coincis, așadar, cu răspunsul fotochimic maxim. În condițiile platformei, varianta sudică a păstrat un raport favorabil între lumina disponibilă și protejarea fotosistemului II, în timp ce est-vest a avut avantajul mai clar în conservarea apei și moderarea temperaturii.

Conductanța stomatală a variat mai mult între determinări și nu a diferențiat semnificativ variantele. Sensibilitatea ei la condițiile din momentul măsurării explică de ce tendința ușor favorabilă configurației est-vest a fost mai puțin stabilă decât răspunsul observat prin CCM, NDVI și Fv/Fm. Pentru aprecierea stării plantelor, conductanța stomatală s-a dovedit utilă mai ales alături de umiditatea solului și de datele microclimatice.

Reducerea luminii nu a devenit limitativă pentru producție. Sub panouri s-au obținut producții cel puțin comparabile cu matorul și, în mai multe situații, mai ridicate, printr-un număr mai mare de fructe și ciorchini mai bine dezvoltați. Masa fructelor a fost favorizată în unele variante, în timp ce substanța uscată solubilă și pH-ul au rămas relativ stabile. Fermitatea mai redusă sub panouri reprezintă principalul aspect de calitate care trebuie gestionat practic, prin alegerea momentului recoltării, reducerea intervalului până la valorificare și adaptarea destinației comerciale.

Cele două orientări răspund, prin urmare, unor priorități diferite. Est-vest este mai potrivită acolo unde supraîncălzirea și deficitul de apă au o importanță dominantă. Varianta sudică păstrează mai multă lumină și oferă un echilibru bun între protecția culturii, funcționarea aparatului fotosintetic și producție. Pentru soiul 'Rovada', ambele soluții au fost preferabile expunerii integrale din mator, fără ca una dintre ele să poată fi declarată avantajoasă pentru toate criteriile urmărite.

Componenta energetică a funcționat concomitent cu menținerea producției horticole, sistemul generând anual aproximativ 19.000 kWh. Beneficiul economic agregat ilustrează valoarea utilizării duale a terenului, dar nu reprezintă profit net și nu include toate costurile investiției, ale exploatării, mentenanței și amortizării.

Rezultatele prezentate reflectă comportarea unei plantații mature de coacăz roșu 'Rovada', în configurațiile și condițiile pedoclimatice testate. Continuarea monitorizării ar permite urmărirea mai clară a efectelor care se conturează în timp, mai ales asupra fertilității solului, nutriției, calității fructelor și stabilității producției. Posibilitatea extinderii acestor concluzii la alte culturi și sisteme este discutată în analiza comparativă și în recomandările de la finalul capitolului.

15.2. Studiu de caz – SHV pentru asimina (*Asimina triloba*)

15.2.1. Alegerea culturii și obiectivul agronomic al sistemului hortivoltaic

Asimina triloba (L.) Dunal, cunoscută sub denumirile de banana nordului, banana de preerie sau pawpaw, este o specie pomicolă nouă pentru România, originară din partea de est a Americii de Nord. Face parte din familia *Annonaceae*, ordinul *Magnoliales*, iar prin frunze și port se aseamănă cu speciile de magnolia cultivate la noi. Prima plantă a apărut în România în anul 1926, în localitatea Pianu de Sus, județul Alba, în curtea familiei Suciu Ioan, care a adus semințe din Toledo, Ohio, Statele Unite, la întoarcerea în țară (Stănică, 2012).

Fructul este o bacă de mari dimensiuni, ce poate depăși 600 g, de formă alungit-cilindrică, sferică sau reniformă. Pelița este galben-aurie la maturitatea de consum, subțire și foarte sensibilă la lovituri mecanice. Pulpă are o textură cremoasă, parfumată, de culoare alb-lăptoasă până la portocalie, cu un gust dulce, amintind de un amestec de mango, ananas și banană, cu o ușoară aromă de vanilie. Semințele sunt numeroase, aplatizate, elipsoidale, învelite într-o membrană comestibilă.

Asimina este o specie adecvată integrării în sisteme hortivoltaice, întrucât necesită umbrire în primii ani după plantare și chiar pe parcursul cultivării, în special în partea de sud a țării, unde excesul de radiație solară determină arsuri foliare și dezechilibre fiziologice: încălzire excesivă, evapotranspirație ridicată, arsuri pe fructe. În habitatul natural, planta crește în subarboretul pădurilor de foioase, fiind adaptată la regimuri de lumină difuză (Aroca-Delgado și colab., 2018). Integrarea panourilor trebuie să urmărească însă un echilibru între protecția plantei, menținerea luminii necesare proceselor fiziologice și producerea energiei electrice, deoarece umbrirea excesivă sau permanentă poate deveni limitativă pentru cultură (Mihălcioiu și colab., 2024).

Obiectivul agronomic principal al studiului a fost evaluarea modului în care umbrirea diferențiată produsă de panouri influențează regimul luminos, microclimatul, solul, fenologia, creșterea și starea plantelor de asimina. În paralel, sistemul a fost analizat ca infrastructură energetică și ca model de utilizare duală a terenului. Figura 15.2.1 sintetizează relația dintre particularitățile biologice ale speciei și integrarea sa într-un sistem hortivoltaic.

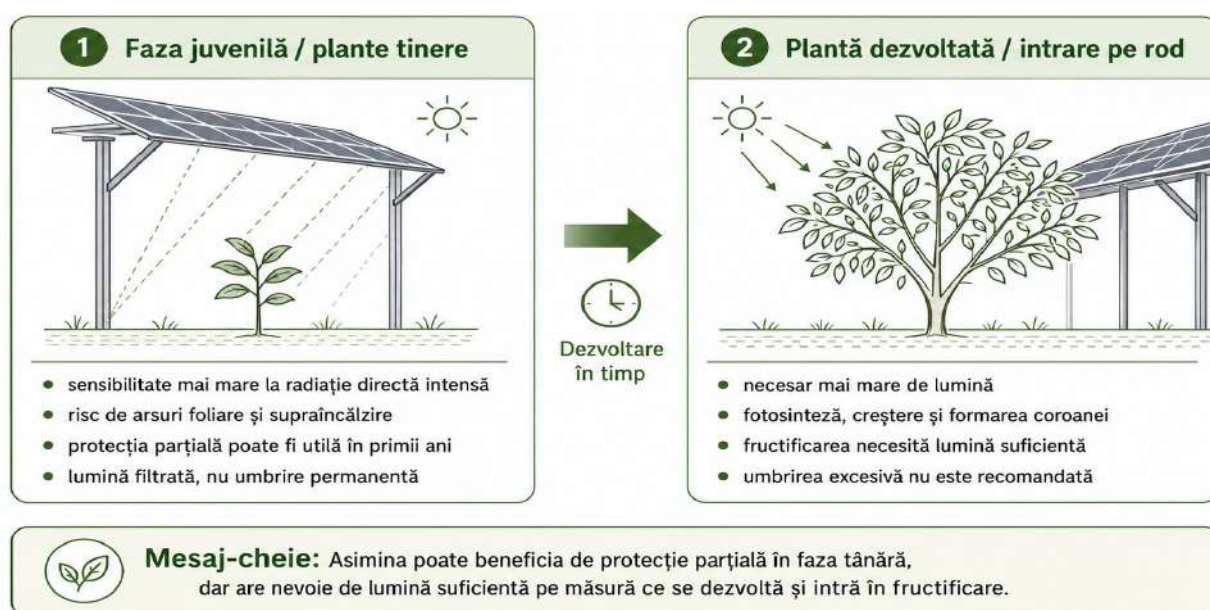


Figura 15.2.1 – Particularitățile biologice ale asiminei (*Asimina triloba*) relevante pentru sistemele hortivoltaice (sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

Aspectul plantelor, florilor și fructelor este prezentat în figura 15.2.2.



Figura 15.2.2 – Habitusul plantelor de asimina (sursa: Stănică F.), floare și fruct (sursa Mihălcioiu I.M.)

15.2.2. Amplasamentul și organizarea platformei experimentale

Lotul experimental a fost înființat în mai multe etape. În plantație sunt cultivate mai multe soiuri și selecții de asimina, la distanța de 4,0 m între rânduri și 2,0 m între plante pe rând.

Sistemul hortivoltaic a fost integrat pe rândurile 3, 4 și 5. Schema de plantare și distribuția genotipurilor sunt prezentate în tabelul 15.2.1.

Tabelul 15.2.1 – Schema de plantare a pomilor de asimina în lotul experimental hortivoltaic

Rândul 3	Rândul 4	Rândul 5
P1-P2. Rebecca 'S G.	P1. Prima 1216	P1-P2. Pa Golden 3
P3-P4. Sweet Alice	P2-P3. Pa Golden	P3-P4. Asirius
P5-P6. Sibley	P4-P5. Overleese	P5-P6. Pa Golden 2
P7-P8. Saa Zim	P6-P7. Ithaca	P7-P8. Wabash
P9-P10. Sunglo	P8-P9. Sunflower	P9-P10. Asteria
R3P11	P10-P11. Davis	P11. Allegheny

Tehnologia de întreținere aplicată a fost ecologică. Terenul a fost menținut liber de buruieni pe direcția rândurilor prin prașile manuale și cosire mecanică, iar vegetația de pe interval a fost tocată periodic și lăsată pe sol ca mulci. Irigarea s-a realizat prin picurare, în funcție de necesitățile plantelor. Fertilizarea a constat în aplicarea compostului pe direcția rândului, completată în primăvara anului 2024 cu îngrășământ organic Italtpollina 12-5-15 SK, în doză de 200 g/pom. Nu s-au efectuat tratamente fitosanitare.

Amplasarea panourilor a evoluat pe parcursul experimentului. În perioada 2023–2024, acestea au fost distribuite pe rândurile R3, R4 și R5, câte un panou pe fiecare rând în dreptul pomilor din poziția P11 și un al doilea set de panouri în dreptul poziției P8.

În anul 2025, panourile au fost regrupate integral pe rândul R5, pentru realizarea unui design comparativ alternativ. Pozițiile impare P1, P3, P5, P7 și P9 au rămas neacoperite, iar pozițiile pare P2, P4, P6, P8 și P10, împreună cu P11, au fost acoperite cu panouri. Pe rândul R5, fiecare soi ocupă două poziții consecutive: PA Golden 3 – P1/P2, Asirius – P3/P4, PA Golden 2 – P5/P6, Wabash – P7/P8 și Asteria – P9/P10. Această dispunere a permis compararea directă între o plantă neacoperită și una aflată sub panou, în cadrul aceluiași genotip.

Designul oferă un avantaj important pentru interpretare, dar are și o limită: fiecare combinație soi × condiție este reprezentată printr-un număr foarte redus de plante. Din acest motiv, diferențele dintre plante trebuie privite ca rezultate comparative exploratorii, nu ca răspunsuri generalizabile pentru întregul soi.

15.2.3. Configurația constructivă și energetică a sistemului

În primăvara anului 2023, pe rândurile 3, 4 și 5 au fost montați stâlpii de susținere a panourilor fotovoltaice. Pe fiecare rând au fost instalați câte șapte stâlpi, la distanța de 3,7 m între stâlpi pe rând și aproximativ 3,8 m între rânduri. Stâlpii sunt realizați din beton vibrat, au secțiunea de 8,5 × 8,0 cm și lungimea de 4,5 m. Aceștia au fost fixați în sol la adâncimea de 0,8 m.

La capetele rândurilor și pe laterale au fost instalate, prin înfiletare, ancore metalice cu lungimea de 1,5 m, realizate din fier striat cu diametrul de 14 mm. Stâlpii au fost rigidizați printr-o rețea rectangulară de cabluri din oțel cu diametrul de 8 mm, fixate cu bride la fiecare stâlp. Pe capetele stâlpilor, prin intermediul unor suporti metalici speciali, au fost montate panouri fotovoltaice TommaTech TT-120PM, produse de Tomma Tech GmbH, München, Germania. Panourile sunt orientate spre sud și fixate la un unghi de înclinare de 30°.

Dimensiunile unui panou sunt de 1756 × 1039 × 35 mm. Modulele au o rată de conversie de aproximativ 20%, sticlă antireflexie cu proprietăți de autocurățire și eficiență bună la intensitate luminoasă redusă. Domeniul declarat de funcționare este cuprins între -40 și +85 °C, iar durata de viață indicată este de aproximativ 30 de ani, cu o garanție de 12 ani. Energia produsă este transformată în curent alternativ printr-un invertor ABB UNO-DM-Plus-Q.

Alegerea arhitecturii sistemului a fost fundamentată pe particularitățile speciei și pe condițiile climatice locale. Deoarece asimina necesită o protecție parțială, dar nu privarea totală de lumină, panourile opace au fost dispuse pe un singur șir deasupra rândului de pomi, nu sub forma unei acoperiri continue (Mihălcioiu și colab., 2024a).

Această configurație creează o umbră diferențiată. Reducerea luminii este mai accentuată în punctele aflate direct sub modul și mai redusă în zonele laterale și superioare ale coroanei. Umbra se deplasează în cursul zilei, astfel încât planta nu rămâne permanent în aceeași zonă de umbră.

Montarea pe suporti înalți permite efectuarea lucrărilor de întreținere și recoltare sub panouri și favorizează ventilarea și răcirea modulelor. Orientarea sudică și înclinarea de 30° sunt adaptate captării radiației solare la latitudinea Bucureștiului, de aproximativ 44°25' N.

Configurația sistemului și deplasarea umbrei în cursul zilei sunt ilustrate în figura 15.2.3.



Figura 15.2.3 – Umbrirea plantelor de *Asimina triloba* de către panourile solare dimineată, la prânz și după-amiază (sursa Olteanu A.L.G)

15.2.4. Monitorizarea integrată

Pentru caracterizarea influenței sistemului hortivoltaic, monitorizarea a fost organizată pe mai multe paliere: climatic, edafic, fenologic, biometric, productiv, calitativ, energetic și de siguranță. Măsurătorile au fost efectuate atât în zonele influențate de panouri, cât și în poziții expuse direct la soare, utilizate ca referință. Indicatorii climatici au inclus temperatura aerului, umiditatea relativă, precipitațiile, radiația solară globală, intensitatea luminoasă exprimată în lux și radiația fotosintetic activă, exprimată în $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Datele climatice generale au fost înregistrate cu stația meteorologică Pinova. Intensitatea luminoasă a fost măsurată cu luxmetrul SAUTER SO 200K, iar radiația fotosintetic activă cu aparatul LIGHT SCOUT – Quantum Meter.

Indicatorii edafici au inclus temperatura solului și tensiunea apei din sol, exprimată prin potențialul matric în centibari. Pentru aceste determinări au fost utilizate trei sonde Watermark instalate la adâncimile de 20, 40 și 60 cm.

Starea plantelor a fost evaluată prin monitorizarea stadiilor fenologice conform scării BBCH, măsurarea înălțimii pomilor, diametrului trunchiului, numărului și lungimii lăstarilor, legării fructelor, producției și caracteristicilor fizice și biochimice ale fructelor.

Componenta energetică și de siguranță a inclus urmărirea funcționării instalației și măsurarea câmpului electromagnetic generat în apropierea stâlpilor și a plantelor.

Determinările de luminozitate și PAR au fost efectuate săptămânal, la orele 8:00, 12:00 și 16:00, în mai multe poziții reprezentative: în direcția soarelui, sub panou, la nivelul solului, între ramuri și în interiorul coroanei.

Această organizare a monitorizării a permis analizarea sistemului ca ansamblu agronomic și energetic, nu doar ca instalație fotovoltaică.

15.2.5. Contextul climatic al perioadei experimentale

Municipiul București este situat în partea sudică a Câmpiei Române, la aproximativ 44°24'49" latitudine nordică și 26°05'48" longitudine estică. Climatul este temperat-continental, cu veri călduroase, perioade secetoase și ierni în care pot apărea temperaturi negative importante.

Caracterizarea climatică a perioadei experimentale s-a realizat pe baza datelor orare înregistrate de stația meteorologică Pinova, amplasată în plantația de asimina din campusul USAMV București. Seria analizată pentru intervalul 2020–2026 a cuprins peste 55.000 de înregistrări orare. Temperatura medie anuală a variat între 12,7 °C în anul 2021 și 14,7 °C în anul 2024. Media perioadei 2021–2025 a fost de 13,9 °C. Valorile anuale, maximele și minimele absolute sunt prezentate în tabelul 15.2.2.

Tabelul 15.2.2 – Regimul termic anual la stația Pinova, campus USAMV București, în perioada 2021–2025

Indicator	2021	2022	2023	2024	2025
Temperatura medie anuală (°C)	12,7	13,9	14,5	14,7	13,7
Temperatura minimă absolută (°C)	– 11,6	– 7,6	– 7,0	– 10,4	– 9,0
Temperatura maximă absolută (°C)	38,3	37,8	38,8	39,2	39,9

Regimul termic lunar a evidențiat veri foarte calde, cu temperaturi medii lunare de 24–27 °C în iulie și august. Anul 2024 s-a remarcat printr-un aprilie cu temperatura medie de 16,1 °C și un iunie cu 26,5 °C. Temperaturile foarte ridicate din anul 2024 au accelerat dezvoltarea plantelor și au devansat maturarea fructelor cu aproximativ trei săptămâni față de anii precedenți. Valorile temperaturilor medii lunare sunt prezentate în tabelul 15.2.3.

Tabelul 15.2.3 – Temperatura medie lunară la stația Pinova, campus USAMV București, în perioada 2021–2025

Luna	2021	2022	2023	2024	2025
Ianuarie	2,1	2,5	4,9	1,3	4,6
Februarie	3,7	5,7	3,8	8,5	0,2
Martie	5,7	5,6	8,9	9,5	10,5
Aprilie	10,6	12,3	11,3	16,1	12,7
Mai	17,8	20,1	17,3	17,5	16,3
Iunie	21,1	23,1	22,5	26,5	24,5
Iulie	25,8	25,9	26,2	27,4	26,3
August	24,7	25,8	26,5	26,5	24,5

Luna	2021	2022	2023	2024	2025
Septembrie	18,0	18,6	22,5	20,4	20,3
Octombrie	10,8	14,1	16,3	13,4	11,7
Noiembrie	8,2	9,3	8,6	5,2	8,8
Decembrie	2,9	3,5	4,4	4,1	3,3

Regimul pluviometric a fost caracterizat printr-o variabilitate accentuată de la un an la altul. Totalul anual al precipitațiilor a fost de 465 mm în anul 2023, 652 mm în 2024 și 715 mm în 2025.

Distribuția lunară a fost neuniformă. Episoadele cu precipitații abundente au alternat cu perioade secetoase prelungite în intervalul aprilie–octombrie, când necesarul de apă al culturii nu a fost acoperit întotdeauna prin precipitațiile naturale (tabelul 15.2.4).

Tabelul 15.2.4 – Precipitațiile lunare și totalurile anuale la stația Pinova, campus USAMV București, în perioada 2023–2025

Luna	2023	2024	2025
Ianuarie	103	62	10
Februarie	16	0	18
Martie	19	63	37
Aprilie	73	60	59
Mai	12	19	183
Iunie	34	77	46
Iulie	60	87	35
August	5	24	12
Septembrie	3	64	16
Octombrie	15	10	176
Noiembrie	86	67	115
Decembrie	39	121	8
TOTAL anual	465	652	715

Valorile ridicate ale temperaturii și radiației, suprapuse peste perioadele cu deficit de precipitații, au creat condiții relevante pentru evaluarea efectului protector al panourilor. În același timp, aceste condiții confirmă necesitatea irigații prin picurare și a urmăririi continue a apei din sol.

15.2.6. Efectele asupra microclimatului

15.2.6.1. Radiația fotosintetic activă și intensitatea luminoasă

Influența sistemului hortivoltaic asupra luminii a fost evaluată prin măsurători de radiație fotosintetic activă și de intensitate luminoasă, efectuate săptămânal în intervalul iulie–septembrie 2024, la orele 8:00, 12:00 și 16:00.

O parte dintre rezultatele preliminare privind dinamica luminii și răspunsul plantelor de asimina în această platformă a fost prezentată de Mihălcioiu și colab. (2026).

Datele au evidențiat diferențe mari în funcție de poziția senzorului. În direcția soarelui, valorile PAR au depășit frecvent $1.400\text{--}1.990\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$. Sub panou, la nivelul solului și între ramuri, valorile au scăzut în general sub $100\text{--}300\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$. Valorile medii pe poziții sunt prezentate în tabelul 15.2.5.

În poziția expusă direct, valoarea PAR medie a fost de aproximativ $1.672\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$, iar intensitatea luminoasă medie de aproximativ 91.600 lux. În zona aflată sub panou, valorile medii au scăzut la aproximativ $228\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ și 12.000 lux (tabelul 15.2.6). La nivelul solului au fost înregistrate aproximativ $57\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$, iar între ramuri aproximativ $15\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$.

Tabelul 15.2.5 – Valorile medii ale radiației fotosintetic active și ale intensității luminoase în principalele poziții de măsurare, vara anului 2024

Poziția de măsurare	PAR mediu ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Lux mediu ($\times 100$)
Direcția soarelui (martor)	1.672	916
Soare prin plasa de umbră	670	394
Umbră sub panou, la nivel	228	120
Umbră la sol	57	45
Între ramuri (în coroană)	15	9

Determinările detaliate pe date și ore au arătat că, în punctele măsurate direct sub panou, PAR a fost redusă cu 69–93% față de poziția expusă, media reducerii fiind de aproximativ 86%.

Tabelul 15.2.6 – Valorile radiației PAR în poziția expusă direct și sub panou, pe date și ore, și reducerea procentuală înregistrată în vara anului 2024

Data	Ora	PAR martor	PAR sub panou	Reducere (%)
30.07.2024	8 / 12 / 16	1443 / 1404 / 1959	211 / 175 / 185	85 / 88 / 91
07.08.2024	8 / 12 / 16	1781 / 1987 / 1645	161 / 145 / 304	91 / 93 / 82
13.08.2024	8 / 12 / 16	1372 / 1945 / 1958	168 / 252 / 222	88 / 87 / 89
19.08.2024	8 / 12 / 16	811 / 1998 / 1824	251 / 273 / 279	69 / 86 / 85
27.09.2024	8 / 12 / 16	1340 / 1917 / 1155	167 / 218 / 251	88 / 89 / 78

Aceste valori descriu reducerea instantanee în punctul aflat sub modul. Ele nu trebuie interpretate ca reducere zilnică a luminii primite de întreaga coroană, deoarece umbra se deplasează în cursul zilei, iar diferitele părți ale plantei alternează între lumină directă, lumină difuză și umbră.

Măsurătorile efectuate în aprilie 2026, în perioada înfloririi, au confirmat același tipar. Într-o zi senină, intensitatea luminoasă măsurată pe fața plantelor a ajuns la aproximativ 82.000–108.900 lux, în timp ce în interiorul coroanei valorile au fost de aproximativ 18.800–23.600 lux. În ziua noroasă, intensitatea generală a fost mai redusă, dar diferențele între exteriorul și interiorul coroanei s-au menținut. Valorile sunt prezentate în tabelul 15.2.7.

Tabelul 15.2.7 – Intensitatea luminoasă medie la nivelul plantelor, în funcție de poziție, oră și condițiile de nebulozitate, aprilie 2026

Poziție	Senin 9	Senin 12	Senin 15	Noros 9	Noros 12	Noros 15
Fața plantă	108.900	82.000	98.700	83.000	91.700	40.200
Spate plantă	76.600	76.500	100.700	41.900	59.800	29.900
Interior coroană	21.200	18.800	23.600	14.200	28.100	16.800

15.2.6.2. Deplasarea zilnică și sezonieră a umbrei

Analiza fotografică realizată la orele 8:00, 12:00 și 16:00 a arătat că umbra modulelor se deplasează semnificativ în cursul zilei. Dimineața și după-amiaza, aria de umbră a unui panou este mai îngustă și se proiectează lateral, la aproximativ 4,5 m în afara primului rând.

La prânz, umbra se concentrează deasupra rândului de pomi, la aproximativ 50 cm față de stâlpul de susținere.

În luna septembrie, când unghiul solar este mai redus, umbrele devin mai lungi. Dimineața, lungimea umbrei crește cu aproximativ 50 cm, iar la prânz aceasta se poate proiecta la aproximativ 1,7 m față de stâlp.

Efectul sistemului are, prin urmare, un caracter sezonier. Vara, protecția maximă apare în perioada cu radiație și temperatură ridicate. Primăvara și toamna, unghiul solar mai redus determină o distribuție diferită a luminii, iar coroanele beneficiază de o expunere mai mare în anumite intervale ale zilei.

15.2.6.3. Radiația globală și corelarea instrumentelor

Radiația globală înregistrată de stația Pinova a urmat un ciclu sezonier, cu medii lunare de peste 240–270 W/m² în lunile de vară și valori sub 60 W/m² în lunile de iarnă (tabelul 15.2.8).

Tabelul 15.2.8 – Radiația globală medie lunară la stația Pinova, campus USAMV București, în perioada 2023–2025

Luna	2023	2024	2025
Ianuarie	34	42	58
Februarie	70	23	73
Martie	115	108	128
Aprilie	139	183	171
Mai	195	196	190
Iunie	229	271	264
Iulie	244	254	247
August	210	211	219
Septembrie	192	147	157
Octombrie	184	118	83
Noiembrie	60	54	37
Decembrie	35	28	30

Pentru verificarea concordanței dintre luxmetru, parmetru și stația meteorologică, valorile au fost raportate la o unitate comună. Pentru lumina solară naturală au fost utilizați factorii de conversie $1 \text{ W/m}^2 \approx 2,02 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ PAR}$ și $1 \text{ W/m}^2 \approx 120 \text{ lux}$.

Valorile raportului Lux/PAR, determinate în pozițiile expuse, prin plasă și sub panou, au fost de aproximativ 55,8–56,6, fiind apropiate de raportul teoretic specific luminii naturale. Corelarea măsurătorilor este prezentată în tabelul 15.2.9.

Tabelul 15.2.9 – Corelarea măsurătorilor de lumină realizate cu luxmetrul și parmetrul și conversia la o unitate comună, vara anului 2024

Poziție	PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Lux	Raport Lux/PAR	W/m ² (din PAR)	W/m ² (din Lux)	% din martor
Direcție soare (martor)	1.636	92.393	56,5	810	770	100
Soare prin plasă	670	37.920	56,6	332	316	41,0
Umbră sub panou	217	12.127	55,8	108	101	13,3
Umbră la sol	57	4.433	78,0	28	37	3,5
Între ramuri	15	880	58,1	7	7	0,9

Concordanța dintre instrumente confirmă rolul panourilor ca filtru al radiației. În punctul măsurat direct sub panou, lumina disponibilă a reprezentat aproximativ 13% din valoarea poziției expuse, iar în zona protejată de plasă aproximativ 41%.

15.2.7. Efectele asupra solului și statusului nutrițional

15.2.7.1. Regimul termic al solului

Regimul edafic a fost monitorizat cu trei sonde Watermark instalate la adâncimile de 20, 40 și 60 cm. Datele au evidențiat un regim termic stratificat. Oscilațiile cele mai ample au fost înregistrate la 20 cm, iar variațiile s-au amortizat progresiv în profunzime. Stratul de la 60 cm s-a încălzit mai lent primăvara și s-a răcit mai lent toamna, menținând un regim termic mai stabil pe parcursul anului (tabelul 15.2.10).

Tabelul 15.2.10 – Temperatura medie lunară a solului la adâncimile de 20, 40 și 60 cm, în perioada 2024–2026

Luna	2024 (cm)			2025 (cm)			2026 (cm)		
	20	40	60	20	40	60	20	40	60
Ianuarie	–	–	–	4,4	4,8	6,0	2,1	–	4,6
Februarie	–	–	–	2,8	3,7	5,1	2,7	–	4,6
Martie	–	–	–	9,8	8,8	8,3	7,8	–	7,1
Aprilie	–	–	–	13,6	13,0	12,4	13,6	–	12,0
Mai	–	–	–	17,1	17,0	16,6	18,0	–	15,9
Iunie	–	–	–	21,8	21,3	20,4	21,1	–	–
Iulie	–	–	–	22,6	22,4	21,7	–	–	–
August	23,7	23,9	23,8	22,1	22,5	22,0	–	–	–
Septembrie	22,7	20,7	21,0	20,1	21,8	20,7	–	–	–
Octombrie	13,0	15,6	16,7	13,6	–	15,5	–	–	–
Noiembrie	7,5	9,0	11,0	10,7	–	12,6	–	–	–
Decembrie	5,0	6,0	7,5	6,2	–	8,9	–	–	–

Umbrirea parțială produsă de panouri poate contribui la reducerea evaporării directe de la suprafața solului și la atenuarea fluctuațiilor termice diurne. În cazul acestei platforme, efectul trebuie însă interpretat împreună cu mulcirea, irigarea și distribuția precipitațiilor.

15.2.7.2. Tensiunea apei din sol

Tensiunea apei din sol a avut o dinamică diferită în funcție de adâncime. Senzorul de la 20 cm a fost cel mai reactiv la ciclurile de umectare și uscare.

În perioadele secetoase de vară, valorile au depășit frecvent 80–100 cb la această adâncime, indicând o uscare puternică a stratului superficial (tabelul 15.2.11). Episoadele de precipitații mai mari de aproximativ 20 mm au determinat reumezirea rapidă a acestui strat. La 40 cm, valorile s-au situat frecvent în intervalul 40–60 cb în perioadele uscate, iar senzorul de la 60 cm a indicat o dinamică mai lentă și o epuizare progresivă a rezervei de apă.

Tabelul 15.2.11 – Tensiunea medie lunară a apei din sol la adâncimile de 20, 40 și 60 cm, în perioada 2024–2026

Luna	2024 — 20 cm	2024 — 40 cm	2024 — 60 cm	2025 — 20 cm	2025 — 60 cm	2026 — 20 cm	2026 — 60 cm
Ianuarie	–	–	–	7,5	4,8	3,8	1,0
Februarie	–	–	–	9,5	5,8	3,4	0,9
Martie	–	–	–	20,8	8,4	12,9	0,5
Aprilie	–	–	–	7,0	3,2	14,1	0,0
Mai	–	–	–	7,3	0,1	12,8	8,8
Iunie	–	–	–	8,9	0,0	28,7	0,0
Iulie	–	–	–	5,0	0,5	–	–
August	24,1	2,8	1,9	9,4	0,0	–	–
Septembrie	23,3	10,5	7,4	27,1	0,0	–	–
Octombrie	11,7	13,7	19,1	8,7	0,0	–	–
Noiembrie	26,8	12,3	20,1	4,1	0,0	–	–
Decembrie	3,9	3,7	1,4	0,4	0,0	–	–

Notă: valori medii lunare ale potențialului matric (cb); valori mici indică sol umed, valorile mari indică uscare. Toți cei trei senzori au devenit funcționali din august 2024. Senzorul de 40 cm s-a defectat în toamna anului 2025; în 2025 și 2026 lipsesc datele de la 40 cm, fiind disponibile cele de la 20 și 60 cm; datele 2026 acoperă ianuarie–iunie.

Stratificarea observată oferă repere pentru conducerea irigației. Raportul propune declanșarea irigației în jurul valorii de 70 cb în stratul superficial, urmată de verificarea revenirii valorilor la 40 și 60 cm sub aproximativ 30 cb.

Acest reper trebuie utilizat prudent și adaptat solului, distribuției sistemului radicular, debitului instalației și condițiilor climatice.

15.2.8. Efectele asupra fenologiei, creșterii și stării fiziologice

15.2.8.1. Fenologia plantelor

Stadiile fenologice au fost monitorizate conform scării BBCH adaptate pentru *Asimina triloba* (Ferrer-Blanco și colab., 2022), de la umflarea mugurilor până la senescență, cu accent pe înflorire și dezvoltarea fructelor. Influența genotipului și a condițiilor meteorologice locale asupra desfășurării fenofazelor a fost analizată anterior în colecția de asimina de la USAMV București (Mihălcioiu și colab., 2024b).

În primăvara anului 2025 au fost observate diferențe între soiuri. ‘Asirius’ și ‘Allegheny’ au avut o pornire mai timpurie în vegetație, iar ‘PA Golden 3’ o evoluție mai tardivă.

În anul 2026, înflorirea a fost urmărită detaliat pentru cei 33 de pomi din rândurile 3, 4 și 5. Prima deschidere florală a fost înregistrată la majoritatea pomilor în jurul datei de 18 aprilie.

Faza receptivă și perioada de eliberare a polenului s-au desfășurat în principal între 23 și 29 aprilie, iar legarea fructelor a fost consemnată la 7 mai. ‘Asirius’ a avut o fereastră de înflorire timpurie și concentrată. ‘Allegheny’ a înflorit ușor mai târziu, dar pe o perioadă mai lungă, ceea ce poate favoriza suprapunerea cu genotipurile mai tardive și polenizarea încrucișată. Dinamica fenologică multianuală este prezentată în tabelul 15.2.12.’

Tabelul 15.2.12 – Fenologia înfloririi la asimina în perioada 2022–2026, date medii pe genotipuri în câmpul experimental USAMV București

Anul	Prima floare (BBCH 60–61)	Înflorire deplină (BBCH 65)	Sfârșitul înfloririi (BBCH 69)	Observații
2022	≈ 07.04	≈ 13–18.04	≈ 20–24.04	primăvară normală
2023	≈ 03.04	≈ 17–25.04	≈ 11–15.05	înflorire eșalonată
2024	neînregistrat	neînregistrat	neînregistrat	an foarte cald; maturare devansată ~3 săpt.
2025	≈ 27.03–30.03	≈ 15.04	≈ 17.04	pornire timpurie (primăvară caldă)
2026	≈ 18.04	23–29.04	≈ 05–10.05	legare fructe la 07.05

Compararea anilor a evidențiat o variabilitate importantă a momentului înfloririi, determinată în principal de regimul termic al primăverii. Primăverile mai calde au devansat înflorirea cu până la aproximativ două săptămâni.

Pe rândul R5, designul cu plante pereche a permis compararea fenologiei în condiții de lumină directă și sub panou. Pornirea înfloririi a fost sincronă, în jurul datei de 18 aprilie. La ‘PA Golden 3’, ‘PA Golden 2’ și ‘Wabash’, faza receptivă și începutul eliberării polenului au apărut cu aproximativ 2–4 zile mai târziu sub panou decât la planta neacoperită. La ‘Asirius’ și ‘Asteria’, diferențele au fost reduse. Legarea fructelor s-a produs în jurul datei de 7 mai la soiurile care au fructificat, fără o întârziere clară determinată de panouri. Comparația este prezentată în tabelul 15.2.13.

Tabelul 15.2.13 – Fenologia comparativă a înfloririi în anul 2026 la plantele martor și sub panou (rândul R5)

Soi	Variantă	Becoming receptive	Receptive	Eliberare polen
Pa Golden 3	martor	18.04	18.04	23.04
Pa Golden 3	sub panou	18.04	23.04	26.04
Asirius	martor	18.04	18.04	18.04
Asirius	sub panou	18.04	18.04	18.04
Pa Golden 2	martor	18.04	23.04	25.04
Pa Golden 2	sub panou	18.04	25.04	29.04
Wabash	martor	18.04	23.04	25.04
Wabash	sub panou	18.04	25.04	29.04
Asteria	martor	18.04	18.04	25.04
Asteria	sub panou	18.04	18.04	25.04
Allegheny	sub panou	18.04	18.04	25.04

Rezultatele sugerează că umbrirea poate întârzia ușor progresia unor fenofaze florale, dar efectul nu a fost uniform pentru toate soiurile.

15.2.8.2. Creșterea vegetativă

Măsurătorile biometrice au inclus înălțimea pomilor, diametrul trunchiului, numărul lăstarilor și lungimea acestora.

Datele din perioada 2023–2026 au evidențiat o dezvoltare vegetativă constantă și diferențe importante între rânduri, determinate în primul rând de vârsta plantelor.

Pomii de pe rândul 4 au avut cele mai mari înălțimi. În anul 2026, 'Ithaca' a ajuns la aproximativ 280–284 cm, 'Prima 1216' la aproximativ 271 cm, iar 'Overleese' la 260–264 cm.

Pomii de pe rândul 5, fiind mai tineri, au avut dimensiuni mai reduse. Cele mai înalte plante au fost înregistrate la 'Asteria', cu până la 115 cm, și 'Wabash', cu aproximativ 101 cm. Cele mai reduse înălțimi au fost observate la 'Asirius' și 'Allegheny', aproximativ 49–52 cm. Valorile sunt prezentate în tabelul 15.2.14 și în figura 15.2.12.

Tabelul 15.2.14 – Înălțimea pomilor de asimina în funcție de rând, soi și poziția față de panou, anul 2026

R3 (soi)	Înălț. (cm)	R4 (soi)	Înălț. (cm)	R5 (soi)	Înălț. martor / panou (cm)
Rebecca 'S G.	246 / 213	Prima 1216	271	Pa Golden 3	90 / 69
Sweet Alice	204 / 223	Pa Golden	233 / 249	Asirius	52 / 49
Sibley	153 / 175	Overleese	264 / 260	Pa Golden 2	73 / 76
Saa Zim	201 / 197	Ithaca	284 / 280	Wabash	101 / 92
Sunglo	208 / 220	Sunflower	205 / 179	Asteria	61 / 115
R3P11	265	Davis	234 / 205	Allegheny	51 (panou)

Pe rândul R5, la majoritatea soiurilor, planta neacoperită a fost ușor mai înaltă decât cea aflată sub panou. La 'PA Golden 3', valorile au fost de aproximativ 90 cm în martor și 69 cm sub panou, iar la 'Wabash' de aproximativ 101 și 92 cm.

La 'Asirius', diferența a fost redusă, aproximativ 52 cm față de 49 cm. 'Asteria' a reprezentat o excepție, planta aflată sub panou ajungând la aproximativ 115 cm, comparativ cu 61 cm pentru planta neacoperită. Aceste diferențe nu permit formularea unei concluzii generale privind stimularea sau reducerea creșterii de către panouri. Răspunsul a fost dependent de genotip și de particularitățile individuale ale pomilor.

Creșterea medie anuală a lăstarilor a confirmat vigoarea mai ridicată a unor genotipuri. Pe rândul 3, 'Sunglo' a avut creșteri de aproximativ 36–41 cm, iar 'Sibley' de aproximativ 35 cm. Pe rândul 5, 'Asteria' a ajuns la aproximativ 46 cm (figura 15.2.13).

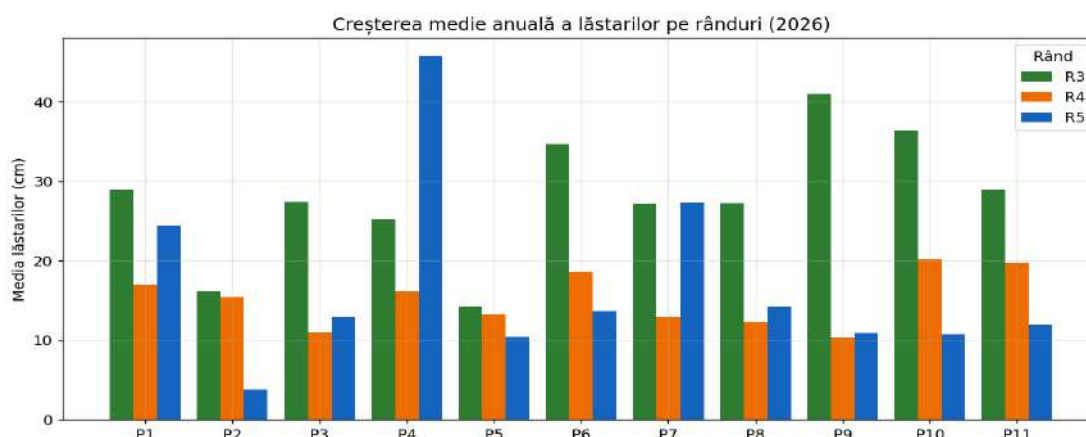


Figura 15.2.13 – Creșterea medie anuală a lăstarilor de asimina pe rânduri și genotipuri, anul 2026

15.2.9. Efectele asupra producției și calității

15.2.9.1. Caracteristicile fizice ale fructelor

Pentru determinarea mărimii și formei fructelor au fost efectuate măsurători privind masa, lungimea și diametrele fructelor (tabelul 15.2.15.).

‘Prima 1216’ a prezentat cele mai mari fructe, cu valori de până la aproximativ 308 g. La ‘Sunglo’ au fost înregistrate fructe mai mici, de aproximativ 100 g. Fructele analizate au avut în general formă alungită.

Tabelul 15.2.15 – Masa, dimensiunile și forma fructelor de asimina, recolta anului 2024

Pomul	Greutate (g)	Lungime (mm)	Diametrul 1/2 (mm)	Forma
R3P4 (Sweet Alice)	255	108	63/63	Alungită
R3P5 (Sibley)	212	106	60/62	Alungită
R3P6 (Sibley)	174	97	52/57	Alungită
R3P8 (Saa Zim)	178	102	50/55	Alungită
R3P10 (Sunglo)	100	90	40/44	Alungită
R4P1 (Prima 1216)	308	100	66/75	Alungită
R4P4 (Overleese)	189	90	57/62	Alungită
R4P5 (Overleese)	171	84	56/60	Alungită
R4P7 (Ithaca)	164	79	54/57	Alungită
R4P11 (Davis)	182	95	56/61	Alungită

15.2.9.2. Caracteristicile biochimice ale fructelor

Analizele biochimice au vizat conținutul de substanță uscată solubilă și aciditatea titrabilă. Variabilitatea compoziției biochimice a fructelor între genotipuri și ani a fost analizată și într-un studiu comparativ desfășurat pe o perioadă de cinci ani (Tabacu și colab., 2024). Conținutul de substanță uscată solubilă s-a situat în general între 18 și 26 °Brix, confirmând caracterul dulce al fructelor de asimina. Aciditatea titrabilă a fost redusă, de regulă sub 0,1% acid malic.

Raportul dintre conținutul de substanță uscată solubilă și aciditate a avut valori foarte ridicate, aproximativ 200–540 în anul 2024, reflectând profilul dulce și slab acid al fructelor.

Pe rândul 3, valori ridicate ale conținutului de substanță uscată solubilă au fost observate la ‘Sweet Alice’, ‘Sibley’, ‘Saa Zim’ și ‘Sunglo’. Pe rândul 4, s-au remarcat ‘PA Golden’ și ‘Sunflower’, în timp ce ‘Overleese’ a avut valori mai reduse (tabelul 15.2.16).

‘Prima 1216’, ‘Ithaca’ și ‘Davis’ au prezentat valori mai ridicate ale acidității comparativ cu celelalte genotipuri, iar ‘Overleese’ valori mai reduse. Diferențele observate între fructe reflectă în principal genotipul, vârsta pomilor, anul climatic și momentul recoltării.

Tabelul 15.2.16 – Conținutul de substanță uscată solubilă și aciditatea fructelor de asimina, în funcție de soi, rând și an, în perioada 2023–2025

Soi	Rândul	TSS 2023 (°Brix)	TSS 2024 (°Brix)	TSS 2025 (°Brix)	Aciditate 2024 (% ac. malic)	TSS/Aciditate 2024
Sweet Alice	R3	–	25,7	–	0,05	514
Sibley	R3	26,1	19,8	–	0,08	248
Saa Zim	R3	20,9	22,8	–	0,06	380
Sunglo	R3	22,1	22,7	–	0,09	252
Prima 1216	R4	23,2	20,7	–	0,08	259
Pa Golden	R4	–	20,9	–	0,10	209
Overleese	R4	22,8	18,6	–	0,05	372
Ithaca	R4	22,6	18,0	–	0,09	200
Sunflower	R4	20,7	18,8	–	0,04	470
Davis	R4	21,5	16,1	–	0,03	537
Allegheny	R5	19,0	21,5	–	–	–

15.2.10. Componenta energetică și economică

Sistemul demonstrează fezabilitatea tehnică a integrării producției de energie într-o plantație de asimina. Panourile sunt funcționale, iar energia produsă este transformată în curent alternativ prin invertorul ABB UNO-DM-Plus-Q.

Pentru asimina, avantajul economic potențial poate proveni din trei componente: producerea energiei electrice, menținerea terenului în funcție agricolă, reducerea pierderilor provocate de stresul termic și arsurile solare.

Siguranța instalației

Pentru evaluarea siguranței, au fost efectuate măsurători ale câmpului electromagnetic la stâlpii de susținere și în apropierea plantelor, la aproximativ 30 cm, 1 m și 2 m înălțime. Valorile câmpului electric au fost de aproximativ 6–22 V/m la 30 cm, 13–33 V/m la aproximativ 1 m și 41–110 V/m la aproximativ 2 m.

Densitatea fluxului magnetic s-a menținut în intervalul aproximativ 0,23–0,39 μ T. Datele sunt prezentate în tabelul 15.2.17.

Tabelul 15.2.17 – Câmpul electromagnetic și densitatea fluxului magnetic măsurate la stâlpii de susținere ai sistemului hortivoltaic

Stâlp	30 cm (V/m)	~1 m (V/m)	~2 m (V/m)	Flux magn. (μ T)
Stâlp I	10	13	43	0,23–0,26
Stâlp II	9	18	110	0,26–0,36
Stâlp III	6	13	46	0,24–0,36
Stâlp IV	22	27	58	0,27–0,34
Stâlp V	10	33	41	0,34–0,36
Stâlp VI	7	30	43	0,33–0,39

Valorile măsurate au fost reduse și nu indică un câmp electromagnetic semnificativ pentru plante sau pentru operatorii care desfășoară lucrări în platformă.

15.2.11. Concluzii parțiale

Studiul realizat la USAMV București confirmă fezabilitatea tehnică a amplasării unor panouri fotovoltaice opace deasupra rândurilor de asimina. Structura cu stâlpi de 4,5 m, panouri dispuse pe un singur șir, orientate spre sud și înclinate la 30°, permite menținerea accesului în plantație și creează o umbră discontinuă, care se deplasează în cursul zilei și al sezonului.

Efectul cel mai clar demonstrat este modificarea regimului luminos. În punctele aflate direct sub panou, radiația fotosintetic activă a fost redusă cu 69–93% față de poziția expusă direct, media fiind de aproximativ 86%. Aceste valori caracterizează contrastul luminos măsurat punctual. La nivelul întregii coroane, expunerea variază în timp, deoarece deplasarea umbrei determină alternarea zonelor de lumină directă, lumină difuză și umbră.

Regimul termic și hidric al solului a prezentat o stratificare clară. Stratul superficial a avut variațiile cele mai rapide de temperatură și umiditate, în timp ce la adâncimea de 60 cm schimbările au fost mai lente și mai stabile. Rezultatele evidențiază utilitatea monitorizării simultane a mai multor adâncimi pentru adaptarea irigației la distribuția apei în profilul de sol.

Desfășurarea fenofazelor a variat în funcție de genotip și de regimul termic al primăverii. În anul 2026, pornirea înfloririi a fost sincronă, însă la 'Pa Golden 3', 'Pa Golden 2' și 'Wabash', faza receptivă și începutul eliberării polenului s-au produs cu 2–4 zile mai târziu sub panou decât la plantele neacoperite. La 'Asirius' și 'Asteria', diferențele au fost neglijabile, iar legarea fructelor s-a produs sincron, la 7 mai, la soiurile care au fructificat.

Creșterea vegetativă a variat între genotipuri și între plantele comparate. La majoritatea perechilor de pe rândul R5, plantele neacoperite au avut înălțimi ușor mai mari, în timp ce la soiul

'Asteria' planta amplasată sub panou a prezentat o creștere mai intensă. Acest răspuns diferențiat evidențiază importanța particularităților genotipice și a stadiului de dezvoltare în adaptarea la regimul luminos creat de sistem.

Pomii maturi au produs fructe cu însușiri fizice și biochimice valoroase. Conținutul de substanță uscată solubilă s-a situat, în general, între 18 și 26 °Brix, iar aciditatea a fost redusă. Diferențele observate între fructe au fost asociate îndeosebi cu particularitățile soiurilor și cu variația condițiilor climatice dintre ani.

În ansamblu, platforma reprezintă un model experimental funcțional pentru protecția parțială a plantelor tinere de asimina și pentru evaluarea relațiilor dintre lumină, microclimat, sol și dezvoltarea culturii. Umbra mobilă și discontinuă poate limita expunerea directă în orele cu radiație intensă, fără menținerea permanentă a întregii coroane într-un regim de lumină redusă.

Aplicarea acestei configurații în plantații comerciale trebuie corelată cu vârsta pomilor, dimensiunea și forma de coroană, distanțele de plantare și necesarul de lumină după intrarea deplină pe rod. Monitorizarea multianuală a acelorași genotipuri va permite urmărirea modului în care rolul protector al panourilor se modifică odată cu dezvoltarea plantației și cu creșterea încărcăturii de fructe.

15.3. Studiu de caz P3 – Panouri semitransparente în cultura de căpșun

15.3.1. Alegerea culturii și obiectivul agronomic al sistemului hortivoltaic

Căpșunul (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) este o specie erbacee perenă, de talie joasă, cu sistemul radicular concentrat în principal în stratul superficial al solului. Această particularitate determină un răspuns rapid al culturii la modificările temperaturii și ale regimului hidric din zona radiculară.

Ciclul de producție relativ scurt, valoarea economică ridicată și talia redusă sunt caracteristici care pot favoriza integrarea căpșunului în sistemele hortivoltaice.

Comparativ cu speciile horticole de talie mare, cultura necesită un spațiu vertical mai redus, iar lucrările tehnologice pot fi desfășurate între elementele de susținere, cu condiția ca structura să asigure accesul la plante și efectuarea operațiunilor de întreținere și recoltare.

Din punct de vedere tehnologic, sistemul de cultivare pe biloane, cu agrotexil și irigare prin picurare, poate fi asociat cu amplasarea panourilor deasupra rândurilor. Agrotexilul contribuie la controlul buruienilor și reduce contactul fructelor cu solul, în timp ce irigarea prin picurare permite administrarea localizată a apei.

Într-un cadru experimental, organizarea culturii în rânduri facilitează delimitarea și compararea zonelor cu grade diferite de umbră. Talia redusă a plantelor permite, de asemenea, monitorizarea comparativă a microclimatului, a stării fiziologice și a producției în raport cu poziția acestora față de panouri.

Integrarea căpșunului într-un sistem hortivoltaic trebuie însă să țină seama atât de sensibilitatea culturii la temperaturile ridicate și la deficitul de apă, cât și de răspunsul acesteia la reducerea excesivă a luminii. Temperaturile ridicate pot intensifica pierderile de apă, pot afecta funcționarea aparatului foliar, pot accelera maturarea și pot reduce durata de creștere a fructelor.

În perioadele de arșiță, frunzele și fructele pot fi supuse unui stres termic și radiativ accentuat, concomitent cu creșterea necesarului de irigare.

În același timp, producția și calitatea fructelor depind de menținerea unui nivel suficient de radiație fotosintetic activă. Lumina influențează fotosinteza, diferențierea florală, formarea producției și acumularea substanțelor solubile.

Dacă umbră este prea puternică sau se prelungește în perioade cu radiație deja redusă, avantajul protecției termice poate fi însoțit de limitarea creșterii și a calității fructelor.

Din acest motiv, căpșunul este potrivit pentru integrarea într-un sistem hortivoltaic mai ales ca specie pentru care poate fi urmărit un echilibru fin între protecție și disponibilitatea luminii.

Rolul sistemului nu este acela de a produce umbrirea maximă, ci de a reduce intensitatea stresului climatic fără să limiteze excesiv procesele dependente de lumină.

În cazul căpșunului, proiectarea trebuie să urmărească simultan:

- reducerea stresului termic și hidric în perioadele cu radiație intensă;
- conservarea umidității aerului și a solului;
- limitarea evaporării excesive și menținerea unui regim hidric mai stabil;
- păstrarea unui nivel suficient de lumină pentru fotosinteză, fructificare și acumularea zaharurilor;
- evitarea unui microclimat excesiv de umed, care poate favoriza uscarea lentă a frunzișului și apariția bolilor;
- realizarea simultană a producției horticole și a producției de energie.

Transparența panourilor devine astfel unul dintre principalii parametri de proiectare. O transparență mai redusă amplifică efectul de răcire și protecție, conservă mai bine umiditatea, dar limitează într-o măsură mai mare lumina disponibilă culturii. O transparență mai ridicată menține un regim luminos mai apropiat de cel exterior și reduce riscul de limitare prin umbrire, însă oferă o protecție microclimatică mai moderată.

Alegerea nu poate fi făcută independent de amplasament și de perioada de cultură. În zonele foarte calde și secetoase, o protecție mai accentuată poate deveni avantajoasă, în timp ce în amplasamente cu radiație mai redusă sau în perioade de producție timpurie trebuie acordată prioritate menținerii luminii. Soiul cultivat, densitatea plantelor, orientarea rândurilor și regimul de irigare pot modifica suplimentar răspunsul culturii.

În plus, configurația panourilor trebuie corelată cu accesul pentru lucrările tehnologice. Irigarea, fertilizarea, protecția fitosanitară, recoltarea și întreținerea biloanelor trebuie să rămână ușor de realizat, iar structura nu trebuie să creeze zone greu accesibile sau acumulări neuniforme de apă.

Așa cum este sintetizat în figura 15.3.1, alegerea configurației nu trebuie realizată numai în funcție de producția fotovoltaică.

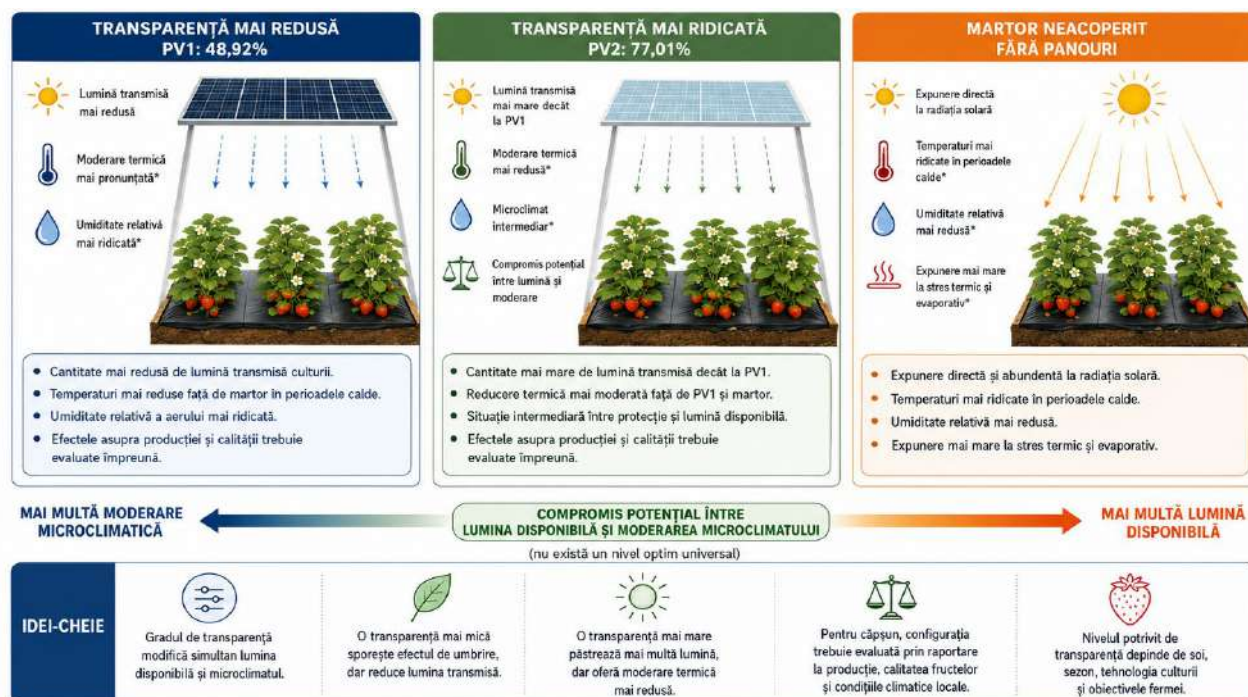


Figura 15.3.1 – Efectul nivelului de transparență al panourilor asupra luminii disponibile și microclimatului în cultura de căpșun (2024-2025; sursa: date proprii ale proiectului)

Alegerea configurației panourilor fotovoltaice trebuie fundamentată pe riscul climatic al amplasamentului, sensibilitatea soiului, perioada principală de fructificare, necesarul de lumină și posibilitatea menținerii unui microclimat echilibrat în jurul plantelor. Obiectivul agronomic principal al studiului a fost compararea a două niveluri de transparență a panourilor fotovoltaice semitransparente și evaluarea modului în care acestea influențează microclimatul, solul, starea aparatului foliar și caracteristicile productive și calitative ale fructelor.

15.3.2. Amplasamentul și organizarea platformei experimentale

Studiul de caz a fost realizat la Baza Experimentală Moara Domnească a SCDP Băneasa, în zona Afumați, județul Ilfov, la aproximativ 25 km de București. Platforma este situată la coordonatele aproximative 44°30'14,85" latitudine nordică și 26°14'45,60" longitudine estică.

Modulul hortivoltaic a fost instalat în luna iunie 2023.

Cultura a fost organizată în șase rânduri orientate nord-sud. Rândurile au traversat zonele acoperite de cele două tipuri de panouri și au continuat spre zona martor, ceea ce a permis compararea variantelor în condiții apropiate de sol și tehnologie. Plantele au fost dispuse în două rânduri pe biloane cu o lățime de aproximativ 140 cm. Distanța dintre plante a fost de circa 30 cm, iar distanța dintre cele două rânduri de plante de aproximativ 70 cm. Între parcelele experimentale a fost păstrat un interval de circa 50 cm. Biloanele au fost acoperite cu agrotexil, iar irigarea a fost realizată prin picurare, cu două linii de irigare pentru fiecare bilon.

Pentru limitarea influenței zonelor marginale, determinările și prelevările au fost concentrate în special pe rândurile centrale. Experiența a fost organizată în blocuri randomizate, cu trei repetiții pentru fiecare variantă. Pe fiecare bilon au fost delimitate zone de prelevare, iar probele de fructe au fost recoltate în mai multe momente, pentru surprinderea răspunsului pe parcursul perioadei de fructificare.

Au fost comparate trei variante experimentale:

- **V1/PV1** – cultură amplasată sub panouri fotovoltaice semitransparente cu transparență de 48,92%;
- **V2/PV2** – cultură amplasată sub panouri fotovoltaice semitransparente cu transparență de 77,01%;
- **M** – martor neacoperit, expus direct radiației solare.

Experiența a fost organizată în blocuri randomizate, cu trei repetiții pentru fiecare variantă, iar prelevările au fost realizate în mai multe momente ale perioadei de fructificare (Dragomir și colab., 2025).

În anul 2024 a fost cultivat soiul 'Sibilla'. Acesta se caracterizează prin plante viguroase, fructe de dimensiune medie spre mare, de formă conică sau tronconică, culoare roșie strălucitoare și gust echilibrat. În urma pierderilor de plante produse în perioada rece 2024–2025, cultura a fost refăcută în anul 2025 cu soiul remontant 'Murano'. În urma pierderilor de plante produse în perioada rece 2024–2025, cultura a fost refăcută în anul 2025 cu soiul remontant 'Murano'. Rezultatele celor doi ani sunt prezentate separat, deoarece provin de la soiuri diferite și din condiții climatice distincte.

Diferențele dintre anii 2024 și 2025 trebuie interpretate în relație atât cu condițiile climatice specifice fiecărui an, cât și cu schimbarea materialului biologic.

15.3.3. Configurația constructivă și energetică a sistemului

Sistemul este alcătuit dintr-o structură metalică mobilă, care susține panouri fotovoltaice semitransparente Brite Solar dispuse pe mai multe rânduri. Structura a fost proiectată astfel încât să permită pătrunderea parțială a luminii, accesul la cultură, desfășurarea lucrărilor tehnologice și circulația aerului între rânduri.

Configurația sistemului a avut în vedere talia redusă a culturii de căpșun, lățimea biloanelor, poziția rândurilor de plante și necesitatea efectuării irigației, tratamentelor fitosanitare și recoltării. Sistemul are o putere instalată declarată de 9 kWp.

Pentru varianta V1 au fost utilizate panouri Brite Solar BSG-250/49-F [BR], cu transparență de 48,92% și putere nominală de 250 Wp pe modul, iar pentru varianta V2 au fost utilizate panouri Brite Solar BSG-115/77-F [BR], cu transparență de 77,01% și putere nominală de 115 Wp pe modul.

Cele două tipuri de module nu diferă numai prin cantitatea de lumină transmisă culturii, ci și prin puterea nominală individuală. Alegerea transparenței implică astfel un compromis dublu: agronomic și energetic.

V1 filtrează o proporție mai mare din radiația incidentă și produce o umbră mai accentuată. Această configurație are potențialul de a limita mai eficient supraîncălzirea aerului, solului și plantelor, dar reduce mai mult lumina disponibilă fotosintezei.

V2 permite pătrunderea unei proporții mai mari de lumină și creează un regim mai apropiat de cel exterior. Efectul de protecție termică este mai redus decât în V1, dar riscul limitării prin deficit de lumină este, de asemenea, mai mic.

Structura a fost amplasată deasupra culturii, păstrând zone libere între module și între elementele de susținere. Aceste spații sunt importante pentru ventilarea culturii, evacuarea aerului cald și menținerea accesului tehnologic.

Configurația constructivă a permis compararea directă a celor două niveluri de transparență în cadrul aceleiași platforme și în condiții tehnologice apropiate.

Din punct de vedere agronomic, transparența nominală a panourilor nu descrie complet radiația care ajunge efectiv la plante.

Distribuția luminii depinde și de orientarea structurii, poziția modulelor, spațiile dintre acestea, unghiul solar și deplasarea umbrei în cursul zilei.

Din acest motiv, cele două configurații trebuie analizate nu doar prin procentul declarat de transparență, ci și prin efectele măsurate asupra microclimatului și culturii. Organizarea platformei, dispunerea culturii și delimitarea celor trei variante sunt prezentate în figura 15.3.2.



Figura 15.3.2 – Platforma hortivoltaică de la Baza Experimentală Moara Domnească: dispunerea culturii și variantele V1 – transparență de 48,92%, V2 – transparență de 77,01% și martorul neacoperit (sursa: date proprii ale proiectului)

15.3.4. Monitorizarea integrată

Monitorizarea platformei a urmărit simultan modificările microclimatului, starea solului, răspunsul aparatului foliar și caracteristicile fructelor.

Principalii indicatori microclimatici urmăriți au fost:

- temperatura medie, maximă și minimă a aerului;
- temperatura solului la adâncimea de aproximativ 10 cm;
- umiditatea relativă a aerului;
- umiditatea solului;
- radiația fotosintetic activă.

În anul 2024, datele microclimatice au fost analizate în principal pentru perioada iunie–octombrie. În anul 2025, monitorizarea aerului a acoperit perioada ianuarie–septembrie, ceea ce a permis evaluarea modificărilor sezoniere și a efectului panourilor în lunile de vară.

Radiația fotosintetic activă a fost monitorizată începând cu 31 iulie 2025. Determinările au completat caracterizarea celor două niveluri de transparență și au fost interpretate împreună cu datele microclimatice și cu răspunsul culturii.

Pentru evaluarea solului au fost analizate temperatura, umiditatea, reacția solului, carbonul organic, indicii de azot și conținuturile unor elemente minerale, între care fosfor, potasiu, fier și cupru. Componenta biologică a solului a fost evaluată prin densitatea bacteriană și fungică. Starea fiziologică a plantelor a fost urmărită prin indicii de conținut de clorofilă al frunzelor, CCI. Pentru fructe au fost determinate masa medie, dimensiunile, fermitatea, pH-ul și conținutul de substanță uscată solubilă. Probele au fost recoltate în mai multe momente ale perioadei de fructificare.

Datele au fost analizate comparativ pentru cele trei variante experimentale. Totuși, schimbarea solului între anii 2024 și 2025 impune interpretarea rezultatelor separat pentru fiecare an. Monitorizarea integrată a permis corelarea efectului constructiv al panourilor cu modificările mediului și cu răspunsul plantelor. Această abordare este necesară deoarece varianta care produce cea mai puternică moderare microclimatică nu este obligatoriu și varianta cu cele mai bune rezultate pentru toți indicatorii productivi și calitativi.

15.3.5. Contextul climatic al perioadei experimentale

Zona Moara Domnească este caracterizată printr-un climat temperat-continental, cu veri frecvent calde și secetoase și cu o distribuție neuniformă a precipitațiilor.

Temperatura medie multianuală a zonei este de aproximativ 10,9 °C. Temperatura medie a lunii ianuarie este de aproximativ -2,8 °C, iar cea a lunii iulie de aproximativ 22,9 °C. Valorile extreme raportate pentru zonă pot varia de la aproximativ -30 °C în timpul iernii până la peste 40 °C în lunile de vară.

Precipitațiile medii anuale sunt de aproximativ 564–580 mm, dar distribuția lor în cursul anului este neuniformă. Cantitățile mai ridicate sunt înregistrate, de regulă, la sfârșitul primăverii și începutul verii, în timp ce lunile de vară pot include perioade cu deficit hidric pronunțat.

Anul 2025 a fost relevant pentru evaluarea funcției de protecție a sistemului. Temperatura medie în perioada ianuarie–septembrie a fost de 14,60 °C. Temperatura maximă medie lunară a ajuns la 32,93 °C în luna iulie, iar umiditatea relativă minimă a coborât până la aproximativ 31,62% în august. Regimul pluviometric a fost contrastant. În luna mai au fost înregistrate aproximativ 142 mm precipitații, în timp ce în iunie au căzut 18,6 mm, în iulie 35,4 mm, iar în august numai 8,4 mm. Alternanța dintre o lună foarte umedă și o vară cu precipitații reduse a creat condiții potrivite pentru evaluarea rolului panourilor în reducerea stresului termic și în conservarea apei din zona radiculară.

Contextul climatic trebuie avut în vedere la interpretarea diferențelor dintre anii 2024 și 2025. Într-un an în care lumina nu este excesivă, reducerea radiației poate limita creșterea fructelor și acumularea substanțelor solubile. Într-un an foarte cald și secetos, beneficiile reducerii temperaturii și conservării apei pot deveni mai importante și pot compensa parțial sau total reducerea luminii.

15.3.6. Efectele asupra microclimatului

Panourile fotovoltaice semitransparente au modificat regimul termic și higrometric al aerului din zona culturii de căpșun. În anul 2024, monitorizarea a evidențiat, de asemenea, diferențe ale temperaturii și umidității solului între variante. Intensitatea efectului a depins de transparența modulelor: V1, cu transparență de 48,92%, a produs cea mai puternică moderare microclimatică, iar V2, cu transparență de 77,01%, a avut un efect intermediar între V1 și matorul neacoperit (figura 15.3.3; Dragomir și colab., 2024; Dragomir și colab., 2025).

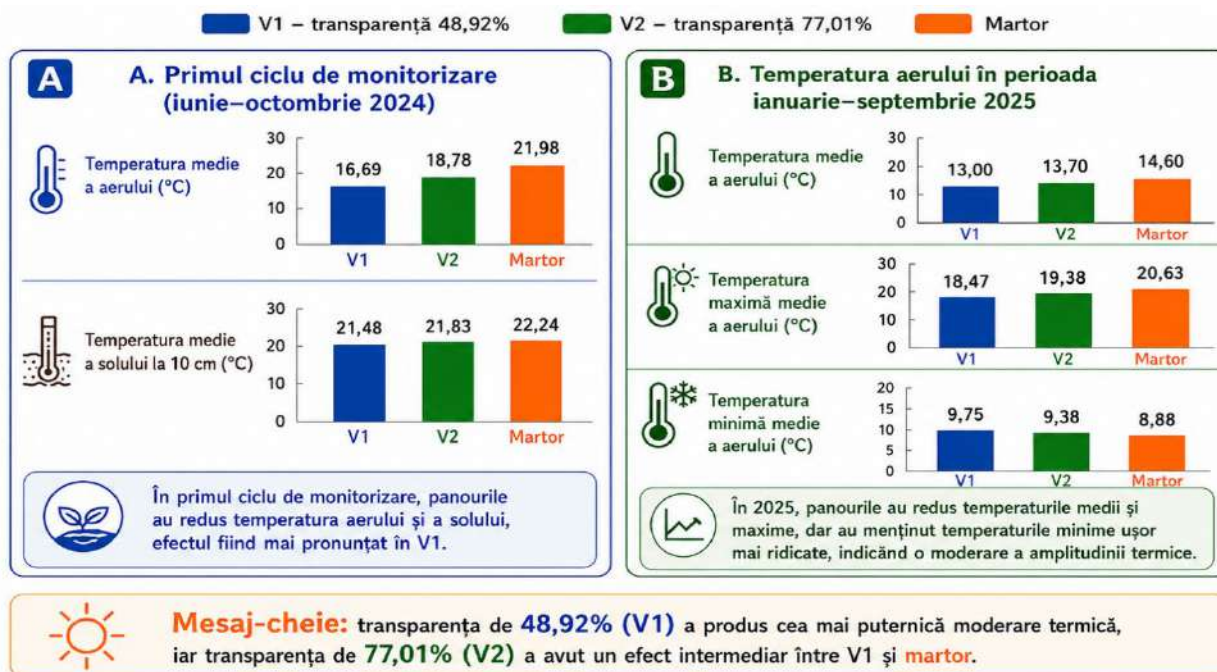


Figura 15.3.3 – Efectul panourilor fotovoltaice semitransparente asupra regimului termic al aerului și solului în cultura de căpșun: A – valorile medii din perioada iunie–octombrie 2024; B – temperatura medie, maximă și minimă a aerului în perioada ianuarie–septembrie 2025 (sursa: date proprii ale proiectului)

În anul 2024, efectul a fost observat atât la nivelul aerului, cât și al solului. În perioada iunie–octombrie, temperatura medie a aerului a fost de 16,69 °C în V1 – transparență de 48,92% și de 18,78 °C în V2 – 77,01% transparență, comparativ cu 21,98 °C în varianta mator, neacoperită cu panouri fotovoltaice. Reducerea față de zona neacoperită a fost, prin urmare, de 5,29 °C în cazul acoperirii cu panouri cu transparență de 48,92% și de 3,20 °C în cazul panourilor cu transparență de 77,01%.

Temperatura solului a răspuns în aceeași direcție, dar cu diferențe mai reduse. La adâncimea de monitorizare, valorile medii au fost de 21,48 °C în V1, 21,83 °C în varianta cu panouri fotovoltaice semitransparente cu 77,01% transparență și 22,24 °C în mator. Diferențele față de varianta neacoperită au fost, prin urmare, de -0,76 °C în V1 și de -0,41 °C în V2. Datele privind temperatura solului prezentate în acest studiu de caz se referă la perioada iunie–octombrie 2024.

Transparența mai redusă a intensificat efectul de răcire. Acest răspuns este important pentru căpșun, specie cu aparat foliar apropiat de suprafața solului și cu fructele expuse frecvent la temperaturi ridicate în timpul maturării. Reducerea temperaturii aerului din zona culturii poate limita supraîncălzirea țesuturilor și poate prelungi intervalele zilnice în care plantele funcționează în condiții termice mai puțin restrictive.

Datele din anul 2025 au confirmat aceeași ierarhie între variante. Pentru perioada ianuarie–septembrie, temperatura medie a aerului a fost de 13,00 °C în V1, 13,70 °C în V2 și 14,60 °C în mator. Temperaturile maxime medii au fost, de asemenea, mai reduse sub panouri: 18,47 °C în V1 – transparență de 48,92% și 19,38 °C în varianta cu panouri fotovoltaice cu 77,01% transparență, comparativ cu 20,63 °C în mator.

În schimb, temperaturile minime au fost ușor mai ridicate în variantele acoperite: 9,75 °C în V1 – transparentă de 48,92%, 9,38 °C în V2 – 77,01% transparentă și 8,88 °C în martor. Panourile nu au acționat, prin urmare, numai prin reducerea temperaturilor din timpul zilei, ci și prin atenuarea răcirii nocturne. Efectul general a fost de reducere a amplitudinii termice și de stabilizare a mediului imediat al culturii. Această funcție a devenit mai evidentă în lunile de vară. În perioada iunie–august 2025, V1 – transparentă de 48,92% a redus temperatura medie a aerului cu aproximativ 2,79 °C și temperatura maximă cu aproximativ 4,17 °C față de martor. În varianta cu panouri fotovoltaice semitransparente cu 77,01% transparentă, reducerile au fost de aproximativ 1,66 °C pentru temperatura medie și de 2,50 °C pentru temperatura maximă. Diferențele dintre variante s-au amplificat, așadar, tocmai în intervalul cu cel mai mare risc de stres termic.

Efectele asupra umidității au completat modificările termice. În anul 2024, umiditatea relativă a aerului a fost de 68,19% în V1 – transparentă de 48,92%, 66,32% în V2 – 77,01% transparentă și 64,26% în martor. La nivelul solului, valorile au fost de 22,77% în V1, 22,23% în varianta cu panouri fotovoltaice semitransparente cu 77,01% transparentă și 19,66% în martor. Panourile au fost asociate astfel cu menținerea unei umidități mai ridicate atât în aerul din zona culturii, cât și în stratul de sol monitorizat. Efectul a fost din nou mai pronunțat în V1, varianta cu transparentă mai redusă.

În anul 2025, umiditatea relativă medie a aerului a fost de 62,38% în V1 și de 58,71% în V2, comparativ cu 55,27% în martor. În perioada iunie–august, diferența față de martor a ajuns la aproximativ 10 puncte procentuale în V1 – transparentă de 48,92% și la aproximativ 5 puncte procentuale în varianta cu panouri fotovoltaice semitransparente cu 77,01% transparentă.

Efectele prezentate în figura 15.3.4 arată că panourile nu au influențat numai temperatura, ci întregul mediu termohidric în care s-a dezvoltat cultura. Reducerea încălzirii și menținerea unei umidități mai ridicate au creat un microclimat mai protejat decât în zona neacoperită.

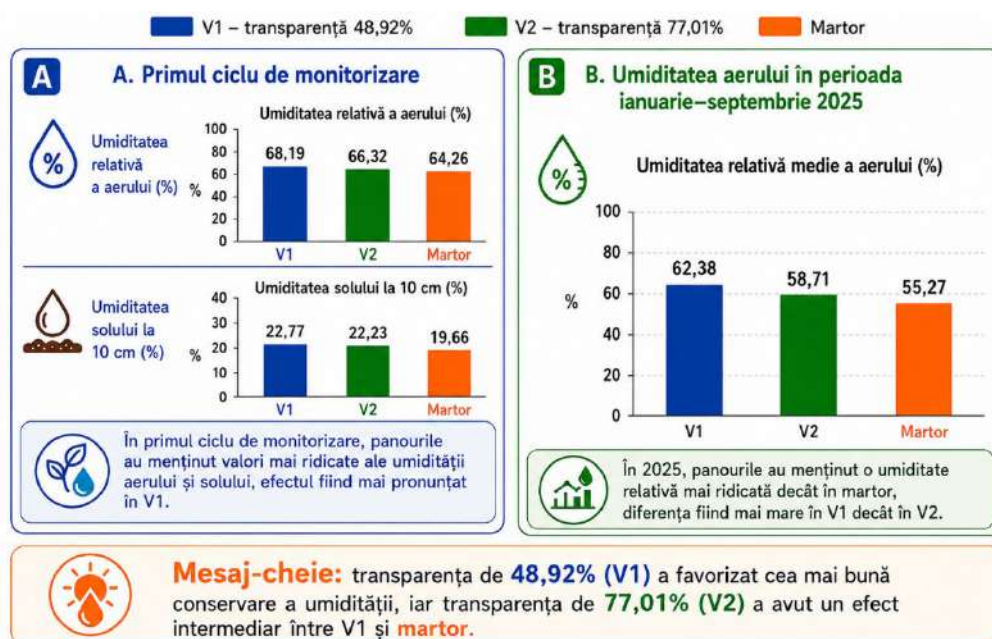


Figura 15.3.4 – Efectul panourilor fotovoltaice semitransparente asupra regimului de umiditate în cultura de câpșun: A – umiditatea relativă medie a aerului și umiditatea medie a solului la adâncimea de 10 cm, în primul ciclu de monitorizare, pentru perioada iunie–octombrie; B – umiditatea relativă medie a aerului în perioada ianuarie–septembrie 2025. V1 – panouri cu transparentă de 48,92%; V2 – panouri cu transparentă de 77,01%; Martor – varianta neacoperită (sursa: date proprii ale proiectului)

Pentru câpșun, acest răspuns poate fi important în perioadele cu temperaturi ridicate și precipitații reduse, când stratul superficial al solului și zona radiculară activă sunt expuse unei pierderi rapide de apă. În același timp, o umiditate mai ridicată nu trebuie interpretată automat ca efect favorabil în orice condiții. Ea trebuie analizată împreună cu ventilația structurii, durata umezirii foliajului, regimul de irigare și riscul de apariție a bolilor favorizate de umiditate.

În ansamblu, datele arată că panourile semitransparente au acționat ca infrastructuri de moderare locală a mediului de cultură.

Varianta cu panouri fotovoltaice semitransparente cu transparentță 48,92% a oferit cea mai puternică moderare a temperaturii și cea mai bună conservare a umidității aerului. În seria din 2024, aceasta a înregistrat și cea mai ridicată umiditate a solului la adâncimea monitorizată. V2 a avut un efect microclimatic mai moderat. Alegerea dintre cele două configurații nu poate fi realizată însă numai pe baza microclimatului, deoarece reducerea mai accentuată a temperaturii și conservarea apei trebuie puse în relație cu lumina disponibilă, producția și calitatea fructelor.

15.3.7. Efectele asupra proprietăților agrochimice și biologice ale solului

Efectul panourilor nu se limitează la temperatura și umiditatea aerului. Modificarea radiației care ajunge la suprafața terenului și a condițiilor termice și hidrice din stratul superficial poate influența procesele agrochimice și biologice ale solului. În cadrul platformei de la SCDP Băneasa, analizele realizate în anul 2024 au evidențiat diferențe între cele două variante acoperite și martor, fără conturarea însă a unui răspuns unitar pentru toți indicatorii.

Varianta cu panouri fotovoltaice semitransparente cu 48,92% transparentță a avut cel mai ridicat conținut de carbon organic, în timp ce martorul a prezentat valori mai mari ale indicelui de azot și ale conținuturilor de fosfor și potasiu (figura 15.3.5).

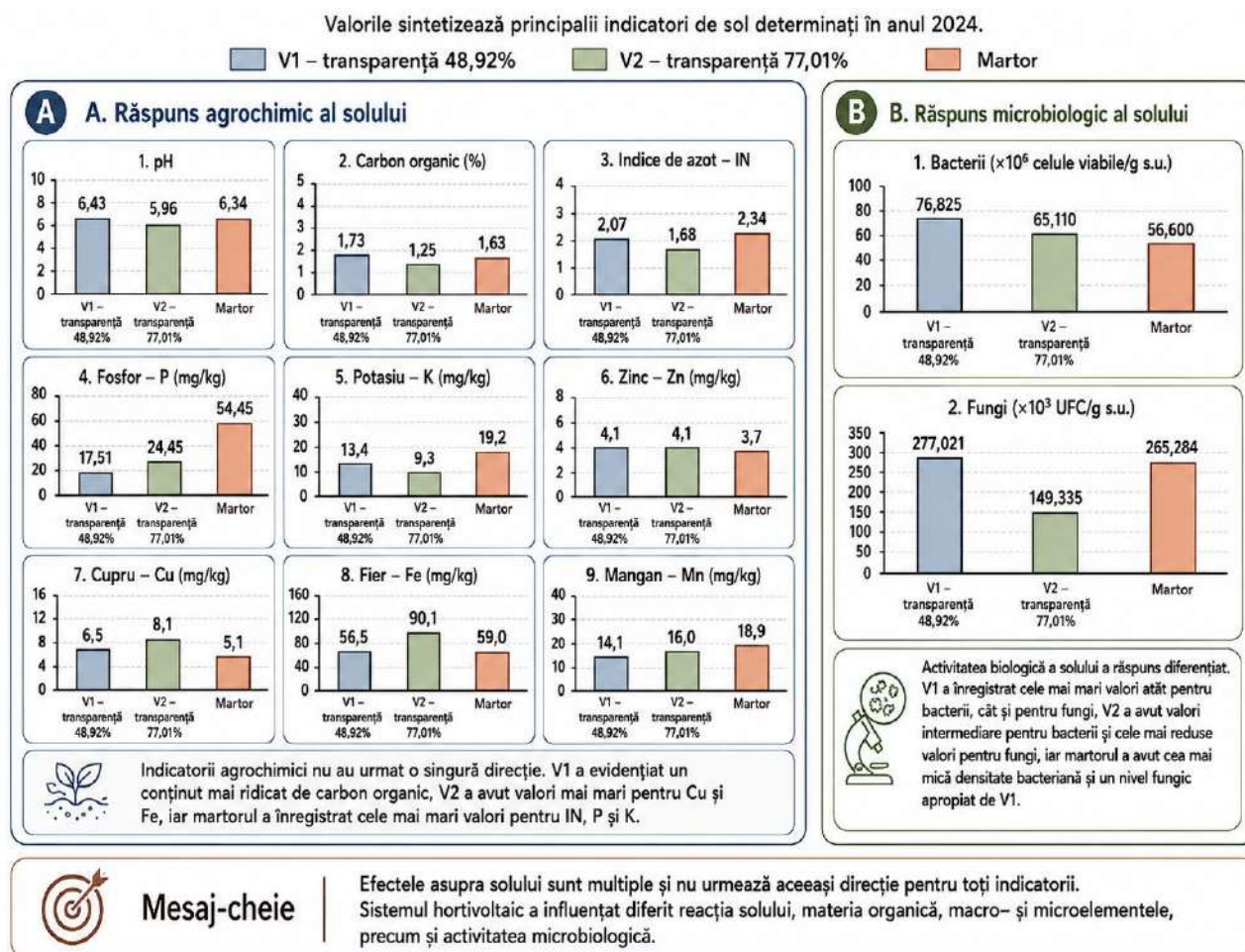


Figura 15.3.5 – Răspunsul agrochimic și microbiologic al solului în variantele cu transparentță de 48,92%, 77,01% și în martorul neacoperit (sursa: date proprii ale proiectului)

Varianta cu panouri fotovoltaice semitransparente cu 77,01% transparentță s-a diferențiat printr-un conținut mai ridicat de fier și cupru și prin valoarea cea mai redusă a pH-ului.

Distribuția indicatorilor agrochimici arată că răspunsul solului a fost diferențiat. Disponibilitatea elementelor nutritive este influențată simultan de temperatura și umiditatea solului, absorbția realizată de plante, mineralizarea materiei organice, reacția solului și activitatea microorganismelor. Prin urmare, rezultatele descriu o distribuție diferențiată a indicatorilor mediului edafic, nu o variație uniformă a fertilității în favoarea unei singure variante.

Densitatea bacteriană a fost mai mare în variantele acoperite și a atins valoarea maximă în V1. În ceea ce privește încărcătura fungică, varianta cu panouri fotovoltaice cu o transparență de 48,92% și martorul au prezentat valori apropiate, în timp ce, în varianta V2, încărcătura fungică a fost mai redusă. Aceste rezultate evidențiază diferențe ale densității bacteriene și ale încărcăturii fungice între variante, fără a permite atribuirea lor exclusivă sistemului hortivoltaic.

O umiditate mai ridicată poate favoriza anumite procese microbiene, însă efectul depinde și de aerare, temperatură, reacția solului și resursele organice disponibile.

În evaluările multianuale, analizele de sol trebuie realizate în aceleași puncte și corelate cu temperatura, umiditatea, irigarea și dezvoltarea culturii, pentru urmărirea coerentă a evoluției fiecărei variante.

15.3.8. Efectele asupra stării fiziologice

Răspunsul plantei a fost urmărit în principal prin indicele conținutului de clorofilă al frunzelor, CCI. Valorile mai ridicate din variantele acoperite indică menținerea unui conținut relativ mai mare de clorofilă în frunze. Cea mai ridicată valoare a fost înregistrată în V2, varianta cu umbră moderată. Rezultatul, prezentat în figura 15.3.6, indică menținerea unui conținut relativ mai ridicat de clorofilă în variantele acoperite, fără a permite separarea efectelor temperaturii, luminii și ale celorlalți factori de mediu.

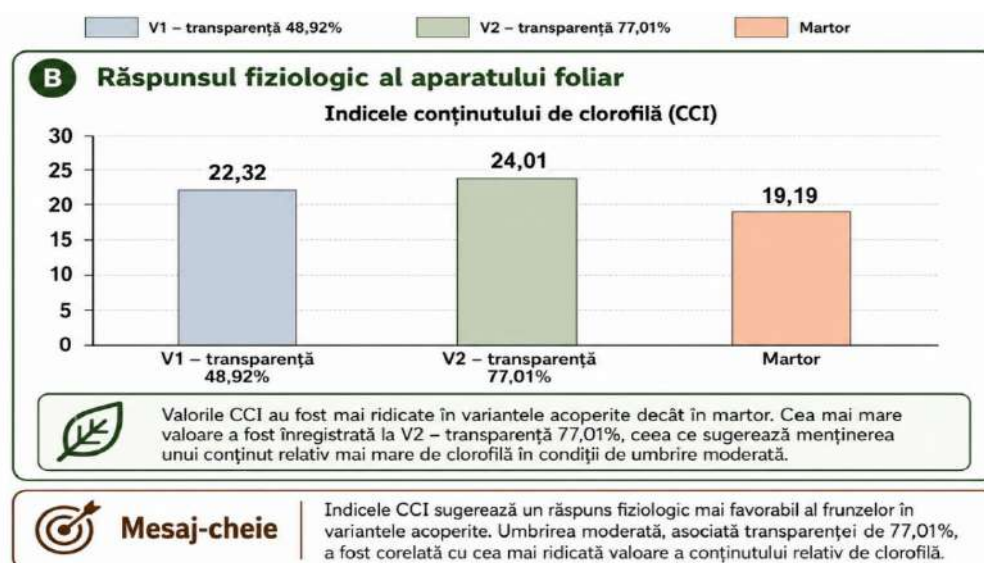


Figura 15.3.6 – Indicele conținutului de clorofilă al frunzelor de căpșun în variantele V1 – transparență de 48,92%, V2 – transparență de 77,01% și martor, în anul 2025 (sursa: date proprii ale proiectului)

Valoarea maximă a indicelui conținutului de clorofilă a fost înregistrată în V2, cu transparență de 77,01%, și nu în V1, unde umbrărea a fost mai accentuată.

Poziția superioară a variantei V2 sugerează că răspunsul aparatului foliar nu a depins exclusiv de intensitatea moderării termice.

O reducere moderată a temperaturii și radiației poate limita stresul asupra aparatului foliar, în timp ce umbrărea prea intensă poate reduce stimulul luminos necesar menținerii unei activități fotosintetice ridicate.

Cu toate acestea, indicele CCI nu demonstrează singur o eficiență fotosintetică superioară.

15.3.9. Efectele asupra producției și calității

Efectul panourilor asupra fructelor nu a avut aceeași direcție în cei doi ani. Acesta este unul dintre cele mai importante rezultate ale studiului de caz, deoarece arată că transparența nu poate fi evaluată separat de soi și de condițiile climatice ale sezonului.

În anul 2024, la soiul 'Sibilla', mărtoșul neacoperit a avut fructele cu cea mai mare masă medie și cel mai ridicat conținut de substanță solubilă (figura 15.3.7). Prin urmare, în acest caz, umbrirea a fost asociată cu fructe ceva mai ferme, dar mai mici și cu un conținut mai redus de substanțe solubile (Dragomir și colab., 2024).

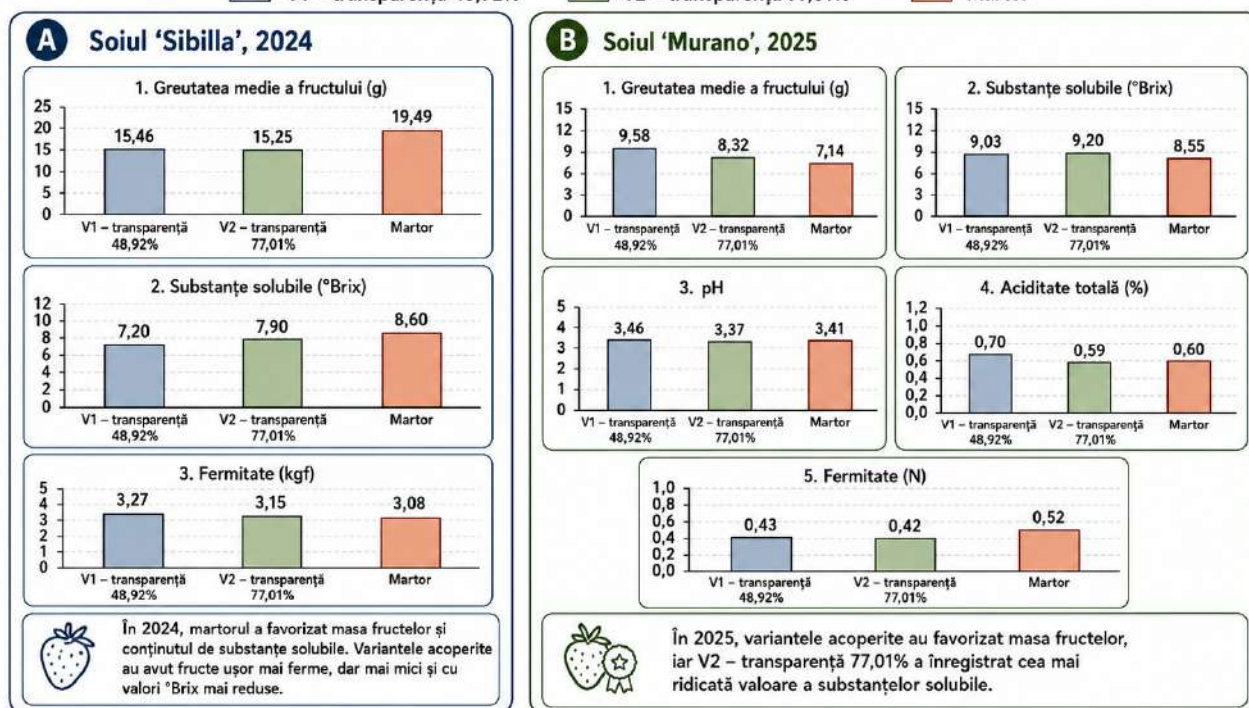
Diferența de masă dintre mărtoș și variantele acoperite arată că, în condițiile anului 2024, reducerea luminii nu a fost compensată de avantajul microclimatic. Acumularea de substanță solubilă a urmat aceeași tendință: valoarea cea mai redusă a fost înregistrată în varianta cu panouri fotovoltaice semitransparente cu 48,92% transparență, iar valoarea din V2, cu transparență de 77,01%, a fost mai apropiată de cea a mărtoșului. Fermitatea a răspuns diferit. Valorile au fost ușor mai mari sub panouri, dar diferențele au fost reduse.

În anul 2025, la soiul 'Murano', ierarhia variantelor în funcție de masa medie a fructului a fost diferită de cea observată în anul 2024 (figura 15.3.7).

În contextul unei veri calde și secetoase, fructele din variantele acoperite au avut o masă mai mare decât cele din mărtoș. Varianta cu panouri fotovoltaice semitransparente cu 48,92% transparență, care a produs cea mai puternică moderare a temperaturii, a avut și fructele cele mai grele. Pentru conținutul de substanță solubilă, valoarea maximă a fost înregistrată în V2. Această variantă a combinat o reducere moderată a stresului termic cu o transparență mai ridicată, ceea ce poate explica poziția favorabilă pentru conținutul total de substanță solubilă.

Contrastul dintre ani evidențiază răspunsuri diferite ale fructelor la microclimatul creat de panourile semitransparente.

■ V1 – transparență 48,92% ■ V2 – transparență 77,01% ■ Mărtoș



Mesaj-cheie

Răspunsul fructelor nu a avut aceeași direcție în cei doi ani. La 'Sibilla', mărtoșul a favorizat masa și °Brix, în timp ce la 'Murano' variantele acoperite au favorizat masa fructelor, iar V2 – transparență 77,01% a avut cel mai ridicat °Brix.

Figura 15.3.7 – Răspunsul productiv și calitativ al fructelor de căpșun la gradul de transparență al panourilor: A – soiul 'Sibilla', 2024; B – soiul 'Murano', 2025 (sursa: date proprii ale proiectului)

Martorul a avut cea mai mare fermentare. În schimb, valorile pH-ului au fost apropiate, iar diferențele de aciditate au fost relativ reduse.

Contrastul dintre cei doi ani reflectă simultan particularitățile soiurilor și condițiile climatice diferite în care acestea au fost cultivate. 'Sibilla' și 'Murano' au fost cultivate în ani diferiți și au fost expuse unor condiții climatice diferite. Rezultatul arată însă că răspunsul la umbră este dependent de combinația dintre:

- particularitățile soiului;
- perioada de fructificare;
- intensitatea stresului termic și hidric;
- cantitatea de lumină disponibilă;
- capacitatea sistemului de a modera microclimatul.

Din perspectiva utilizatorului ghidului, concluzia importantă nu este că una dintre variante este întotdeauna superioară, ci că transparența trebuie testată în raport cu soiul și sezonul de producție.

Privite împreună, datele microclimatice și cele privind fructele arată că intensitatea moderării mediului nu s-a reflectat identic în toți indicatorii agronomici și calitativi. Varianta V1, cu transparență de 48,92%, a produs cea mai accentuată reducere a temperaturii și cea mai bună conservare a umidității, iar în anul 2025 această protecție a coincis cu cea mai mare masă medie a fructelor. În schimb, valoarea cea mai ridicată a conținutului de substanță uscată solubilă a fost înregistrată în V2, ceea ce sugerează că o transparență mai mare a permis menținerea unui aport luminos mai favorabil acestui indicator, fără pierderea completă a efectului de protecție microclimatică.



Figura 15.3.8 – Efectul gradului de transparență al panourilor asupra calității căpșunelor (soiul 'Murano', 2025, sursa: date proprii ale proiectului)

Interpretarea agronomică a sistemului trebuie să integreze masa și calitatea fructelor cu producția totală și comercializabilă, uniformitatea lotului și distribuția recoltării pe clase de calitate. În studiul de față, rezultatele caracterizează distinct răspunsul soiului 'Sibilla' în anul 2024 și al soiului 'Murano' în anul 2025.

15.3.10. Componenta energetică și economică

Platforma de la SCDP Băneasa are o putere instalată declarată de 9 kWp și demonstrează posibilitatea utilizării simultane a terenului pentru cultura de căpșun și producerea energiei electrice (Dragomir și colab., 2024; Dragomir și colab., 2025).

Cele două tipuri de panouri corespund unor configurații diferite de integrare. Modulele utilizate în V1 au o transparență de 48,92% și o putere nominală de 250 Wp, iar cele din V2 au o transparență de 77,01% și o putere nominală de 115 Wp. V1 a produs cea mai pronunțată moderare a microclimatului, în timp ce transparența nominală mai ridicată a modulelor din V2 indică o capacitate mai mare de transmitere a luminii către cultură. Diferența efectivă de radiație fotosintetic activă dintre variante nu a putut fi însă cuantificată pentru întreaga perioadă experimentală.

Alegerea configurației trebuie realizată prin integrarea performanței energetice cu răspunsul culturii. Puterea instalată, producția anuală de energie, valoarea autoconsumului, costurile structurii și mentenanței, volumul de apă utilizată, producția comercializabilă și calitatea fructelor sunt componentele principale ale evaluării economice.

În acest studiu, analiza evidențiază în primul rând relația dintre transparența panourilor și performanța agronomică, modificarea microclimatului și răspunsul agronomic al culturii. V1 a produs cea mai puternică moderare termică și cele mai ridicate valori ale umidității relative a aerului, iar în anul 2024 a înregistrat și cea mai ridicată umiditate a solului. V2 a avut un efect microclimatic intermediar și o transparență nominală mai mare. Valoarea comercială a fiecărei configurații depinde de modul în care aceste efecte sunt corelate cu producția de energie și cu cerințele specifice ale exploatației.

15.3.11. Concluzii parțiale

Studiul realizat la Baza Experimentală Moara Domnească arată că panourile fotovoltaice semitransparente pot modifica în mod evident microclimatul unei culturi de căpșun.

Intensitatea modificărilor microclimatice a variat în funcție de transparența modulelor. V1, cu o transparență de 48,92%, a produs cea mai puternică reducere a temperaturii aerului și cele mai ridicate valori ale umidității relative a aerului. În seria de monitorizare din 2024, V1 a înregistrat și cea mai ridicată umiditate a solului la adâncimea de 10 cm. V2, cu o transparență de 77,01%, a avut un efect microclimatic intermediar între V1 și martorul neacoperit.

În anul 2024, temperatura medie a aerului a fost cu aproximativ 5,29 °C mai redusă în V1 și cu 3,20 °C mai redusă în V2 față de martor. În perioada iunie–august 2025, efectul de moderare termică s-a menținut, iar reducerea temperaturilor maxime a ajuns la aproximativ 4,17 °C în V1 și 2,50 °C în V2. În ambii ani, variantele acoperite au înregistrat valori mai ridicate ale umidității relative a aerului decât martorul. În anul 2024, umiditatea solului la adâncimea de 10 cm a fost, de asemenea, mai ridicată sub panouri. Aceste condiții pot fi favorabile în perioadele calde și secetoase, dar justifică monitorizarea ventilației și a riscului fitosanitar în perioadele umede.

Răspunsul solului a fost diferențiat între indicatorii agrochimici și microbiologici. V1 a avut un conținut mai ridicat de carbon organic și cea mai mare densitate bacteriană, în timp ce martorul a prezentat valori mai ridicate pentru unii indicatori nutritivi. Rezultatele evidențiază interacțiunea dintre regimul termohidric, fertilitatea solului și activitatea biologică.

Rezultatele privind fructele au diferit în funcție de soi și de condițiile anului. În anul 2024, la 'Sibilla', martorul a prezentat cea mai mare masă medie a fructului și cel mai ridicat conținut de substanță uscată solubilă. În anul 2025, la 'Murano', variantele acoperite au avut fructe mai grele decât martorul; cea mai ridicată masă medie a fost înregistrată în V1, iar cea mai ridicată valoare a conținutului de substanță uscată solubilă, în V2.

Indicele conținutului de clorofilă a fost cel mai ridicat în V2 (transparență de 77,01%), sugerând că această configurație ar putea oferi un compromis favorabil între protecția termică și lumina disponibilă.

O transparență mai redusă poate fi justificată în amplasamente foarte calde și secetoase sau pentru soiuri care fructifică în perioada de vară. O transparență mai ridicată poate fi mai potrivită atunci când se urmărește un compromis între protecția microclimatică, menținerea activității fotosintetice și acumularea substanțelor solubile. În ansamblu, studiul confirmă faptul că transparența panourilor este un parametru agronomic esențial. Sistemul trebuie proiectat ca infrastructură de reglare a mediului de cultură, nu doar ca suport pentru producerea energiei.

15.4. Rolul analizelor suport realizate prin P2–ICPA București

În cadrul proiectului, P2 – ICPA București a avut rolul de a completa interpretarea sistemelor hortivoltaice prin analize de sol și plantă. Această componentă este necesară deoarece efectele panourilor nu se limitează la modificarea luminii și a temperaturii aerului. Prin schimbarea regimului radiativ și termic, sistemele pot influența evaporarea, umiditatea din zona radiculară, activitatea biologică a solului, disponibilitatea elementelor nutritive și starea de nutriție a plantelor.

Analizele realizate de ICPA București au contribuit direct la caracterizarea proprietăților agrochimice ale solului și a statusului nutrițional al plantelor din platforma de coacăz roșu de la ICDP Pitești–Mărcăneni. Aceste determinări au completat evaluările de microclimat, producție și calitate și au susținut interpretarea integrată a relațiilor dintre configurația hortivoltaică, sol și plantă.

15.4.1. Analizele de sol și plantă utilizate în proiect

În platforma de coacăz roșu au fost analizate reacția solului, conținutul de humus, azotul total, fosforul și potasiul accesibile, proprietățile de schimb cationic și formele mobile ale zincului, cuprului, fierului și manganului. Aceste determinări au permis caracterizarea stării inițiale de fertilitate a terenului și urmărirea evoluției proprietăților agrochimice în variantele neacoperite și acoperite cu panouri. Reperul inițial este important deoarece diferențele ulterioare dintre plante pot reflecta atât influența configurației hortivoltaice, cât și variabilitatea naturală a solului.

Analizele au fost realizate prin metode standardizate utilizate în laboratoarele ICPA București. Reacția solului a fost determinată potențimetric, iar carbonul organic prin metoda Walkley–Black, în modificarea Gogoasă. Azotul total a fost determinat prin metoda Kjeldahl. Fosforul și potasiul accesibil au fost extrase cu soluție de acetat-lactat de amoniu și determinate spectrofotometric, respectiv flamfotometric. Proprietățile de schimb cationic au fost evaluate prin metoda Kappen, iar formele mobile ale zincului, cuprului, fierului și manganului au fost extrase cu EDTA–acetat de amoniu și determinate prin spectrometrie de absorbție atomică.

În completarea analizelor de sol, a fost evaluată compoziția minerală a frunzelor de coacăz roșu. Probele au fost recoltate în luna mai, din mijlocul lăstarilor anuali cu expoziție sudică, din fiecare variantă experimentală și repetiție.

După uscare și măcinare fină, rezultatele au fost raportate la substanța uscată. Au fost determinate azotul, fosforul, potasiul, calciul, magneziul, zincul, cuprul, fierul și manganul. Azotul a fost determinat prin metoda Kjeldahl, fosforul colorimetric, cu metavanadat și molibdat de amoniu, potasiul și calciul flamfotometric, iar magneziul și microelementele prin spectrometrie de absorbție atomică. În anul 2026, evaluarea aparatului foliar a fost completată prin determinarea spectrofotometrică a clorofilei a, clorofilei b și a carotenoidelor, după extracția pigmentilor din material vegetal proaspăt. Acești indicatori au completat caracterizarea răspunsului foliar la regimul de lumină din cele trei variante experimentale.

15.4.2. Contribuția analizelor suport la interpretarea sistemelor hortivoltaice

Analizele de sol și plantă au permis integrarea rezultatelor microclimatice cu funcționarea sistemului sol–plantă. Reducerea radiației și a temperaturii poate influența umiditatea solului, ritmul de mineralizare a materiei organice, mobilitatea elementelor nutritive și absorbția acestora de către rădăcini.

Diagnoza foliară este importantă deoarece arată dacă modificările observate în sol se reflectă efectiv în nutriția plantei. Valorile din sol descriu resursele potențial disponibile, în timp ce compoziția frunzelor integrează disponibilitatea elementelor, funcționarea rădăcinilor, consumul plantei, încărcătura de rod, regimul hidric și condițiile climatice.

În cazul coacăzului roșu, rezultatele au indicat o stare de nutriție minerală în general echilibrată, fără semnale care să sugereze afectarea majoră a aprovizionării plantelor sub panouri. Unele elemente, în special potasiul, au avut frecvent valori mai ridicate în variantele hortivoltaice, dar răspunsul nu a fost identic pentru toate elementele și în toți anii.

Determinarea pigmentilor foliari a completat această interpretare. Modificările observate au sugerat o ajustare a aparatului fotosintetic la noul regim luminos, nu o degradare generală a stării fiziologice.

În cazul căpșunului, analizele solului au evidențiat faptul că modificarea microclimatului poate influența atât proprietățile agrochimice, cât și comunitățile microbiene. Răspunsul diferit al bacteriilor și fungilor arată că efectul sistemului depinde de interacțiunea dintre temperatură, apă, aerare, reacția solului și resursele organice disponibile.

Prin contribuția P2, interpretarea studiilor nu s-a limitat la relația directă dintre panouri și producție. Solul și nutriția plantelor au fost incluse ca elemente ale aceluiași sistem agroecologic, în care lumina, temperatura, apa, activitatea biologică și absorbția elementelor nutritive interacționează.

15.4.3. Limite și condiții pentru interpretarea rezultatelor agrochimice

Diferențele dintre variante nu pot fi atribuite automat panourilor. Solul are o variabilitate spațială naturală, iar valorile măsurate pot fi influențate de poziția probelor, istoricul fertilizării, distribuția apei, dezvoltarea sistemului radicular și consumul plantelor.

Interpretarea este cu atât mai dificilă atunci când nu există probe inițiale recoltate înaintea instalării sistemului sau când punctele de prelevare nu sunt menținute în aceleași poziții pe parcursul anilor.

Pentru culturile perene, efectele asupra fertilității pot apărea lent și se pot acumula. Din acest motiv, analizele realizate într-un singur an nu sunt suficiente pentru formularea unor concluzii privind evoluția pe termen lung a solului.

Monitorizarea trebuie să includă probe recoltate periodic din aceleași poziții, în variante martor și sub panouri, și să fie corelată cu datele privind temperatura și umiditatea solului, irigarea, fertilizarea și producția.

Diagnoza foliară trebuie realizată în aceeași fenofază, pe frunze comparabile ca poziție și vârstă. Valorile trebuie analizate împreună cu starea solului și cu răspunsul productiv al culturii, nu separat.

Contribuția P2 confirmă astfel că monitorizarea solului și plantei trebuie inclusă încă din etapa de pilotare a unui sistem hortivoltic. Această cerință este deosebit de importantă în plantațiile perene, unde modificările aparent reduse ale apei, temperaturii și nutriției se pot cumula în timp.

15.5. Analiza comparativă a celor trei studii de caz

Cele trei platforme experimentale au analizat culturi, configurații și obiective agronomice diferite. Compararea lor nu urmărește stabilirea unui clasament între sistemele hortivoltaice, ci identificarea mecanismelor comune și a factorilor care determină diferențele de răspuns.

Coacăzul roșu a fost evaluat într-un sistem cu panouri opace și două orientări distincte. La asimina, accentul a fost pus pe protecția plantelor tinere și pe distribuția discontinuă a umbrei. La căpșun, variabila constructivă principală a fost transparența modulelor.

Aceste diferențe arată că un sistem hortivoltic nu este definit numai de prezența panourilor, ci de relația dintre configurația sistemului, biologia culturii și condițiile climatice.

15.5.1. Obiectivele agronomice ale celor trei sisteme

În platforma de coacăz roșu, obiectivul principal a fost reducerea stresului radiativ, termic și hidric într-o plantație matură, fără afectarea producției și calității fructelor.

În platforma de asimina, funcția agronomică a sistemului a fost diferită. Panourile au urmărit în principal protecția plantelor tinere față de radiația directă intensă și înlocuirea unor soluții temporare de umbră.

În cultura de căpșun, obiectivul a fost identificarea unui echilibru între moderarea microclimatului și menținerea luminii necesare fotosintezei, fructificării și acumulării compușilor solubili.

Prin urmare, cele trei sisteme nu au pornit de la aceeași problemă agronomică:

- coacăzul a fost analizat ca specie sensibilă la stresul termic și radiativ în faza de producție;
- asimina ca specie care necesită protecție mai ales în fazele juvenile;
- căpșunul ca specie la care reducerea excesivă a luminii poate limita rapid producția și calitatea.

15.5.2. Configurațiile constructive și distribuția luminii

La coacăz au fost utilizate panouri opace amplasate la înălțimi cuprinse între 3,6 și 6,0 m, în două configurații: orientare est-vest și orientare sudică. Configurația est-vest a produs cea mai mare reducere a radiației și cea mai pronunțată moderare a temperaturii și a apei din sol.

Configurația sudică a avut un efect mai redus, dar a menținut condiții mai protejate decât martorul.

Tabelul 15.5.1 – Compararea configurațiilor și obiectivelor celor trei sisteme hortivoltaice (sursa: elaborare proprie pe baza datelor proiectului)

Criteriu	Coacăz roșu 'Rovada'	Asimina	Căpșun
 Tip de cultură	arbust fructifer peren, plantație matură	specie pomicolă emergentă, plante de vârste diferite	cultură erbacee de talie joasă
 Obiectiv agronomic dominant	reducerea stresului radiativ, termic și hidric	protecția plantelor tinere	echilibrul dintre protecție și lumină
 Tip de modul	opac	opac	semitransparent
 Variabila constructivă principală	orientarea	poziția și deplasarea umbrei	transparența
 Configurațiile	est-vest și sud	module discontinue orientate spre sud	48,92% și 77,01% transparență
 Efect dominant asupra luminii	reducere foarte mare, mai accentuată în est-vest	reducere locală puternică, dar mobilă	reducere proporțională cu transparența
 Stadiul culturii	pe rod	preponderent juvenilă	producție anuală/remontantă



Lumină: intensitatea și distribuția radiației la nivelul plantei sunt determinate de orientarea, poziția și transparența panourilor, precum și de dinamica umbrei pe parcursul zilei și al sezonului.



Microclimat: toate configurațiile modifică temperatura și umiditatea aerului și solului, cu intensitate diferită în funcție de sistem și de condițiile climatice.



Răspuns agronomic: efectele asupra creșterii, producției și calității depind de specie, soi, stadiul de dezvoltare și disponibilitatea apei.

La asimina au fost utilizate panouri opace dispuse discontinuu, pe un singur șir deasupra rândurilor. Umbra s-a deplasat în cursul zilei și al sezonului, astfel încât plantele nu au rămas permanent sub aceeași zonă de acoperire. În punctele măsurate direct sub panou, reducerea radiației fotosintetice active a fost foarte mare. Totuși, aceste valori nu descriu doza zilnică primită de întreaga coroană, tocmai din cauza deplasării umbrei.

La căpșun au fost testate panouri semitransparente cu transparențe de 48,92% și 77,01%. Varianta cu transparență mai redusă a produs cea mai accentuată protecție termică și hidrică. Varianta mai transparentă a păstrat un aport luminos mai ridicat și a creat un microclimat intermediar.

15.5.3. Efectele comune asupra microclimatului

Toate cele trei sisteme au redus radiația directă care a ajuns la cultură. Intensitatea efectului a depins însă de opacitatea panourilor, orientare, continuitatea acoperirii și poziția plantelor.

La coacăz, reducerea radiației a fost asociată cu diminuarea temperaturii maxime a aerului, reducerea temperaturii medii a solului și stabilizarea amplitudinii termice zilnice. Efectul a fost mai puternic în configurația est-vest. Tot în această configurație au fost menținute cele mai ridicate valori ale umidității relative a aerului și umidității volumetrice a solului.

La asimina, efectul cel mai bine demonstrat a fost modificarea regimului luminos. Datele privind temperatura și apa din sol au arătat o stratificare clară pe adâncimi, dar nu au permis separarea completă a efectului panourilor de influența irigației, mulciului și precipitațiilor.

La căpșun, varianta cu transparență de 48,92% a produs cea mai mare reducere a temperaturii aerului și cea mai bună menținere a umidității aerului și solului. Varianta cu transparență de 77,01% a avut efecte intermediare.

Rezultatul comun al celor trei studii este că beneficiile microclimatice devin mai importante în perioadele cu temperaturi ridicate, radiație intensă și deficit de apă. Aceleași efecte pot deveni însă mai puțin utile sau chiar limitative în perioadele cu radiație redusă, când lumina disponibilă culturii devine factorul dominant.

15.5.4. Răspunsul culturilor

La coacăzul roșu, producția a fost menținută sau îmbunătățită în variantele hortivoltaice, iar răspunsul fiziologic și spectral a susținut această evoluție. Indicele conținutului foliar de clorofilă și NDVI au delimitat clar plantele cultivate sub panouri de martor, indicând o stare mai favorabilă a aparatului foliar și a coronamentului. Raportul Fv/Fm a nuanțat diferența dintre cele două configurații: orientarea sudică a prezentat cea mai bună eficiență fotochimică, în timp ce varianta est-vest a avut avantajul mai clar în moderarea microclimatului și conservarea apei. Conductanța stomatală a rămas mai variabilă și nu a separat semnificativ variantele, reflectând mai ales răspunsul de moment al plantelor. Efectele asupra calității au fost mai puțin uniforme: masa fructelor a crescut în unele variante, în timp ce fermitatea s-a redus în anumite situații.

La asimina, răspunsul vegetativ și fenologic a fost diferit între genotipuri. Unele faze florale au fost ușor întârziate sub panou, dar legarea fructelor nu a fost întârziată în mod general. Creșterea vegetativă nu a urmat o direcție unică.

La majoritatea perechilor, planta neacoperită a fost ușor mai înaltă, dar au existat și răspunsuri inverse. Datele nu permit încă evaluarea unui efect stabil asupra producției, deoarece majoritatea pomilor utilizați în comparațiile directe nu ajunseseră la fructificare deplină.

La căpșun, răspunsul a fost dependent de an și soi. În 2024, la 'Sibilla', martorul a avut fructele cele mai grele și un conținut mai ridicat de substanță uscată solubilă. În 2025, la 'Murano', variantele acoperite au avut fructe mai grele decât martorul.

Varianta cu transparență redusă a favorizat masa fructelor, iar varianta mai transparentă a avut cea mai ridicată valoare a conținutului de substanță uscată solubilă și cel mai ridicat indice al conținutului foliar de clorofilă.

Aceste rezultate confirmă că o protecție microclimatică mai puternică nu determină automat cel mai favorabil răspuns pentru toți indicatorii agronomici.

15.5.5. Componenta energetică și economică

Dintre cele trei platforme, studiul de la coacăz dispune de cele mai complete date energetice și de o evaluare economică orientativă. Producția anuală de energie a fost de aproximativ 19.000 kWh, iar beneficiul energetic brut a fost estimat în condițiile ipotezelor de calcul utilizate. Evaluarea agregată a inclus și diferența de valoare a producției horticole.

La căpșun este cunoscută puterea instalată totală, de 9 kWp, precum și puterea nominală a celor două tipuri de module. Nu există însă serii energetice separate și complete pentru cele două niveluri de transparență.

La asimina sunt cunoscute caracteristicile panourilor și ale invertorului, dar raportul nu prezintă puterea instalată totală, producția anuală de energie, autoconsumul sau costurile sistemului.

În consecință, nu poate fi realizată o comparație economică directă între cele trei platforme.

Rezultatele permit doar identificarea mecanismelor prin care un sistem poate genera valoare:

- energie produsă și utilizată în exploatare;
- producție horticola menținută sau îmbunătățită;
- reducerea pierderilor provocate de stres;
- economii de apă;
- prelungirea perioadei de exploatare a plantației;
- menținerea funcției agricole a terenului.

15.5.6. Limitele comparabilității

Cele trei studii diferă prin specie, vârsta culturii, durata monitorizării, tipul panourilor, numărul de plante, indicatorii măsurați și disponibilitatea datelor energetice.

La asimina, numărul redus de plante din perechile martor–sub panou și stadiul juvenil limitează generalizarea rezultatelor productive.

La căpșun, schimbarea soiului între anii 2024 și 2025 împiedică interpretarea celor doi ani ca o serie multianuală omogenă. În plus, radiația fotosintetic activă nu a fost monitorizată simultan în toate variantele.

La coacăz, rezultatele provin dintr-o anumită plantație, cu un anumit soi, densitate și regim tehnologic. Transferul la alte soiuri sau amplasamente trebuie precedat de validare locală. Prin urmare, comparația trebuie utilizată pentru identificarea unor principii și mecanisme, nu pentru stabilirea unei configurații universal optime.

15.6. Lecții practice, limite și recomandări pentru proiectare

Studiile de caz prezentate arată că un sistem hortivoltaic poate avea un rol agronomic real, dar numai atunci când este proiectat pentru o problemă concretă a culturii. Panourile nu reprezintă, prin ele însele, o soluție. Ele devin utile atunci când modificarea luminii, temperaturii și apei răspunde unei nevoi biologice sau tehnologice clar definite.

15.6.1. Lecții practice rezultate din cele trei studii

Prima lecție este că proiectarea trebuie să pornească de la cultură, nu de la panou. Specia, soiul, vârsta plantelor, talia, forma de coroană, perioada de fructificare, sensibilitatea la stres și necesarul de lumină trebuie stabilite înaintea alegerii orientării, transparenței, densității sau înălțimii modulelor.

A doua lecție este că protecția mai puternică nu este automat mai bună.

La coacăz, configurația est-vest a produs cea mai amplă modificare a microclimatului și a fost compatibilă cu menținerea producției.

La căpșun, varianta cu umbră mai puternică a oferit cea mai bună protecție termică și hidrică, dar nu a avut cele mai bune valori pentru toți indicatorii calitativi.

La asimina, umbra locală foarte puternică poate fi utilă plantelor tinere, dar trebuie adaptată pe măsură ce pomii cresc și necesarul de lumină se modifică.

A treia lecție este că valorile instantanee ale luminii nu descriu complet sistemul. Evaluarea trebuie să urmărească deplasarea umbrei, alternanța dintre lumină și umbră și cantitatea de radiație acumulată pe parcursul zilei și sezonului.

A patra lecție este că datele de microclimat capătă sens numai atunci când sunt urmărite împreună cu răspunsul plantei. La coacăzul roșu, avantajele privind temperatura și conservarea apei s-au regăsit mai clar în CCM și NDVI, care au surprins starea acumulată a aparatului foliar și a coronamentului. Raportul Fv/Fm a adus informații asupra funcționării fotosistemului II, iar conductanța stomatală a reflectat reacțiile rapide, mai sensibile la condițiile din momentul măsurării. Asocierea acestor indicatori cu umiditatea solului și diagnoza foliară a permis o interpretare mai sigură a efectelor legate de lumină, apă și nutriție.

A cincea lecție este că solul și apa nu trebuie tratate ca elemente secundare. Panourile modifică evaporarea, temperatura solului și distribuția apei. Irigarea trebuie condusă pe baza senzorilor și nu redusă automat doar pentru că parcela este umbrată.

15.6.2. Ce nu poate fi încă generalizat

Tabelul 15.6.1 sintetizează principalele limite actuale ale rezultatelor și evidențiază nevoia de extindere a studiilor la nivel multianual, în condiții reale de explorare.

*Tabelul 15.6.1. Limite actuale ale cunoașterii în sistemele hortivoltaice
(sursa: elaborare proprie pe baza rezultatelor proiectului ADER 6.3.23)*

Domeniu	Limită / observație	Detalii
 Umbră	Nu poate fi stabilit un nivel universal optim de umbră pentru culturile horticole.	Răspunsul plantelor la umbră variază în funcție de specie, soi, fenologie și condițiile de mediu.
 Transparența panourilor	Nu poate fi recomandată o transparență unică pentru toate soiurile și toate regiunile.	Eficiența agronomică și energetică depinde de caracteristicile culturii și de contextul climatic și pedologic local.
 Economia de apă	Nu poate fi cuantificată încă economia de apă atribuită exclusiv panourilor în toate cele trei platforme.	Măsurătorile disponibile sunt incomplete și influențate de alți factori (precipitații, sol, irigații, management).
 Producția culturilor	Nu poate fi demonstrat un spor stabil de producție pentru toate culturile și toate configurațiile.	Rezultatele variază semnificativ între platforme, ani și combinații cultură-sistem.
 Transferul rezultatelor	Rezultatele obținute la plante tinere nu pot fi transferate automat la plantații mature.	Răspunsul pe termen lung poate fi diferit din cauza dezvoltării sistemului radicular, a microclimatului și a uzurii sistemelor.
 Performanța energetică și economică	Datele energetice și economice nu sunt suficient de complete pentru a compara rentabilitatea celor trei sisteme.	Lipsește date pe termen lung privind costurile, mentenanța, durata de viață și prețurile energiei/producției agricole.

Aceste limite nu reduc valoarea rezultatelor. Ele arată însă că recomandările comerciale trebuie formulate numai după validare multianuală și monitorizare locală.

15.6.3. Recomandări pentru proiectarea unui sistem hortivoltaic pilot

- Proiectarea structurii trebuie făcută pentru dimensiunea viitoare a culturii, nu numai pentru stadiul existent în momentul instalării.
- Înălțimea liberă și distanța dintre elementele de susținere trebuie să permită dezvoltarea plantei, accesul utilajelor, lucrările de întreținere și recoltarea.
- Orientarea panourilor trebuie corelată cu orele în care apare stresul maxim, nu stabilită exclusiv pentru maximizarea producției electrice.
- Transparența modulelor trebuie aleasă în funcție de radiația locală, perioada de fructificare și sensibilitatea culturii la deficitul de lumină.
- Pentru speciile care au nevoie de alternanță lumină–umbră poate fi preferabilă o acoperire discontinuă, în locul unui acoperiș fotovoltaic compact.
- Înainte de execuție trebuie simulată traiectoria umbrei în mai multe momente ale zilei și în lunile critice ale sezonului.
- Trebuie păstrate zone martor comparabile, cu același soi, aceeași vârstă și aceeași tehnologie de cultură.
- Producția agricolă și producția energetică trebuie monitorizate separat înainte de calcularea beneficiului agregat.

15.6.4. Setul minim de monitorizare recomandat

Pentru un lot pilot cu culturi perene se recomandă un nucleu minim format din senzori de radiație și microclimat, umiditatea solului, diagnoză foliară și cel puțin doi indicatori ai plantei, unul care să surprindă evoluția acumulată a aparatului foliar, precum CCM sau NDVI, și unul sensibil la funcționarea fiziologică, precum Fv/Fm ori conductanța stomatală.

Tabelul 15.6.2. Setul minim de indicatori pentru evaluarea unui sistem hortivoltaic pilot (sursa: elaborare proprie pe baza rezultatelor proiectului ADER 6.3.23 și a literaturii de specialitate citate în text)

Domeniu	Indicatori minimi	Observații
 Lumină	radiație globală, PAR, distribuția umbrei	măsurători în mai multe momente ale zilei și poziții
 Aer	temperatură, umiditate relativă, deficit de presiune a vaporilor	simultan în martor și sub panouri
 Sol	temperatură și umiditate la minimum două adâncimi	inclusiv în zona de margine a panourilor
 Fenologie	pornirea în vegetație, înflorirea, legarea și maturarea	aceleași plante urmărite anual
 Creștere	înălțime, diametru, lăstari, suprafață foliară	adaptate tipului de cultură
 Stare fiziologică	indice de clorofilă, pigmenți și, unde este posibil, schimburi gazoase	corelate cu lumina și apa
 Producție	producție totală și comercializabilă	pe plantă, parcelă și unitate de suprafață
 Calitate	masă, fermitate, conținut de substanță uscată solubilă, aciditate și culoare	adaptate speciei și destinației comerciale
 Sol și nutriție	reacția solului, materie organică, elemente nutritive și diagnoză foliară	probe inițiale și repetate în aceleași puncte
 Energie	putere instalată, producție lunară și anuală, autoconsum	separat pe configurații, unde este posibil
 Economie	investiție, mentenanță, valoarea producției și energiei, amortizare	scenarii prudente și transparente

15.6.5. Concluzia generală a capitolului

Cele trei studii arată că sistemele hortivoltaice pot contribui la reducerea stresului termic și radiativ, la conservarea apei și la producerea energiei pe terenuri care își păstrează funcția agricolă. Efectele nu sunt însă uniforme. Ele depind de cultura analizată, de configurația panourilor, de climat, de soi, de vârsta plantelor și de stadiul de dezvoltare.

Coacăzul roșu a evidențiat importanța orientării panourilor și posibilitatea integrării performanței agronomice cu cea energetică. Asimina a arătat utilitatea unei protecții parțiale pentru plantele tinere și necesitatea adaptării gradului de umbrire pe măsura dezvoltării pomilor. Căpșunul a demonstrat că transparența modulelor controlează compromisul dintre protecția microclimatică și lumina necesară producției și calității.

Concluzia comună este că nu există o configurație universală. Proiectarea trebuie realizată ca proces agronomic și energetic integrat, urmat de monitorizare multianuală și ajustare pe baza răspunsului real al culturii.

Valoarea unui sistem hortivoltaic apare atunci când energia, cultura, apa, solul și microclimatul sunt tratate ca părți ale aceluiași sistem.

Capitolul 16.

Perspective și inovații

16.1. Factori care susțin dezvoltarea sistemelor hortivoltaice

Sistemele hortivoltaice devin tot mai importante într-un moment în care horticultura este presată simultan de schimbările climatice, de creșterea costurilor energetice și de nevoia de modernizare tehnologică a exploatațiilor horticole. Temperaturile extreme, radiația excesivă, deficitul hidric, variabilitatea precipitațiilor și frecvența fenomenelor meteorologice severe afectează stabilitatea producției și calitatea fructelor, în special în culturile intensive și perene.

În același timp, exploatațiile horticole depind tot mai mult de energie. Irigarea, fertirigarea, răcirea, depozitarea, sortarea, monitorizarea și automatizarea au devenit componente obișnuite ale tehnologiei moderne. Din această perspectivă, SHV nu trebuie privite doar ca sisteme de producere a energiei, ci și ca infrastructuri al căror rol este să combine producția de energie fotovoltaică, protecția microclimatică și utilizarea mai eficientă a terenului (Dupraz și colab., 2011; Weselek și colab., 2019; Fraunhofer ISE, 2022).

Dirjecțiile actuale de dezvoltare urmăresc o integrare mai fină între cultură și infrastructura energetică. Cele mai importante sunt panourile semitransparente sau cu transmisie spectrală selectivă, sistemele adaptive, senzorii și controlul digital, precum și integrarea cu irigarea, stocarea energiei și managementul consumurilor. Aceste direcții pot crește flexibilitatea SHV, dar nu elimină necesitatea proiectării locale și a validării prin date (Gorjian și colab., 2022; Lu și colab., 2024; Zotti și colab., 2024; IEA PVPS, 2025a).

16.2. De la panouri fixe la sisteme adaptive

Primele sisteme agrivoltaice utilizau predominant panouri fixe amplasate deasupra culturilor. Aceste configurații au demonstrat că utilizarea duală a terenului este posibilă, dar au evidențiat și una dintre limitele sistemelor statice: menținerea aceleiași intensități a umbririi nu este favorabilă culturii pe întreaga perioadă de vegetație (Dupraz și colab., 2011; Weselek și colab., 2019). Tabelul 16.1 sintetizează diferențele dintre sistemele hortivoltaice fixe și cele adaptative.

Tabelul 16.1 – Diferențe dintre sistemele hortivoltaice fixe și sistemele adaptive (sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

Aspect	Sistem fix	Sistem adaptiv
1. Poziția panourilor	Constantă pe parcursul exploatării	Ajustabilă în funcție de condițiile culturii și ale mediului
2. Nivelul de umbrire	Relativ constant	Variabil și controlabil
3. Adaptarea la fenofaze	Limitată	Posibilă
4. Adaptarea la valuri de căldură	Redusă	Ridică
5. Gestionarea riscului de arsură solară	Pasivă	Activă
6. Flexibilitatea managementului luminii	Redusă	Ridică
7. Complexitate tehnică	Mai redusă	Mai ridicată
8. Cost investițional	Mai redus	Mai ridicat
9. Potențial de optimizare agro-energetică	Limitat	Ridicat



Mesaj-cheie

Sistemele adaptive marchează trecerea de la o logică statică, orientată mai ales spre producția energetică, la o logică de reglare dinamică, în care umbrirea poate fi ajustată pentru a proteja cultura și a menține un echilibru mai bun între lumină, microclimat și producția de energie.

În horticultură, necesarul de lumină nu este constant. El se schimbă între specii, soiuri, fenofaze și anotimpuri. În anumite perioade, cultura are nevoie de lumină ridicată pentru fotosinteză, colorare, maturare sau diferențierea mugurilor de rod. În alte perioade, reducerea temporară a radiației poate limita supraîncălzirea fructelor și stresul hidric. Din acest motiv, una dintre cele mai importante direcții de dezvoltare este reprezentată de sistemele adaptive sau dinamice.

În aceste sisteme, poziția panourilor poate fi ajustată în funcție de radiație, temperatură, necesarul energetic sau starea culturii. Această abordare permite reducerea umbririi atunci când planta are nevoie de lumină și creșterea protecției în timpul valurilor de căldură. Studii recente la măr au arătat că sistemele agrivoltaice dinamice pot reduce temperatura suprafeței fructelor și riscul de arsuri solare atunci când panourile sunt folosite pentru umbrire în intervalele de radiație și temperatură ridicată (Lopez și colab., 2025).

Această tranziție mută accentul de la logica exclusiv energetică spre optimizarea simultană a producției horticole și a producției de energie. În perspectivă, sistemele adaptive vor integra monitorizare climatică, modele predictive și algoritmi de control.

Criteriile posibile pentru controlul adaptiv includ radiația solară, temperatura aerului, temperatura fructelor, starea hidrică a culturii, fenofaza, prognoza meteorologică și necesarul energetic al exploatației pomicole (figura 16.1; Toledo și Scognamiglio, 2021; Weselek și colab., 2019).

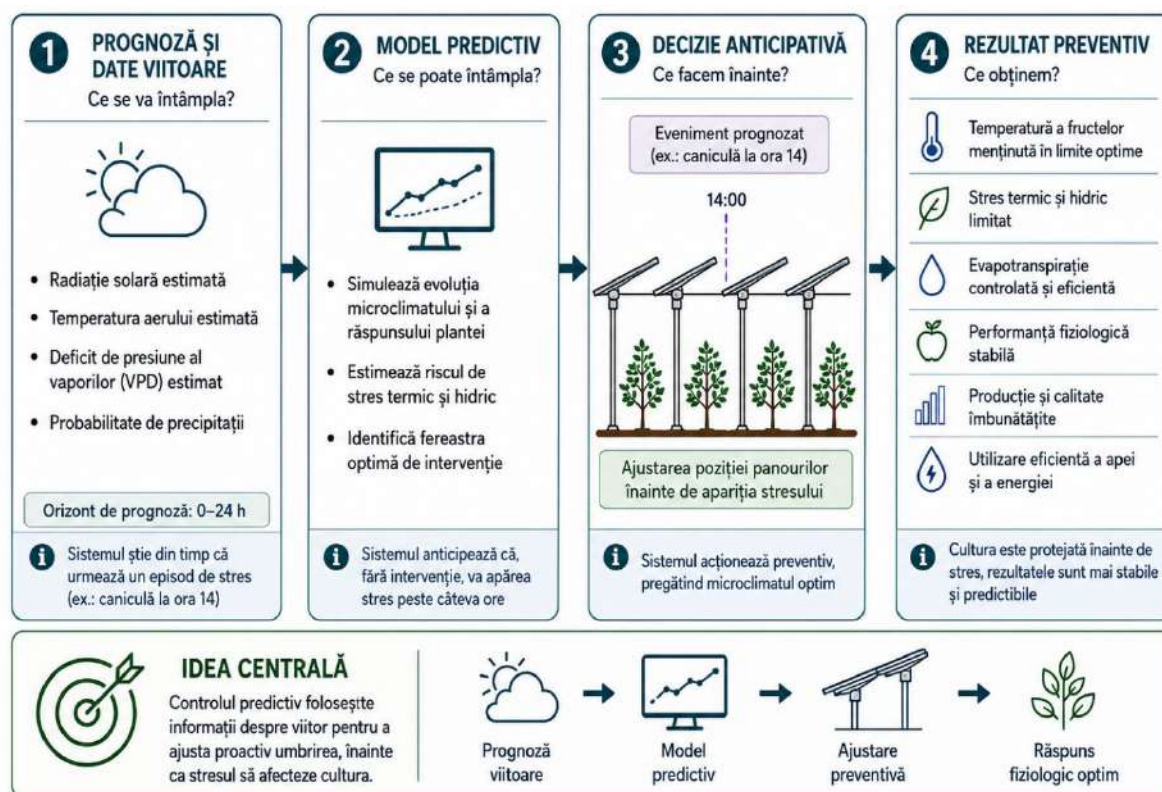


Figura 16.1 – Conceptul de control predictiv în SHV
(sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

16.3. Digitalizare, senzori și automatizare

Pe măsură ce sistemele hortivoltaice devin mai complexe, monitorizarea nu mai poate fi tratată ca un element secundar. Ea devine parte din funcționarea propriu-zisă a sistemului, deoarece permite urmărirea simultană a luminii, temperaturii, apei, producției energetice și răspunsului culturii. Un SHV modern trebuie să coreleze aceste componente, nu să le analizeze separat (Weselek și colab., 2019; IEA PVPS, 2025a).

În practică, aceeași configurație poate avea efecte diferite de la un sezon la altul. O reducere a radiației poate fi utilă în perioadele foarte calde, dar poate deveni limitativă atunci când lumina este deja redusă. La fel, o umiditate mai mare a solului poate diminua stresul hidric, însă poate necesita ajustarea irigației și o supraveghere mai atentă a stării fitosanitare. Fără date, astfel de diferențe sunt greu de separat de variația naturală a culturii.

Platformele experimentale utilizează tot mai frecvent stații meteorologice integrate, senzori pentru temperatura și umiditatea solului, senzori de radiație, camere multispectrale și sisteme automate de înregistrare. Informațiile colectate pot indica apariția stresului hidric, distribuția neuniformă a luminii, supraîncălzirea locală a frunzelor sau fructelor și diferențele dintre zonele acoperite și cele neacoperite. Pe această bază pot fi ajustate irigarea, momentul intervențiilor tehnologice și modul de utilizare a energiei produse (Weselek și colab., 2019; Fraunhofer ISE, 2022).

Nu toate datele trebuie însă colectate cu aceeași frecvență. Parametrii climatici și energetici pot fi înregistrați continuu, în timp ce evaluarea stării plantelor, a producției și a calității fructelor se realizează în momente relevante ale ciclului de cultură. Importantă este corelarea lor, astfel încât modificările microclimatului să poată fi legate de răspunsul agronomic observat.

Automatizarea intră treptat și în managementul SHV. Unele platforme testează ajustarea poziției panourilor, programarea irigației în funcție de umiditatea solului și controlul consumurilor energetice în raport cu producția fotovoltaică. Pentru culturile perene, această direcție este deosebit de utilă, deoarece efectele stresului pot deveni vizibile târziu, când posibilitățile de corecție sunt deja limitate.

Monitorizarea nu trebuie să însemne neapărat o infrastructură digitală costisitoare. Chiar și un sistem de dimensiuni reduse poate porni de la un set minim de date: temperatura și umiditatea aerului, umiditatea solului, radiația disponibilă culturii, producția agricolă și energia electrică generată.

Recomandare practică. Sistemele de dimensiuni reduse ar trebui proiectate astfel încât să permită instalarea ulterioară a senzorilor și extinderea treptată a monitorizării. Nu toate livezile au nevoie de automatizare completă, dar orice proiect SHV ar trebui să ofere posibilitatea colectării unor date de bază despre microclimat, sol, cultură și producția energetică. Fără aceste informații, evaluarea performanței rămâne incompletă, iar eventualele probleme sunt identificate mai greu și, de multe ori, prea târziu.

16.4. Tehnologii fotovoltaice adaptate cerințelor culturilor horticole

O direcție importantă de dezvoltare este trecerea de la module fotovoltaice standard, opace, la soluții mai bine adaptate cerințelor horticulurii.

Primele sisteme agrivoltaice și hortivoltaice au utilizat în principal module proiectate pentru producția energetică, nu pentru interacțiunea directă cu o cultură. În aceste configurații, plantele primesc lumina rămasă după interceptarea radiației de către panouri, iar compatibilitatea cu sistemul de cultură depinde de densitatea modulelor, orientare, înălțimea structurii și distribuția umbrei (Weselek și colab., 2019; Gorjian și colab., 2022).

În horticulură, această abordare poate fi limitativă. Plantele nu răspund doar la cantitatea totală de lumină, ci și la distribuția luminii în coronament, la momentul umbririi, la temperatura frunzelor și fructelor și la efectul asupra calității producției. De aceea, noile direcții tehnologice urmăresc un control mai fin al luminii transmise către cultură, prin panouri semitransparente, module cu transmisie spectrală selectivă, module bifaciale, configurații verticale, filme fotovoltaice organice și materiale fotovoltaice flexibile.

Panourile semitransparente reprezintă una dintre cele mai relevante direcții pentru horticulură, deoarece permit transmiterea controlată a unei părți din radiația solară către cultură. Comparativ cu modulele opace, acestea pot reduce riscul de umbrire excesivă și pot susține o distribuție mai echilibrată a luminii în zona productivă a plantelor. Totuși, transparența presupune un compromis: cu cât trece mai multă lumină către cultură, cu atât producția energetică pe unitatea de

suprafață poate scădea. De aceea, gradul optim de transparență trebuie corelat cu specia, soiul, fenofaza, forma de coroană, climatul local și obiectivul sistemului (figura 16.2; Gorjian și colab., 2022; Song și colab., 2023).

Alegerea nivelului de transparență este critică. Deficitul de lumină poate afecta fotosinteza, diferențierea mugurilor de rod, acumularea zaharurilor, colorarea fructelor și uniformitatea maturării. În același timp, transmiterea unei cantități prea mari de radiație directă poate reduce efectul protector al sistemului în perioadele cu arșiță și stres radiativ. Optimizarea panourilor semitransparente nu înseamnă, așadar, maximizarea transparenței, ci stabilirea unui nivel de transmitere a luminii compatibil cu performanța culturii și cu obiectivul energetic al exploatației horticole.

O altă direcție importantă este reprezentată de panourile cu transmisie spectrală selectivă. Aceste tehnologii urmăresc utilizarea diferențiată a spectrului solar, astfel încât o parte a radiației să fie folosită pentru producerea energiei, iar o parte să rămână disponibilă pentru procesele fiziologice ale plantelor. Conceptul este promițător, dar trebuie tratat prudent: calitatea luminii influențează nu doar fotosinteza, ci și creșterea vegetativă, morfogeneza, înflorirea, maturarea, colorarea fructelor și acumularea unor compuși de calitate. Prin urmare, selectivitatea spectrală trebuie evaluată pentru fiecare cultură și climat, nu presupusă ca avantaj general (Lu și colab., 2024; Zotti și colab., 2024).

Principii de funcționare, tipuri de soluții și implicații horticole

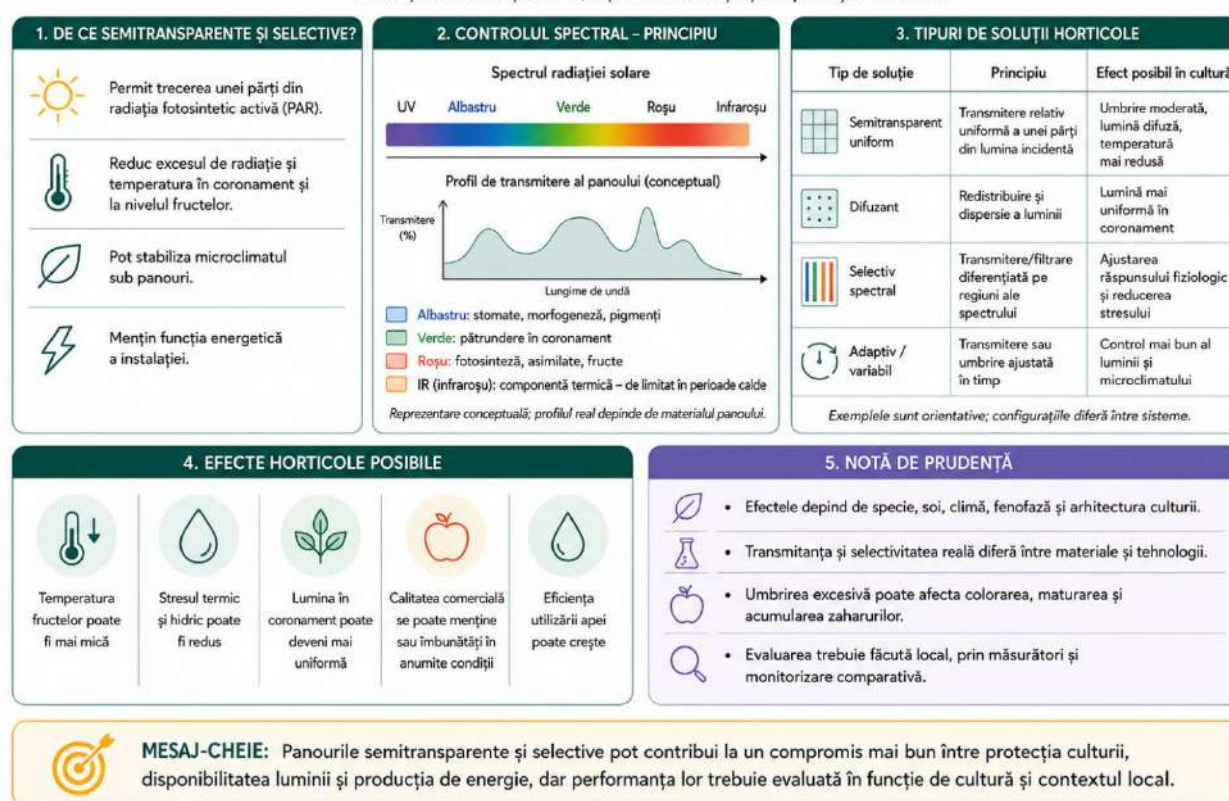


Figura 16.2 – Panouri semitransparente și selective spectral pentru horticultură
(sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

Panourile bifaciale și configurațiile verticale pot fi utile în anumite sisteme, deoarece valorifică radiația reflectată sau difuză și pot reduce suprafața aflată în umbră continuă. Aceste soluții pot facilita accesul pentru lucrări horticole și pot diminua conflictul direct dintre panouri și cultură, dar nu sunt potrivite pentru orice specie sau amplasament. Performanța lor depinde de orientare, distanțare, reflectanța suprafeței, regimul vântului, sistemul de cultură și profilul energetic urmărit (Guerrero-Lemus și colab., 2016; Riaz și colab., 2019).

Panourile organice, filmele fotovoltaice flexibile și alte tehnologii ușoare pot oferi, în viitor, soluții mai adaptabile pentru sere, solarii, culturi joase sau structuri unde greutatea și rigiditatea

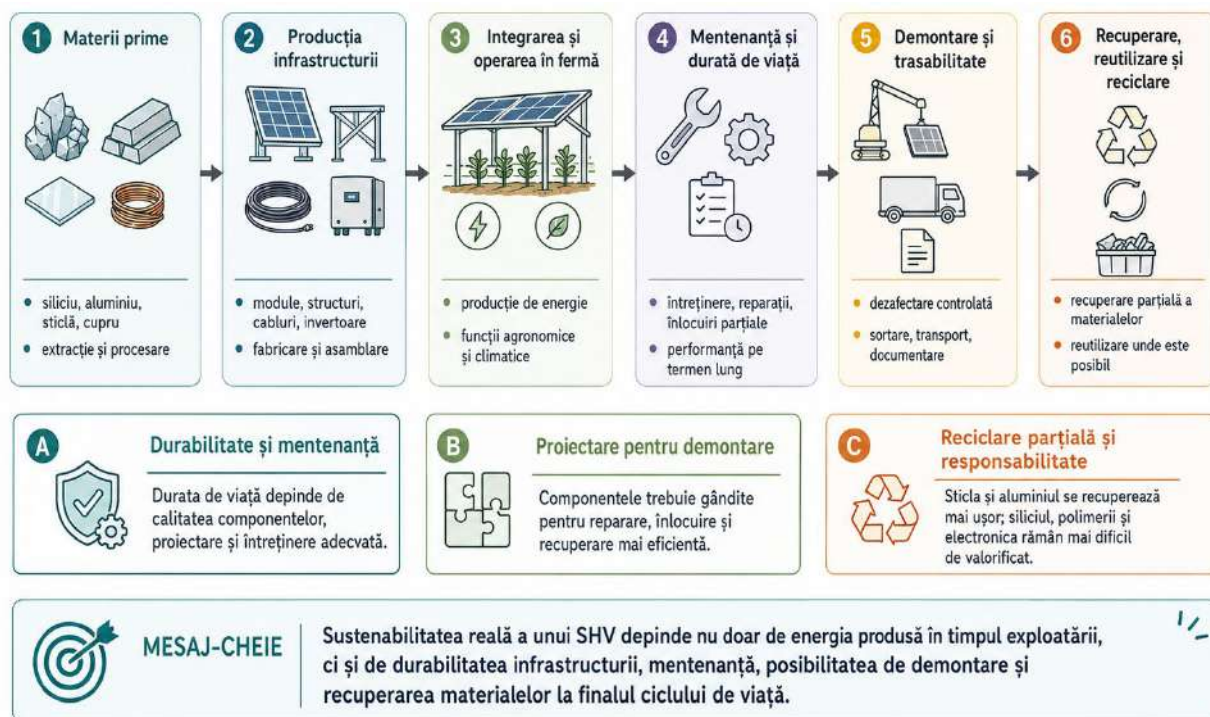
modulelor convenționale reprezintă o limitare. Ele pot permite integrarea fotovoltaică în materiale de acoperire sau în structuri horticole cu cerințe constructive mai reduse. Totuși, aceste soluții trebuie privite ca tehnologii aflate încă în dezvoltare, deoarece performanța energetică, durabilitatea, stabilitatea în timp, costul și comportamentul în condiții reale de exploatare trebuie validate înainte de aplicarea pe scară largă (Song și colab., 2023).

O direcție complementară este dezvoltarea structurilor cu permeabilitate mai ridicată pentru lumină și apă. În sistemele horticole, nu doar nivelul mediu de umbră este important, ci și distribuția spațială a luminii și a apei.

Dacă panourile concentrează scurgerea apei sau creează zone foarte diferite de umiditate, pot apărea efecte asupra solului, rădăcinilor, riscului fitosanitar și uniformității culturii. De aceea, panourile și structurile viitoare trebuie gândite nu doar ca suprafețe de captare a energiei, ci ca elemente care influențează întregul microclimat al culturii.

Pe măsură ce sistemele hortivoltaice se extind, durabilitatea materialelor și reciclarea infrastructurii fotovoltaice devin componente esențiale ale sustenabilității reale.

Panourile, structurile metalice, cablurile, invertoarele, bateriile și echipamentele de control au durate de viață diferite și vor necesita, în timp, întreținere, înlocuire, demontare, reutilizare sau reciclare. Un SHV nu poate fi considerat sustenabil doar prin energia produsă în timpul exploatarei; trebuie analizat și modul în care materialele sunt gestionate pe întreg ciclul de viață (figura 16.3; IEA PVPS, 2021; IEA PVPS, 2025b).



Notă: Ratele reale de recuperare depind de tehnologie, calitatea materialelor, infrastructura de colectare și cadrul de reglementare.

Figura 16.3 – Ciclul de viață și reciclarea infrastructurii hortivoltaice
 (sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

În perspectivă, panourile horticole de nouă generație pot contribui la dezvoltarea unor sisteme hortivoltaice mai fine și mai adaptabile.

Valoarea lor va depinde de capacitatea de a menține simultan producția de energie, disponibilitatea luminii pentru cultură, calitatea producției, stabilitatea microclimatului și sustenabilitatea materialelor utilizate. Pentru horticultură, criteriul decisiv nu va fi doar eficiența modulului fotovoltaic, ci compatibilitatea dintre modul, specie, climat, sistem de cultură, managementul apei și obiectivul exploatarei horticole.

16.5. Exploatația hortivoltaică a viitorului

Direcția actuală de dezvoltare sugerează că SHV vor evolua treptat de la structuri energetice amplasate în culturi la platforme integrate de management horticola și energetic (Weselek și colab., 2019; Fraunhofer ISE, 2022; Toledo și Scognamiglio, 2021). Într-un astfel de sistem, panourile nu au doar rolul de a produce energie, ci pot contribui la controlul luminii, moderarea microclimatului, utilizarea mai eficientă a apei și susținerea deciziilor de management. Exploatația hortivoltaică a viitorului va integra producția horticola, producția de energie, monitorizarea microclimatică, managementul apei, analiza datelor și, acolo unde este justificat, controlul adaptiv al infrastructurii. Această integrare poate permite corelarea poziției panourilor, a irigației, a consumului energetic și a lucrărilor horticole cu starea reală a culturii și cu condițiile climatice locale.

Totuși, această imagine trebuie privită ca o direcție de dezvoltare, nu ca model universal. Nu toate exploatațiile horticole au nevoie de sisteme complet automatizate, iar complexitatea tehnică trebuie justificată prin valoarea culturii, riscul climatic, consumul energetic, disponibilitatea apei și capacitatea de operare și mentenanță. În multe situații, o soluție simplă, bine proiectată și monitorizată corect poate fi mai potrivită decât o infrastructură avansată, dar dificil de gestionat.

Exploatația hortivoltaică a viitorului nu trebuie înțeleasă ca o simplă acumulare de tehnologii. Ea devine relevantă atunci când energia, cultura, apa, microclimatul și datele sunt integrate pentru a susține decizii mai bune. Valoarea acestei integrări depinde de capacitatea de a transforma tehnologia în stabilitate productivă, eficiență a resurselor și adaptare reală la condițiile locale.

16.6. Perspective pentru horticultura din România

În România, dezvoltarea sistemelor hortivoltaice trebuie realizată gradual, prin proiecte-pilot, monitorizare locală și adaptare la specificul culturilor horticole. Numeroase regiuni sunt deja expuse la temperaturi ridicate, deficit hidric, radiație excesivă, înghețuri târzii sau instabilitate a precipitațiilor, iar aceste riscuri pot afecta atât producția, cât și calitatea fructelor.

Modelele dezvoltate în alte țări nu pot fi transferate direct fără verificare locală. Răspunsul culturilor depinde de climat, specie, soi, forma de coroană, sistemul de cultură, disponibilitatea apei și obiectivele economice ale exploatației. Din acest motiv, proiectele demonstrative realizate în condiții pedoclimatice locale sunt esențiale pentru stabilirea unor soluții adaptate horticulturii românești. Pentru exploatațiile horticole, beneficiul SHV poate depăși producția de energie. În funcție de cultură și amplasament, sistemele pot contribui la reducerea pierderilor provocate de evenimente climatice, stabilizarea producției, creșterea autonomiei energetice, utilizarea mai eficientă a apei și modernizarea infrastructurii de monitorizare și management.

În România, sistemele hortivoltaice ar putea avea un rol în modernizarea anumitor exploatații horticole intensive, în special în situațiile în care producerea energiei, irigarea, monitorizarea climatică și managementul digital sunt integrate în aceeași strategie de exploatare. Dezvoltarea acestor sisteme va depinde nu numai de performanța componentelor fotovoltaice, ci și de modul în care acestea sunt corelate cu cerințele culturii, condițiile climatice, disponibilitatea apei și organizarea tehnologică a fermei.

Evoluțiile actuale sugerează un interes crescut pentru soluții adaptive, monitorizate și integrate în managementul horticola. Totuși, aplicabilitatea lor nu poate fi generalizată, deoarece configurația optimă diferă în funcție de specie, climat, sistem de cultură, resursele de apă și obiectivele exploatației.

Evaluarea sistemelor hortivoltaice trebuie să depășească indicatorii energetici și să includă efectele asupra producției horticole, utilizării resurselor, reducerii riscurilor climatice și eficienței economice. În acest sens, ele pot fi analizate ca infrastructuri agro-energetice integrate, a căror utilitate trebuie demonstrată prin performanțe agronomice, energetice, economice și de mediu, și nu presupusă doar pe baza producerii de energie.

Casetă practică – Avertizări esențiale înaintea implementării unui sistem hortivoltaic (sursa: elaborare proprie pe baza literaturii de specialitate citate în text)

DOMENIU CRITIC	AVERTIZARE ESENȚIALĂ		DE CE CONTEAZĂ
 1. Cultura și producția	Sistemul se proiectează pornind de la cultură, nu de la panouri.		Sistemele orientate doar energetic pot compromite funcția horticolă.
 2. Lumină și umbră	Umbrirea moderată poate ajuta, dar umbrirea excesivă poate reduce producția și calitatea.		Excesul de umbră poate afecta colorarea, maturarea și acumularea zaharurilor.
 3. Alternativa energetică	Dacă obiectivul principal este doar energia, trebuie analizate mai întâi alternativele mai simple.		Panourile pe hale, bazine sau terenuri neproductive pot fi mai potrivite.
 4. Mecanizare și acces tehnologic	Structura trebuie să permită mecanizarea, tratamentele și recoltarea.		Fără acces tehnologic, sistemul devine dificil de exploatat.
 5. Racordare și reglementări	Racordarea, regimul terenului și autorizațiile trebuie verificate înainte de proiectarea finală.		Condițiile administrative și tehnice pot limita sau bloca proiectul.
 6. Sol, drenaj și apă	Solul, drenajul și distribuția apei trebuie analizate înainte de instalare.		Panourile pot conserva apa, dar pot crea și exces local, bălțire sau compactare.
 7. Monitorizare și date	Fără monitorizare locală și variantă martor, efectele SHV nu pot fi interpretate corect.		Doar datele locale comparate cu martorul permit interpretare corectă.
 8. Mentenanță și economie circulară	Mentenanța, demontarea și reciclarea trebuie prevăzute încă din faza de proiectare.		Durata de viață și sustenabilitatea reală depind de gestionarea întregului ciclu de viață.


MESAJ-CHEIE: Un SHV eficient nu este doar un sistem care produce energie, ci unul care rămâne compatibil cu cultura, funcționarea fermei și resursele pe termen lung.

Anexă – Instrumente practice pentru evaluarea și implementarea unui SHV

Instrumentele practice din anexe au fost elaborate de autori pe baza literaturii de specialitate analizate și a experienței acumulate în cadrul proiectului ADER 6.3.23.



Fișă de evaluare preliminară – Este potrivit un sistem hortivoltaic pentru ferma mea?

Această fișă nu înlocuiește studiul de fezabilitate, proiectarea tehnică, analiza juridică sau evaluarea economică. Rolul ei este de a ajuta fermierul să stabilească dacă există suficiente argumente pentru continuarea analizei, realizarea unui studiu de specialitate sau organizarea unui lot-pilot. Pentru fiecare criteriu se bifează una dintre variantele: DA, PARȚIAL/NECLAR sau NU. Răspunsurile negative la criteriile esențiale trebuie clarificate înainte de continuarea investiției.



A1. Nevoia reală a exploatației

	DA	PARȚIAL / NECLAR	NU
1. Cultura este afectată frecvent de temperaturi ridicate, arșiță, arsuri solare sau deficit hidric?	☐	☐	☐
2. Ferma are un consum important de energie pentru irigare, fertilizare, răcire, depozitare, sortare sau automatizare?	☐	☐	☐
3. Costul energiei influențează semnificativ rentabilitatea exploatației?	☐	☐	☐
4. Există perioade în care protecția parțială a culturii față de radiația directă ar putea aduce beneficii?	☐	☐	☐



A2. Compatibilitatea culturii

	DA	PARȚIAL / NECLAR	NU
5. Sunt cunoscute cerințele speciei și solului față de lumină?	☐	☐	☐
6. Cultura poate tolera o reducere moderată și temporară a radiației?	☐	☐	☐
7. Perioadele critice pentru înflorire, fructificare, acumularea zaharurilor și colorare sunt cunoscute?	☐	☐	☐
8. Există posibilitatea adaptării gradului de umbră la cerințele culturii?	☐	☐	☐
9. Durata rămasă de exploatare a plantației justifică integrarea unei infrastructuri cu durată mare de viață?	☐	☐	☐



Atenție

Un răspuns «NU» la întrebările 5–8 indică necesitatea unui lot-pilot sau a unei evaluări biologice suplimentare înainte de investiția la scară comercială.



A3. Compatibilitatea amplasamentului și a tehnologiei de cultură

	DA	PARȚIAL / NECLAR	NU
10. Amplasamentul are suficientă radiație solară pentru producerea de energie și menținerea funcției horticole?	☐	☐	☐
11. Orientarea parcelei, panta și geometria rândurilor permit amplasarea unei structuri adecvate?	☐	☐	☐
12. Structura poate fi proiectată fără să împiedice tăierile, tratamentele, recoltarea și întreținerea solului?	☐	☐	☐
13. Înălțimea și distanțarea stâlpilor permit accesul utilajelor existente?	☐	☐	☐
14. Poate fi controlată evacuarea și redistribuirea apei de ploaie de pe panouri?	☐	☐	☐
15. Ventilația culturii poate fi menținută la un nivel care să nu favorizeze bolile?	☐	☐	☐



A4. Energie și utilizarea producției electrice

	DA	PARȚIAL / NECLAR	NU
16. Este cunoscut consumul anual și sezonier de energie al fermei?	☐	☐	☐
17. Există consumatori care funcționează în perioadele cu producție fotovoltaică ridicată?	☐	☐	☐
18. Energia produsă poate fi autoconsumată, stocată sau valorificată în condiții economice și juridice clare?	☐	☐	☐
19. Puterea instalată poate fi dimensionată după necesarul fermei, nu numai după suprafața disponibilă?	☐	☐	☐



Semnal de avertizare

Dacă nu există un profil de consum și o modalitate realistă de utilizare a energiei, beneficiul economic al sistemului poate fi supraestimat.



A5. Fezabilitate economică, juridică și operațională

	DA	PARTIAL / NECLAR	NU
20. Situația juridică a terenului permite realizarea investiției pe durata de funcționare estimată?	☐	☐	☐
21. Au fost analizate condițiile de autorizare, racordare și menținere a funcției agricole?	☐	☐	☐
22. Ferma poate suporta investiția, costurile de mentenanță și eventualele reparații?	☐	☐	☐
23. Analiza economică include scenarii prudent, realist și favorabil?	☐	☐	☐
24. Au fost incluse eventualele efecte asupra producției, calității fructelor și lucrărilor tehnologice?	☐	☐	☐
25. Există personal, furnizori sau servicii specializate pentru operare și mentenanță?	☐	☐	☐



A6. Posibilitatea testării și monitorizării

	DA	PARTIAL / NECLAR	NU
26. Poate fi realizat inițial un lot-pilot sau o implementare etapizată?	☐	☐	☐
27. Poate fi păstrată o variantă comparabilă neacoperită?	☐	☐	☐
28. Pot fi monitorizate lumina, temperatura, umiditatea aerului și a solului?	☐	☐	☐
29. Pot fi evaluate producția, calitatea fructelor, consumul de apă și producția de energie?	☐	☐	☐
30. Există posibilitatea evaluării rezultatelor pe cel puțin două sezoane contrastante?	☐	☐	☐

Concluzia preliminară a exploatației

- ☐ Se recomandă continuarea evaluării și inițierea studiilor tehnice.
- ☐ Se recomandă realizarea unui lot-pilot înaintea investiției extinse.
- ☐ Sunt necesare informații și măsurători suplimentare.
- ☐ Sistemul nu este recomandat în condițiile actuale.

Principalele aspecte care trebuie clarificate:

Data evaluării: _____

Exploatarea / amplasamentul: _____

Persoana care a completat fișa: _____

Specialiști consultați: _____

Interpretarea fișei:



Favorabil pentru continuarea evaluării

Situația este favorabilă atunci când:

- majoritatea răspunsurilor sunt «DA»;
- există o nevoie agronomică sau energetică bine definită;
- cultura este compatibilă cu o reducere controlată a luminii;
- lucrările tehnologice pot fi menținute;
- energia poate fi utilizată în fermă;
- este posibilă monitorizarea sistemului.



Pasul următor recomandat: studiu de amplasament, simulare de umbră, analiză energetică și economică și elaborarea temei de proiectare.



Necesită lot-pilot sau clarificări suplimentare

Situația necesită prudență atunci când există mai multe răspunsuri «PARTIAL/NECLAR», în special privind:

- sensibilitatea culturii la umbră;
- distribuția luminii;
- ventilația;
- evacuarea apei;
- compatibilitatea cu utilajele;
- consumul și valorificarea energiei.



Pasul următor recomandat: măsurători preliminare, modelare, consultarea specialiștilor și testare pe o suprafață limitată.



Nerecomandat în forma actuală

Investiția nu trebuie continuată fără reproiectare dacă:

- funcția agricolă nu poate fi menținută;
- structura împiedică lucrările tehnologice;
- cultura este puternic dependentă de lumină, iar umbră nu poate fi controlată;
- nu există o utilizare realistă a energiei;
- situația juridică este neclară;
- nu pot fi evaluate efectele asupra culturii;
- rentabilitatea depinde exclusiv de ipoteze optimiste.



Fișa oferă o orientare preliminară și nu înlocuiește studiul de fezabilitate, proiectarea tehnică și evaluarea economică detaliată.

Fișă rapidă de siguranță pentru lucrul în apropierea sistemului hortivoltaic

Această fișă completează subcapitolul 6.11 și se adresează cultivatorului. Ea nu înlocuiește instrucțiunile operatorului sistemului, procedurile de securitate sau intervențiile personalului autorizat. Regula de bază rămâne aceeași: **cultivatorul întreține cultura, nu instalația fotovoltaică.**

Ce poate face cultivatorul

Situație	Ce este permis	Echipament recomandat	Limită de siguranță
1. Observă panouri murdare, fisurate sau umbrite accidental	Notează situația și o semnalează operatorului	Încălțăminte stabilă; cască dacă intră sub structură	Nu atinge panourile și nu urcă pe structură.
2. Observă cabluri desprinse, cutii deschise, conectori expuși	Oprește lucrările în apropiere și anunță operatorul/firma autorizată	nu se apropie de zona periculoasă	Nu ridică, nu mută și nu repară cablurile.
3. Cosește iarba în zona de acces	Poate cosi cu prudență	Încălțăminte de protecție, mănuși, ochelari, îmbrăcăminte strânsă pe corp	Nu cosește peste cabluri; dacă apar cabluri joase/desprinse, lucrarea se oprește.
4. Îndepărtează vegetația din apropierea structurii	Intervine numai asupra vegetației care nu atinge instalația	mănuși, încălțăminte de protecție, ochelari la tăiere	Nu trage lăstari, sârme sau materiale agățate de cabluri ori module.
5. Execută tăieri, legări sau recoltare sub structură	Poate lucra agronomic	mănuși, încălțăminte stabilă; cască unde există risc de lovire	Unelte, sârmele, lăstarii și lăzile nu ating componentele PV.
6. Irigă sau fertiligă cultura	Poate executa lucrarea normal	Încălțăminte antiderapantă, mănuși după caz	Jetul de apă nu se direcționează spre panouri, cabluri, tablouri sau invertor.
7. Aplică tratamente fitosanitare	Poate executa tratamentul conform tehnologiei culturii	echipamentul indicat de eticheta produsului	Nu pulverizează direct pe invertor, tablouri, cabluri sau conectori.
8. Observă un senzor acoperit, lovit sau căzut	Semnalează echipei responsabile de monitorizare	echipament obișnuit de lucru în câmp	Nu mută senzorul fără acordul echipei tehnice.

Instrument practic pentru cultivatori – utilizare informativă; intervențiile tehnice aparțin personalului autorizat.

Ce nu trebuie să facă niciodată cultivatorul

Activitate	De ce este interzisă
1. Curățarea panourilor	Poate implica lucru la înălțime, risc electric, alunecare și deteriorarea modulelor.
2. Urcarea pe structură	Risc de cădere, electrocutare și afectare a stabilității sistemului.
3. Atingerea cablurilor, conectorilor, tablourilor sau invertorului	Modulele pot genera curent continuu în prezența luminii, chiar dacă sistemul pare oprit.
4. Ridicarea sau «aranjarea» unui cablu desprins	Poate exista risc de electrocutare sau arc electric.
5. Acoperirea provizorie a unei izolații deteriorate	Reparațiile improvizate pot agrava defectul și pot pune în pericol alte persoane.
6. Resetarea invertorului după avarie	Se face numai dacă există procedură explicită transmisă de operator; altfel, doar personal autorizat.
7. Strângerea șuruburilor sau corectarea structurii	Poate afecta stabilitatea la vânt, zăpadă sau vibrații.
8. Agățarea furtunurilor, plaselor, sârmelor sau foliilor de structura SHV	Poate deteriora structura, cablurile sau modulele și poate crea risc la vânt.
9. Depozitarea materialelor lângă tablouri, invertor sau trasee de cabluri	Poate bloca accesul tehnic și poate crește riscul de incendiu sau deteriorare.

Fișă rapidă pentru cultivatori – activitățile tehnice și electrice aparțin personalului autorizat.

Oprește imediat lucrul dacă observi

- cabluri desprinse, joase sau deteriorate;
- conectori expuși;
- panouri sparte sau deplasate;
- tablou electric deschis;
- fum, miros de ars, scântei sau zgomote neobișnuite;
- urme de supraîncălzire;
- structură înclinată, lovită sau instabilă;
- bălțiri în apropierea invertorului sau tablourilor;
- avarii după furtună, grindină, vânt puternic sau lovire cu utilaje.

În oricare dintre aceste situații, cultivatorul nu verifică defectul de aproape și nu încearcă remedierea. Zona se evită, accesul se limitează dacă se poate face fără apropiere de pericol, iar operatorul sistemului sau firma autorizată este anunțată.

Mesaj final: Echipamentul de protecție folosit la lucrările agricole reduce riscurile de tăiere, lovire, alunecare, proiecții de particule sau contact cu produse fitosanitare. El nu permite intervenții asupra instalației fotovoltaice.

Cultivatorul observă de la sol, lucrează agronomic fără contact cu instalația și semnalează. Personalul autorizat intervine.



Monitorizare minimă recomandată pentru un lot pilot hortivoltaic

COMPONENTĂ	Determinări / măsurători minime	Locul măsurării	Rolul în interpretare
Lumină	radiație PAR sau radiație solară	sub panouri și în martor	arată dacă umbrirea devine limitativă pentru cultură
Aer	temperatură, umiditate relativă, VPD	zona culturii	explică stresul termic și hidric și diferențele microclimatice
Sol	umiditate și temperatură	2 adâncimi, sub panouri și în martor	ajută la ajustarea irigației și a managementului solului
Fructe	temperatură fruct, arsuri, deshidratare	fructe expuse și protejate	important pentru speciile sensibile la arșiță
Producție	kg/plantă, kg/ha, număr fructe	fiecare variantă	arată efectul agronomic real al sistemului
Calitate	calibru, fermitate, zahăr, aciditate, culoare	recoltare	arată valoarea comercială și impactul asupra calității
Fitosanitar	boli, dăunători, umectare frunze	sub panouri, margini, martor	verifică riscurile create de microclimat
Energie	kWh/zi, kWh/lună, autoconsum	invertor/contor	arată valoarea energetică reală și autoconsumul



Notă importantă: Monitorizarea trebuie realizată comparativ cu o variantă martor neacoperită. Fără martor, efectele sistemului hortivoltaic nu pot fi separate de variațiile naturale ale anului, solului sau tehnologiei de cultură.

Interpretarea datelor de umiditate în sistemele hortivoltaice: limitări și riscuri de interpretare

ELEMENT MONITORIZAT	CE INFORMAȚIE POATE OFERI	LIMITARE IMPORTANTĂ	RISC DE INTERPRETARE GREȘITĂ
 Umiditatea solului în apropierea rândului	Disponibilitatea apei în zona radiculară a rândului	Poate să nu reflecte condițiile dintre panouri	Se consideră că întreaga parcelă are același nivel de umiditate
 Umiditatea solului între rânduri	Redistribuirea apei sub influența umbrei și a precipitațiilor	Zona poate fi explorată diferit de rădăcini	Se stabilesc irigațiile pe baza unei zone nereprezentative
 Senzori la adâncimi reprezentative pentru zona radiculară activă	Profilul de umiditate în zona de absorbție a rădăcinilor	Valorile depind de textura solului, calibrarea senzorului și distribuția rădăcinilor	Se presupune că umiditatea ridicată indică automat condiții optime pentru rădăcini
 Temperatura și umiditatea aerului sub panouri	Modificarea evapotranspirației și a microclimatului	Depinde de momentul zilei și circulația aerului	Se generalizează efectele microclimatice după observații limitate
 Radiația disponibilă în zona coroanei	Nivelul real de lumină pentru fotosinteză și fructificare	Umbra este dinamică și neuniform distribuită	Valorile medii pot ascunde variațiile locale
 Cantitatea aplicată prin irigare	Volumul total de apă administrat	Nu indică uniformitatea distribuției apei în sol	Se presupune că apa aplicată este distribuită uniform în întreaga zonă radiculară

 În sistemele hortivoltaice, monitorizarea nu trebuie interpretată doar **cantitativ** („câtă apă există”), ci și **spatial** („unde este măsurată și ce parte a sistemului reprezintă”). Variabilitatea microclimatică și heterogenitatea distribuției apei pot conduce la **decizii greșite** dacă măsurătorile sunt interpretate fără context agronomic și topoclimatic.

Greșeli frecvente de evitat la implementarea unui sistem hortivoltaic

GREȘEALĂ FRECVENTĂ	DE CE ESTE PROBLEMATICĂ	CE ESTE RECOMANDAT
 1. Proiectarea sistemului pornind de la panouri, nu de la cultură	Sistemul poate deveni eficient energetic, dar neadecvat agronomic.	Proiectarea trebuie să pornească de la specie, soi, sistem de conducere, cerințe de lumină și obiectivul agronomic.
 2. Maximizarea densității panourilor fără evaluarea luminii pentru plantă	Poate duce la umbră excesivă, reducerea producției, colorării, maturării și calității comerciale.	Densitatea panourilor trebuie stabilită după evaluarea compatibilității culturii și, ideal, după simularea distribuției luminii.
 3. Ignorarea mecanizării și a accesului utilajelor	Structura poate îngreuna tratamentele, tăierile, întreținerea, recoltarea și mentenanța.	Poziția stâlpilor, înălțimea structurii și culoarele tehnologice trebuie corelate cu utilajele și lucrările horticole.
 4. Ignorarea distribuției apei și a drenajului sub panouri	Pot apărea scurgeri concentrate, bălțire, compactare, eroziune locală sau zone cu umiditate neuniformă.	Sistemul trebuie proiectat împreună cu analiza solului, a pantei, a drenajului și a distribuției apei în zona radiculară.
 5. Transferul direct al unui model din altă țară, fără adaptare locală	Un sistem eficient în alt climat sau pentru altă specie poate deveni nepotrivit în condițiile locale.	Configurația SHV trebuie adaptată topoclimatului, solului, speciei, soiului și tehnologiei de cultură din fermă.
 6. Lipsa unui lot pilot și a unei variante martor	Fără comparație locală, efectele sistemului nu pot fi interpretate corect.	Implementarea trebuie începută pe lot pilot și comparată cu o variantă martor neacoperită.
 7. Monitorizare insuficientă după instalare	Problemele de microclimat, apă, calitate sau fitosanitar pot rămâne neobservate până când afectează cultura.	Trebuie monitorizate cel puțin lumina, temperatura și umiditatea aerului, umiditatea și temperatura solului, producția, calitatea și energia.
 8. Neplanificarea mentenanței, înlocuirii și reciclării componentelor	Costurile reale și sustenabilitatea sistemului pot fi subestimate.	Încă din faza de proiectare trebuie prevăzute mentenanța, accesul tehnic, demontarea, înlocuirea componentelor și reciclarea.



MESAJ-CHEIE:

Cele mai multe probleme ale unui SHV apar nu din conceptul în sine, ci din proiectarea insuficient adaptată culturii, amplasamentului și exploatării horticole.

Set minim de indicatori tehnico-economici pentru evaluarea unui SHV la nivel de fermă

	Indicator	Ce reprezintă / Cum se calculează	Unitate	De ce contează	Recomandări practice
1	 Investiție inițială totală (CAPEX)	Costul total al sistemului hortivoltaic: structură + panouri + invertor + instalații electrice + sistem de irigare + montaj + proiectare + avize.	euro	Reprezintă baza pentru calculul tuturor indicatorilor economici (amortizare, profitabilitate).	▶ Includeți toate costurile, inclusiv cele indirecte. ▶ Cereți oferte detaliate și comparați scenarii (putere, densitate panouri).
2	 Producția anuală de energie estimată	Energia electrică produsă anual de sistemul fotovoltaic.	kWh/an	Determină venitul din energie sau valoarea economiilor prin autoconsum.	▶ Folosiți date meteo locale sau PVGIS. ▶ Estimarea trebuie verificată după primul an de funcționare.
3	 Rata de autoconsum	Procentul din energia produsă consumată în fermă.	%	Cu cât autoconsumați mai mult, cu atât valoarea economică a energiei crește.	▶ Optimizați consumul (irigare, răcire, sortare, depozitare). ▶ Luați în calcul baterii doar dacă sunt justificate economic.
4	 Valoarea anuală a energiei	Valoarea economiilor (autoconsum) sau a veniturilor (vânzare surplus).	euro/an	Arată beneficiul financiar anual generat de sistem.	▶ Folosiți prețul real al energiei pe care îl evitați sau îl încasați.
5	 Producția horticola comercială	Cantitatea de produs comercializabil obținută anual.	kg/an sau t/an	Arată impactul agronomic real al sistemului.	▶ Comparați cu varianta martor. ▶ Urmăriți și evoluția în timp (anii 1–2).
6	 Calitatea comercială medie	Indicatori de calitate (ex. calibru, fermitate, zahăr, culoare, defecte) mediatizați pe sezon.	conform speciei (unități specifice)	Influențează prețul de vânzare și valoarea totală a producției.	▶ Monitorizați indicatorii cheie pentru specia cultivată. ▶ Calitatea poate crește sau scădea diferențiat sub panouri.
7	 Venitul total anual (energie + producție horticola)	Suma valorii economice din energie (autoconsum + vânzare) și din producția horticola.	euro/an	Indicator esențial pentru evaluarea performanței sistemului integrat.	▶ Includeți și alte venituri (ex. scheme de sprijin, certificate verzi, dacă este cazul).
8	 Costuri operaționale anuale (OPEX)	Costurile anuale cu mentenanța, curățarea panourilor, reparații, asigurări, monitorizare etc.	euro/an	Afectează profitul net generat de sistem.	▶ Estimați realist: 1–2% din investiție/an este o valoare orientativă. ▶ Verificați condițiile de garanție.
9	 Perioada de amortizare simplă	Timpul în care investiția inițială este recuperată din fluxul net anual de beneficii.	ani	Arată în cât timp investiția devine rentabilă.	▶ Se calculează: Investiție inițială / (venit total anual – costuri anuale). ▶ Ținta orientativă: 6–12 ani (în funcție de cultură și autoconsum).
10	 Rata internă de rentabilitate (IRR) – opțional	Rata de actualizare la care valoarea actuală netă (VAN) a proiectului este zero.	%	Indicator financiar avansat, util în comparația între scenarii de investiție.	▶ Recomandat pentru proiecte mai mari sau finanțări. ▶ Se calculează cu orizont de 15–20 ani.



Recomandări generale:

- Evaluați întotdeauna comparativ cu o variantă martor (fără panouri).
- Folosiți date reale din primul an de funcționare pentru ajustarea calculelor.
- Analiza trebuie repetată anual în primii 2–3 ani.
- Luați în calcul riscurile: climă, piață, tehnologie, reglementări.



Notă: Valorile și coeficienții utilizați în calcule sunt orientative și trebuie adaptați la condițiile specifice ale fiecărei ferme.

*PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System – Sistemul geografic de informații pentru energia fotovoltaică)



Calendar minim de evaluare a unui lot hortivoltaic pilot

Etapa	Perioada orientativă	Ce se urmărește / Ce se face	De ce contează	Recomandări practice
 1. Înainte de instalare	Cu 1 sezon înainte sau în faza de proiectare	Se descriu cultura, amplasamentul, solul, sursa de apă, consumul energetic și riscurile climatice. Se stabilește varianta martor și planul minim de monitorizare.	Oferă baza de comparație fără de care efectele SHV nu pot fi interpretate corect.	► Fotografați parcela, notați tehnologia existentă și identificați clar obiectivul pilotului: protecție climatică, apă, energie sau combinație între acestea.
 2. Instalare și calibrare inițială	La montaj și imediat după punerea în funcțiune	Se verifică poziția panourilor, accesul utilajelor, distribuția apei, funcționarea senzorilor și înregistrarea energiei produse.	Corectează rapid problemele de proiectare sau instalare înainte ca acestea să afecteze cultura.	► Verificați umbrirea reală în teren, circulația utilajelor și comparabilitatea măsurărilor dintre SHV și martor.
 3. Primul sezon de vegetație	Anul 1	Se monitorizează lumina, microclimatul, solul, apa, producția, calitatea și energia. Se observă efectele imediate asupra culturii.	Arată răspunsul inițial al sistemului, dar nu este suficient singur pentru concluzii definitive.	► Comparați periodic cu martorul și notați separat episoadele de stres: caniculă, secetă, arsuri, ploi extreme sau probleme fitosanitare.
 4. Confirmare multianuală	Anul 2 (ideal și anul 3 la speciile perene)	Se confirmă stabilitatea efectelor asupra producției, calității, stării plantelor, solului și performanței energetice.	Multe efecte horticole apar sau se confirmă abia după mai multe sezoane.	► Analizați separat anii diferiți climatic și verificați dacă beneficiile se mențin și în sezoane contrastante.
 5. Decizia de extindere	După minimum 2 sezoane de date utile	Se compară beneficiile agronomice, energetice și economice cu costurile, riscurile și alternativele mai simple de amplasare a panourilor.	Permite o decizie fundamentată privind extinderea, ajustarea sau abandonarea soluției.	► Extindeți gradual doar dacă sistemul rămâne compatibil cu cultura, mecanizarea și economia fermei.


MESAJ-CHEIE: Un lot pilot SHV trebuie evaluat comparativ cu o variantă martor și urmărit pe minimum două sezoane înaintea extinderii la scară de fermă.

Bibliografie

- Adeh, E. H., Selker, J. S., & Higgins, C. W. (2018). Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLOS ONE*, 13(11), e0203256. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>.
- Alhelal, I. M., Albadawi, A. A., Alsadon, A. A., Alenazi, M. M., Ibrahim, A. A., Shady, M., & Al-Dubai, A. A. (2024). Effects of shading nets color on the internal environmental conditions, light spectral distribution, and strawberry growth and yield in greenhouses. *Plants*, 13(16), 2318. <https://doi.org/10.3390/plants13162318>.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Aroca-Delgado, R., Pérez-Alonso, J., Callejón-Ferre, Á. J., & Velázquez-Martí, B. (2018). Compatibility between crops and solar panels: An overview from shading systems. *Sustainability*, 10(3), 743. <https://doi.org/10.3390/su10030743>.
- Baiamonte, G., Minacapilli, M., Novara, A., & Gristina, L. (2023). Impact of solar panels on runoff generation process. *Hydrological Processes*, 37(11), e15053. <https://doi.org/10.1002/hyp.15053>.
- Bale, J. S., Masters, G. J., Hodkinson, I. D., Awmack, C., Bezemer, T. M., Brown, V. K., Butterfield, J., Buse, A., Coulson, J. C., Farrar, J., Good, J. E. G., Harrington, R., Hartley, S., Jones, T. H., Lindroth, R. L., Press, M. C., Symmioudis, I., Watt, A. D., & Whittaker, J. B. (2002). Herbivory in global climate change research: Direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology*, 8(1), 1–16. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00451.x>.
- Barron-Gafford, G. A., Pavao-Zuckerman, M. A., Minor, R. L., Sutter, L. F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D. T., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A. K., Nabhan, G. P., & Macknick, J. E. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, 2, 848–855. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>.
- BayWa r.e. (2023). Solar installations bear fruit for Netherlands Agri-PV. BayWa r.e.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). The nature and properties of soils (15th ed.). Pearson.
- Bruno, M., Gföllner, L. J., & Berwind, M. F. (2025). Enhancing agrivoltaic synergies through optimized tracking strategies. *Journal of Photonics for Energy*, 15(3), 032703. <https://doi.org/10.1117/1.JPE.15.032703>.
- Campana, P. E., Stridh, B., Amaducci, S., & Colauzzi, M. (2021). Optimisation of vertically mounted agrivoltaic systems. *Journal of Cleaner Production*, 325, 129091. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129091>.
- CEN. (2003). EN 1991-1-1: Eurocode 1: Actions on structures—Part 1-1: General actions—Densities, self-weight, imposed loads for buildings. European Committee for Standardization.
- CEN. (2004). EN 1997-1: Eurocode 7: Geotechnical design—Part 1: General rules. European Committee for Standardization.
- CEN. (2005a). EN 1991-1-3: Eurocode 1: Actions on structures—Part 1-3: General actions—Snow loads. European Committee for Standardization.
- CEN. (2005b). EN 1991-1-4: Eurocode 1: Actions on structures—Part 1-4: General actions—Wind actions. European Committee for Standardization.
- Chatzipanagi, A., Taylor, N., Jaeger-Waldau, A. 2023. Overview of the Potential and Challenges for Agri-Photovoltaics in the European Union. Publications Office of the European Union, Joint Research Centre.
- CMS. (2025, May 5). Comprehensive guide to agrivoltaics and floating photovoltaics: Romania. CMS Expert Guides. <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-agrivoltaics-and-floating-photovoltaics/romania>.
- Cole, W., & Karmakar, A. (2025). Cost projections for utility-scale battery storage: 2025 update. National Renewable Energy Laboratory.
- Cook, L. M., & McCuen, R. H. (2013). Hydrologic response of solar farms. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(5), 536–541. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000530](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000530).
- Cordoba-Novoa, H. A., Pérez-Trujillo, M. M., Cruz Rincón, B. E., Flórez-Velasco, N., Magnitskiy, S., & Moreno Fonseca, L. P. (2022). Shading reduces water deficits in strawberry (*Fragaria × ananassa*) plants during vegetative growth. *International Journal of Fruit Science*, 22(1), 725–740. <https://doi.org/10.1080/15538362.2022.2114056>.
- Cornell Cooperative Extension. (2021). Soil qualities to optimize new orchard growth. Cornell Cooperative Extension.
- Cossu, M., Cossu, A., Deligios, P. A., Ledda, L., Li, Z., Fatnassi, H., Poncet, C., & Yano, A. (2018). Assessment and comparison of the solar radiation distribution inside the main commercial photovoltaic

greenhouse types in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 822–834. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.001>.

Cross, J. V., Walklate, P. J., Murray, R. A., & Richardson, G. M. (2001). Spray deposits and losses in different sized apple trees from an axial fan orchard sprayer: 1. Effects of spray liquid flow rate. *Crop Protection*, 20(1), 13–30. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(00\)00046-6](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(00)00046-6).

Denaxa, N. K., Roussos, P. A., Ntanos, E., & Tsafouros, A. (2023). Mitigation of high solar irradiance and heat stress in kiwifruit vines. *Agriculture*, 13(3), 701. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030701>.

Dinesh, H., & Pearce, J. M. (2016). The potential of agrivoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 299–308. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>.

Directiva (UE) 2018/2001 a Parlamentului European și a Consiliului din 11 decembrie 2018 privind promovarea utilizării energiei din surse regenerabile, cu modificările ulterioare.

Directiva (UE) 2023/2413 a Parlamentului European și a Consiliului din 18 octombrie 2023 de modificare a Directivei (UE) 2018/2001 în ceea ce privește promovarea energiei din surse regenerabile.

Dragomir, D., Oltenacu, C.-V., Ofirim, D. V., Căliniță, C., Ofirim, B. A., & Ofirim, D. M. (2025). Study on the impact of semi-transparent photovoltaic panels in hortivoltaic systems on microclimate and strawberry production in Romania. *Scientific Papers. Series B, Horticulture*, 69(1), 44–53. https://horticulturejournal.usamv.ro/pdf/2025/issue_1/Art5.pdf

Dragomir, D., Ofirim, D. V., Oltenacu, V. C., Oltenacu, N., Căliniță, C., & Dogaru, M. (2024). Impactul panourilor fotovoltaice semitransparente asupra calității căpșunilor ‘Sibilla’ în sud-estul României. *Fruit Growing Research*, 40, 72–77. <https://doi.org/10.33045/fgr.v40.2024.10>

Drepper, B., Bamps, B., Gobin, A., & Van Orshoven, J. (2022). Strategies for managing spring frost risks in orchards: Effectiveness and conditionality—A systematic review. *Environmental Evidence*, 11, 29. <https://doi.org/10.1186/s13750-022-00281-z>.

Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., & Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*, 36(10), 2725–2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>.

Dussi, M. C., Giardina, G., Sosa, D., González Junyent, R., Zecca, A., & Reeb, P. (2005). Shade nets effect on canopy light distribution and quality of fruit and spur leaf on apple cv. Fuji. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 3(2), 253–260.

Elamri, Y., Cheviron, B., Mange, A., Dejean, C., Liron, F., & Belaud, G. (2018). Rain concentration and sheltering effect of solar panels on cultivated plots. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(2), 1285–1298. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1285-2018>.

Energie 360° & Insolight. (2025). 800 MWh erneuerbarer Strom pro Jahr – mit Agri-PV im Aargau. Energie 360°.

European Commission. (2019). The European Green Deal (COM(2019) 640 final). European Commission.

European Commission. (2022). REPowerEU Plan (COM(2022) 230 final). European Commission.

European Commission. (n.d.). Waste from electrical and electronic equipment (WEEE). Directorate-General for Environment. https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-electrical-and-electronic-equipment-weee_en.

FAO. 2011. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture: Managing Systems at Risk. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, and Earthscan, London.

Flexas, J., Niinemets, Ü., Gallé, A., Barbour, M. M., Centritto, M., Diaz-Espejo, A., Douthe, C., Galmés, J., Ribas-Carbo, M., Rodriguez, P. L., Rosselló, F., Soolanayakanahally, R., Tomas, M., Wright, I. J., Farquhar, G. D., & Medrano, H. (2013). Diffusional conductances to CO₂ as a target for increasing photosynthesis and photosynthetic water-use efficiency. *Photosynthesis Research*, 117, 45–59. <https://doi.org/10.1007/s11120-013-9844-z>.

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2020). Agrivoltaics: Opportunities for agriculture and the energy transition: A guideline for Germany. Fraunhofer ISE.

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2022). Agrivoltaics: Opportunities for agriculture and the energy transition: A guideline for Germany. Fraunhofer ISE.

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2024). Agrivoltaics: Opportunities for agriculture and the energy transition. Fraunhofer ISE.

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (n.d.). Model region Agri-PV BaWü. Retrieved June 16, 2026, from <https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/agri-pv-bawue.html>.

Gambetta, J. M., Holzapfel, B. P., Stoll, M., & Friedel, M. (2021). Sunburn in grapes: A review. *Frontiers in Plant Science*, 11, 604691. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.604691>.

- Gil, E., Escolà, A., Rosell, J. R., Planas, S., & Val, L. (2007). Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors. *Crop Protection*, 26(8), 1287–1297. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2006.11.003>.
- Glenn, D. M., Prado, E., Erez, A., McFerson, J., & Puterka, G. J. (2002). A reflective, processed-kaolin particle film affects fruit temperature, radiation reflection, and solar injury in apple. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 127(2), 188–193. <https://doi.org/10.21273/JASHS.127.2.188>.
- Goetzberger, A., & Zastrow, A. (1982). On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation. *International Journal of Solar Energy*, 1(1), 55–69. <https://doi.org/10.1080/01425918208909875>.
- Gorjian, S., Bousi, E., Özdemir, Ö. E., Trommsdorff, M., Kumar, N. M., Anand, A., Kant, K., & Chopra, S. S. (2022). Progress and challenges of crop production and electricity generation in agrivoltaic systems using semi-transparent photovoltaic technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112126. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112126>.
- Gregory, P. J. (2006). *Plant roots: Growth, activity and interaction with soils*. Blackwell Publishing.
- Grossiord, C., Buckley, T. N., Cernusak, L. A., Novick, K. A., Poulter, B., Siegwolf, R. T. W., Sperry, J. S., & McDowell, N. G. (2020). Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist*, 226(6), 1550–1566. <https://doi.org/10.1111/nph.16485>.
- Guerrero-Lemus, R., Vega, R., Kim, T., Kimm, A., & Shephard, L. E. (2016). Bifacial solar photovoltaics: A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1533–1549. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.041>.
- Gutiérrez-Gamboa, G., Araya-Alman, M., Zúñiga-Sánchez, M., González, M., Lisperguer Fernández, M. J., & Romero-Bravo, S. (2025). The impacts of light interception on yield and kernel parameters in hazelnut production. *Horticulturae*, 11(2), 156. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11020156>.
- Hampson, C. R., Azarenko, A. N., & Potter, J. R. (1996). Photosynthetic rate, flowering, and yield component alteration in hazelnut in response to different light environments. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 121(6), 1103–1111. <https://doi.org/10.21273/JASHS.121.6.1103>.
- Hansen, A. (2019). How to grow red currants in your garden. Utah State University Extension. <https://extension.usu.edu/yardandgarden/research/red-currants-in-the-garden>.
- Helsen, H. H. M., Maestrini, B., Meijers, A. C. E., Hermelink, M. I., de Vries, W., Balk, P. A., & de Ruijter, F. J. (2022). Crop response to agrivoltaics in soft fruit production. Abstract presented at the AgriVoltaics Conference, Piacenza, Italy.
- Hemming, S., Dueck, T. A., Janse, J., & van Noort, F. R. (2008). The effect of diffuse light on crops. *Acta Horticulturae*, 801, 1293–1300. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.801.158>.
- Hermelink, M. I., Maestrini, B., & de Ruijter, F. J. (2024). Berry shade tolerance for agrivoltaics systems: A meta-analysis. *Scientia Horticulturae*, 330, 113062. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113062>.
- Hickey, T. (2024). Agrivoltaic designs and configurations (NREL/FS-6A20-91672). National Renewable Energy Laboratory.
- Horowitz, K., Ramasamy, V., Macknick, J., & Margolis, R. (2020). Capital costs for dual-use photovoltaic installations: 2020 benchmark for ground-mounted PV systems with pollinator-friendly vegetation, grazing, and crops (NREL/TP-6A20-77811). National Renewable Energy Laboratory.
- IEA PVPS. (2021). End-of-life management of photovoltaic panels: Trends in PV module recycling technologies. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. <https://iea-pvps.org/key-topics/end-of-life-management-of-photovoltaic-panels-trends-in-pv-module-recycling-technologies-by-task-12/>.
- IEA PVPS. (2025a). Dual land use for agriculture and solar power production: Overview and performance of agrivoltaic systems (Report IEA-PVPS T13-29:2025). International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme.
- IEA PVPS. (2025b). Status of PV module recycling in IEA PVPS Task 12 countries (Report IEA-PVPS T12-31:2025). International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme.
- IEA. (2024). Batteries and secure energy transitions. International Energy Agency.
- IEC. (2023). IEC 62548-1:2023: Photovoltaic (PV) arrays—Part 1: Design requirements. International Electrotechnical Commission.
- Insolight. (n.d.). Agri-PV solutions for orchards. Retrieved June 16, 2026, from <https://insolight.ch/agri-pv-solutions-for-orchards/>
- Iowa State University Extension and Outreach. (2023). Growing currants and gooseberries in the home garden. *Yard and Garden*. <https://yardandgarden.extension.iastate.edu/how-to/growing-currants-and-gooseberries-home-garden>.
- IPCC. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

- Jackson, J. E. (1980). Light interception and utilization by orchard systems. *Horticultural Reviews*, 2, 208–267.
- Joint Research Centre. (2023). Overview of the potential and challenges for agri-photovoltaics in the European Union. Publications Office of the European Union.
- Jones, H. G. (2004). Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology. *Advances in Botanical Research*, 41, 107–163. [https://doi.org/10.1016/S0065-2296\(04\)41003-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2296(04)41003-9).
- Jung, D., Schönberger, F., & Spera, F. (2024). Effects of agrivoltaics on the microclimate in horticulture: Enhancing resilience of agriculture in semi-arid zones. *AgriVoltaics Conference Proceedings*, 2. <https://doi.org/10.52825/agripv.v2i.1033>.
- Kader, A. A. (Ed.). (2002). *Postharvest technology of horticultural crops* (3rd ed., Publication 3311). University of California Agriculture and Natural Resources.
- Lakso, A. N., & Corelli Grappadelli, L. (1992). Implications of pruning and training practices to carbon partitioning and fruit development in apple. *Acta Horticulturae*, 322, 231–240. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1992.322.22>.
- Lama, R. K., Suwal, S., Shakya, A., Ghimire, R., & Seo, J. (2024). Design and performance analysis of foldable solar panel for agrivoltaics system. *Sensors*, 24(4), 1167. <https://doi.org/10.3390/s24041167>.
- Legea apelor nr. 107/1996, cu modificările și completările ulterioare.
- Legea energiei electrice și a gazelor naturale nr. 123/2012, cu modificările și completările ulterioare.
- Legea fondului funciar nr. 18/1991, republicată, cu modificările și completările ulterioare.
- Legea nr. 254/2022 pentru modificarea & completarea Legii fondului funciar nr. 18/1991 & a altor acte normative. Monitorul Oficial nr. 736 din 21 iulie 2022.
- Legea nr. 292/2018 privind evaluarea impactului anumitor proiecte publice și private asupra mediului, cu modificările și completările ulterioare.
- Legea nr. 350/2001 privind amenajarea teritoriului și urbanismul, cu modificările și completările ulterioare.
- Legea nr. 50/1991 privind autorizarea executării lucrărilor de construcții, republicată, cu modificările și completările ulterioare.
- Li, T., Kromdijk, J., Heuvelink, E., van Noort, F. R., Kaiser, E., & Marcelis, L. F. M. (2014). Enhancement of crop photosynthesis by diffuse light: Quantifying the contributing factors. *Annals of Botany*, 114(1), 145–156. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu071>.
- Lobos, G. A., Retamales, J. B., Hancock, J. F., Flore, J. A., Romero-Bravo, S., & del Pozo, A. (2013). Productivity and fruit quality of *Vaccinium corymbosum* cv. Elliott under photo-selective shading nets. *Scientia Horticulturae*, 153, 143–149. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.02.012>.
- Loik, M. E., Carter, S. A., Alers, G., Wade, C. E., Shugar, D., Corrado, C., Jokerst, D., & Kitayama, C. (2017). Wavelength-selective solar photovoltaic systems: Powering greenhouses for plant growth at the food-energy-water nexus. *Earth's Future*, 5(10), 1044–1053. <https://doi.org/10.1002/2016EF000531>.
- Lopez, G., Pasquali, A., Hitte, V., Lesniak, V., Bregeon, M., Persello, S., Juillion, P., Chopard, J., & Fumey, D. (2025). Sun protection for fruit: Dynamic agrivoltaics reduces apple temperature and sunburn damage. *AgriVoltaics Conference Proceedings*, 3. <https://doi.org/10.52825/agripv.v3i.1371>.
- Lopez, G., Pasquali, A., Hitte, V., Lesniak, V., Bregeon, M., Persello, S., Juillion, P., Chopard, J., & Fumey, D. (2025). Sun protection for fruit: Dynamic agrivoltaics reduces apple temperature and sunburn damage. *AgriVoltaics Conference Proceedings*, 3. <https://doi.org/10.52825/agripv.v3i.1371>.
- Lu, S. M., Amaducci, S., Gorjian, S., Haworth, M., Hägglund, C., Ma, T., Zainali, S., & Campana, P. E. (2024). Wavelength-selective solar photovoltaic systems to enhance spectral sharing of sunlight in agrivoltaics. *Joule*, 8, 2483–2522. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.08.006>.
- Ludzuweit, A., Paterson, J., Wydra, K., Pump, C., Müller, K., & Miller, Y. (2025). Enhancing ecosystem services and biodiversity in agrivoltaics through habitat-enhancing strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 212, 115380. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115380>.
- Magarelli, A., Mazzeo, A., & Ferrara, G. (2024). Fruit crop species with agrivoltaic systems: A critical review. *Agronomy*, 14(4), 722. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040722>.
- Magarelli, A., Mazzeo, A., & Ferrara, G. (2024). Fruit crop species with agrivoltaic systems: A critical review. *Agronomy*, 14(4), 722. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040722>.
- Marrou, H., Dufour, L., & Wery, J. (2013). How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil-crop system? *European Journal of Agronomy*, 50, 38–51. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.05.004>.
- Marrou, H., Guillioni, L., Dufour, L., Dupraz, C., & Wery, J. (2013). Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agricultural and Forest Meteorology*, 177, 117–132. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.012>.

- Marrou, H., Wery, J., Dufour, L., & Dupraz, C. (2013). Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *European Journal of Agronomy*, 44, 54–66. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.08.003>.
- Matamala, M. F., Bastías, R. M., Urrea, I., Calderón-Orellana, A., Campos, J., & Alborno, K. (2023). Rain cover and netting materials differentially affect fruit yield and quality traits in two highbush blueberry cultivars via changes in sunlight and temperature conditions. *Plants*, 12(20), 3556. <https://doi.org/10.3390/plants12203556>.
- Mateo, A., & Di Gennaro, S. F. (2015). Technology in precision viticulture: A state of the art review. *International Journal of Wine Research*, 7, 69–81. <https://doi.org/10.2147/IJWR.S69405>.
- Maxwell, K., & Johnson, G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence: A practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51(345), 659–668. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>.
- Ivona Cristina Mazilu, Emil Chițu, Mirela Călinescu, Florin Plăiașu, Leinar Septar, Zsolt Jakab-Ilyefalvi, Sorina Sîrbu, Viorel Oltenacu. (2025). Dynamics of climatic accidents during peach, apricot, and cherry dormancy and first growth stages in the last 20 years in Romania. *Scientific Papers. Series B, Horticulture*, Vol. LXIX, No 2, 2025, pp: 160-171. https://horticulturejournal.usamv.ro/pdf/2025/issue_2/vol2025_2.pdf
- Ivona Cristina Mazilu, Emil Chițu, Mirela Florina Călinescu, Florin Plăiașu, Lavinia-Mihaela Udrea, Daniel Alexandru (2025). Trends of sour cherry late frost damage probability in the last 25 years in Romania. *Fruit Growing Research*, Vol. XLI, pp: 39-52, DOI: 10.33045/fgr.v41.2025.04
- Medrano, H., Tomás, M., Martorell, S., Escalona, J. M., Pou, A., Fuentes, S., Flexas, J., & Bota, J. (2015). Improving water use efficiency of vineyards in semi-arid regions: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 499–517. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0280-z>.
- Miccichè, D., de Rosas, M. I., Ferro, M. V., Di Lorenzo, R., Puccio, S., & Pisciotto, A. (2023). Effects of artificial canopy shading on vegetative growth and ripening processes of cv. Nero d'Avola (*Vitis vinifera* L.). *Frontiers in Plant Science*, 14, 1210574. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1210574>.
- Mihălcioiu, I. M., Olteanu, A. L. G., Costache, E. G., Butcaru, A. C., Mihai, C. A., & Stănică, F. (2026, May 11–13). Hortivoltaics: Combining solar energy production with pawpaw (*Asimina triloba* L.) cultivation—Light dynamics and plant response in a preliminary study [Conference presentation]. 16th CASEE Conference, Next Stop Europe: Shaping the Future of Agriculture and Life Sciences Education, Tirana, Albania.
- Mihălcioiu, I. M., Olteanu, A. L. G., Tabacu, A. F., Butcaru, A. C., Mihai, C. A., & Stănică, F. (2024b, May 12–16). Pawpaw (*Asimina triloba* L. Dunal) phenology stages under the influence of genotypes and local weather conditions [Poster presentation]. European Horticulture Congress 2024, Bucharest, Romania.
- Mihălcioiu, I. M., Olteanu, A. L. G., Tabacu, A. F., Lorentz, E. D., Butcaru, A. C., Mihai, C. A., & Stănică, F. (2024a). Hortivoltaics—A road to go or not? A review. *Scientific Papers. Series B, Horticulture*, 68(2), 788–794.
- Modellregion Agri-PV Baden-Württemberg. (2023). Pilot agrivoltaic systems for special crops.
- Montana State University. (n.d.). Apple orchard site selection. Western Agricultural Research Center, Montana State University.
- Mupambi, G., Anthony, B. M., Layne, D. R., Musacchi, S., Serra, S., Schmidt, T., & Kalcsits, L. A. (2018). The influence of protective netting on tree physiology and fruit quality of apple: A review. *Scientia Horticulturae*, 236, 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.014>.
- Murchie, E. H., & Lawson, T. (2013). Chlorophyll fluorescence analysis: A guide to good practice and understanding some new applications. *Journal of Experimental Botany*, 64(13), 3983–3998. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert208>.
- Nain, P., & Antil, A. (2024). End-of-life solar photovoltaic waste management: A comparison as per European Union and United States regulatory approaches. *Resources, Conservation and Recycling Advances*, 21, 200212. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2024.200212>.
- Niazi, K. A. K., & Victoria, M. (2023). Comparative analysis of photovoltaic configurations for agrivoltaic systems in Europe. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 31(11), 1101–1113. <https://doi.org/10.1002/pip.3727>.
- OMAFRA. (n.d.). Using windbreaks in new orchards. Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs.
- Omer, A. A. A., Liu, W., Li, M., Zheng, J., Zhang, F., Zhang, X., Mohammed, S. O. H., Fan, L., Liu, Z., Chen, F., Chen, Y., & Ingenhoff, J. (2022). Water evaporation reduction by the agrivoltaic systems development. *Solar Energy*, 247, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.10.022>.
- Ordinul ANRE nr. 59/2013 pentru aprobarea Regulamentului privind racordarea utilizatorilor la rețelele electrice de interes public, cu modificările ulterioare.
- Ordinul ANRE nr. 6/2025, numai dacă sunt tratate autorizațiile și licențele energetice.

- Ordonanța de urgență a Guvernului nr. 195/2005 privind protecția mediului.
- Ordonanța de urgență a Guvernului nr. 57/2007 privind regimul ariilor naturale protejate, dacă sunt menționate amplasamente protejate sau situri Natura 2000.
- Pallotti, L., Poni, S., Silvestroni, O., Lanari, V., Romboli, Y., & Mencarelli, F. (2023). Effects of shading nets as a form of adaptation to climate change on grape production: A review. *OENO One*, 57(2), 131–147. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2023.57.2.7414>.
- Pascaris, A. (2023). Agrivoltaics: Solar farming for a greener future. National Renewable Energy Laboratory. <https://docs.nrel.gov/docs/fy24osti/87786.pdf>.
- Peavey, M., Goodwin, I., McClymont, L., & Turpin, S. (2020). Effect of shading on red colour and fruit quality in blush pears. *Plants*, 9(3), 322. <https://doi.org/10.3390/plants9030322>.
- Peavey, M., Scalisi, A., Islam, M. S., & Goodwin, I. (2024). Fruit position, light exposure and fruit surface temperature affect colour expression in a dark-red apple cultivar. *Horticulturae*, 10(7), 725. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10070725>.
- Penn State Extension. (2022). Strategies for effective management of Botrytis and anthracnose fruit rot in strawberries. Pennsylvania State University Extension. <https://extension.psu.edu/strategies-for-effective-management-of-botrytis-and-anthracnose-fruit-rot-in-strawberries>.
- Penn State Extension. (2023). Home orchard site selection. Pennsylvania State University Extension.
- Perry, K. B. (1998). Basics of frost and freeze protection for horticultural crops. *HortTechnology*, 8(1), 10–15. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.8.1.10>.
- Petridis, A., van der Kaay, J., Chrysanthou, E., McCallum, S., Graham, J., & Hancock, R. D. (2018). Photosynthetic limitation as a factor influencing yield in highbush blueberries (*Vaccinium corymbosum*) grown in a northern European environment. *Journal of Experimental Botany*, 69(12), 3069–3080. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery118>.
- Poling, E. B. (2008). Spring cold injury to winegrapes and protection strategies and methods. *HortScience*, 43(6), 1652–1662. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.6.1652>.
- Pscheidt, J. W., & Ocamb, C. M. (2025a). Blueberry (*Vaccinium corymbosum*)—Botrytis blight. Pacific Northwest Plant Disease Management Handbook. Oregon State University. <https://pnwhandbooks.org/plantdisease/host-disease/blueberry-vaccinium-corymbosum-botrytis-blight>.
- Pscheidt, J. W., & Ocamb, C. M. (2025b). Strawberry (*Fragaria* spp.)—Gray mold (fruit rot). Pacific Northwest Plant Disease Management Handbook. Oregon State University. <https://pnwhandbooks.org/plantdisease/host-disease/strawberry-fragaria-spp-gray-mold-fruit-rot>.
- Publicover, B. (2025, June 17). Agrivoltaics for cherries. *pv magazine International*. <https://www.pv-magazine.com/2025/06/17/agrivoltaics-for-cherries/>
- Racsko, J., & Schrader, L. E. (2012). Sunburn of apple fruit: Historical background, recent advances and future perspectives. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 31(6), 455–504. <https://doi.org/10.1080/07352689.2012.696453>.
- Reay, P. F. (2001). The role of low temperatures and light in the accumulation of anthocyanins in apples. *Scientia Horticulturae*, 91(3–4), 273–282. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(01\)00252-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(01)00252-7).
- Reher, T., Willockx, B., Schenk, A., Bisschop, J., Huyghe, Y., Nicolai, B. M., Martens, J. A., Diels, J., Cappelle, J., & Van de Poel, B. (2025). Agrivoltaic cultivation of pears under semi-transparent panels reduces yield consistently and maintains fruit quality in Belgium. *Agronomy for Sustainable Development*, 45, 25. <https://doi.org/10.1007/s13593-025-01019-0>.
- Reher, T., Willockx, B., Schenk, A., Bisschop, J., Huyghe, Y., Nicolai, B. M., Martens, J. A., Diels, J., Cappelle, J., & Van de Poel, B. (2025). Agrivoltaic cultivation of pears under semi-transparent panels reduces yield consistently and maintains fruit quality in Belgium. *Agronomy for Sustainable Development*, 45. <https://doi.org/10.1007/s13593-025-01019-0>
- Riaz, M. H., Imran, H., Alam, H., Alam, M. A., & Butt, N. Z. (2021). Crop-specific optimization of bifacial PV arrays for agrivoltaic food-energy production: The light-productivity-factor approach. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.00560>.
- Riaz, M. H., Younas, R., Imran, H., Alam, M. A., & Butt, N. Z. (2019). Module technology for agrivoltaics: Vertical bifacial vs. tilted monofacial farms. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 10(2), 469–477. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2950154>.
- Rowlandson, T., Gleason, M., Sentelhas, P., Gillespie, T., Thomas, C., & Hornbuckle, B. (2015). Reconsidering leaf wetness duration determination for plant disease management. *Plant Disease*, 99(3), 310–319. <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-14-0529-FE>.
- Scalisi, A., McClymont, L., Peavey, M., & Goodwin, I. (2026). Long-term effects of agrivoltaics on yield and fruit quality performance of bi-color (blush) pears. *Scientia Horticulturae*, 357, 114663. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2026.114663>.

- Schilder, A. (2017). Post-bloom fungicide choices in blueberries. Michigan State University Extension. https://www.canr.msu.edu/news/post_bloom_fungicide_choices_in_blueberries.
- Schrader, L. E., Sun, J., Zhang, J., Felicetti, D. A., & Tian, J. (2008). Heat and light-induced apple skin disorders: Causes and prevention. *Acta Horticulturae*, 772, 51–58.
- Schrader, L. E., Zhang, J., & Duplaga, W. K. (2001). Two types of sunburn in apple caused by high fruit surface (peel) temperature. *Plant Health Progress*, 2(1), 3. <https://doi.org/10.1094/PHP-2001-1004-01-RS>.
- Schrader, L. E., Zhang, J., & Sun, J. (2003). Environmental stresses that cause sunburn of apple. *Acta Horticulturae*, 618, 397–405.
- Scofield, C., Stanley, J., Schurmann, M., Hutton, M., Breen, K., & Tustin, D. S. (2022). The relationship between light availability and fruit quality of sweet cherries grown on narrow row, planar canopy systems. *Acta Horticulturae*, 1346, 279–286. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1346.35>.
- Serra, S., Borghi, S., Mupambi, G., Camargo-Alvarez, H., Layne, D. R., Schmidt, T., & Kalcsits, L. (2020). Photosensitive protective netting improves ‘Honeycrisp’ fruit quality. *Plants*, 9(12), 1708. <https://doi.org/10.3390/plants9121708>.
- Singh, R., Scalisi, A., McClymont, L., & Goodwin, I. (2024a). Effects of above-canopy photovoltaic arrays on crop yield and fruit quality in a pear orchard. *Acta Horticulturae*, 1403, 259–266. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2024.1403.34>
- Singh, R., Scalisi, A., McClymont, L., & Goodwin, I. (2024b). Effects of above-canopy photovoltaic arrays on transpiration and energy production in a pear orchard. *Acta Horticulturae*, 1409. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2024.1409.12>.
- Snyder, R. L., & de Melo-Abreu, J. P. (2005). Frost protection: Fundamentals, practice, and economics: Volume 1. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- SolarPower Europe. (2023). Agrisolar best practice guidelines. SolarPower Europe. <https://www.solarpowereurope.org/insights/thematic-reports/agrisolar-best-practice-guidelines>.
- Song, W., Ge, J., Xie, L., Chen, Z., Ge, Z., Shi, J., Sun, D., Tong, X., Ye, Q., & Zhang, X. (2023). Semi-transparent organic photovoltaics for agrivoltaic applications. *Nano Energy*, 116, 108805. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108805>.
- Stallknecht, E. J., Herrera, C. K., Yang, C., King, I., Sharkey, T. D., Lunt, R. R., & Runkle, E. S. (2023). Designing plant-transparent agrivoltaics. *Scientific Reports*, 13, 1903. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28484-5>.
- Stănică, F. (2012). Asimina triloba (pawpaw) germplasm in Romania. *Scientific Papers. Series B, Horticulture*, 56, 267–272.
- Tabacu, A. F., Mihălcioiu, I. M., Olteanu, A. L. G., Butcaru, A. C., & Stănică, F. (2024, May 12–16). Biochemical comparison of pawpaw (*Asimina triloba* L. Dunal) fruits from several genotypes over five years [Poster presentation]. European Horticulture Congress 2024, Bucharest, Romania.
- Tahir, Z., Riaz, M. H., Butt, N. Z., & Imran, H. (2022). Implications of spatial-temporal shading in agrivoltaics under fixed tilt, tracking and bifacial photovoltaic panels. *Renewable Energy*, 190, 167–176. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.076>.
- Thomas, I. L., Ekins-Daukes, N. J., & Schmidt, T. W. (2026). Spectrally selective modules for agrivoltaics. *EES Solar*, 2, 10–27. <https://doi.org/10.1039/D5EL00077G>.
- Thomson, G. E., Turpin, S., & Goodwin, I. (2018). A review of preharvest anthocyanin development in full red and blush cultivars of European pear. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 46(2), 81–100. <https://doi.org/10.1080/01140671.2017.1351378>.
- Thomson, L. J., Macfadyen, S., & Hoffmann, A. A. (2010). Predicting the effects of climate change on natural enemies of agricultural pests. *Biological Control*, 52(3), 296–306. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2009.01.022>.
- Toledo, C., & Scognamiglio, A. (2021). Agrivoltaic systems design and assessment: A critical review, and a descriptive model towards a sustainable landscape vision (three-dimensional agrivoltaic patterns). *Sustainability*, 13(12), 6871. <https://doi.org/10.3390/su13126871>.
- Torres, A. P., & Lopez, R. G. (2010). Measuring daily light integral in a greenhouse. Purdue University Cooperative Extension Service. <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/HO/HO-238-W.pdf>.
- Touil, S., Richa, A., Fizir, M., & Bingwa, B. (2021). Shading effect of photovoltaic panels on horticulture crops production: A mini review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 20, 281–296. <https://doi.org/10.1007/s11157-021-09572-2>.
- Tromp, J., Webster, A. D., & Wertheim, S. J. (Eds.). (2005). *Fundamentals of temperate zone tree fruit production*. Backhuys Publishers.

- Udrea, L. M., Călinescu, M. F., Mazilu, I. C., Chițu, E., & Plăiașu, F. (2025). The effect of photovoltaic systems on berries production. A review. *Scientific Papers, Series B, Horticulture*, Vol. LXIX, Issue 1, Print ISSN 2285-5653, pp: 223-235. https://horticulturejournal.usamv.ro/pdf/2025/issue_1/Art27.pdf
- Valle, B., Simonneau, T., Sourd, F., Pechier, P., Hamard, P., Frisson, T., Ryckewaert, M., & Christophe, A. (2017). Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops. *Applied Energy*, 206, 1495–1507. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.113>.
- Washington State University. (n.d.). Orchard establishment. WSU Tree Fruit. <https://treefruit.wsu.edu/orchard-management/orchard-establishment/>.
- Weselek, A., Bauerle, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P. (2021). Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate. *Agronomy for Sustainable Development*, 41, 59. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00714-y>.
- Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P. (2019). Agrophotovoltaic systems: Applications, challenges, and opportunities: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39, 35. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>.
- Widmer, J., Ançay, A., Nardin, G., Duchemin, M., Ackermann, M., & Sutter, L. (2025). Harnessing the sun, agrivoltaics and its shading impact on berry yields in Switzerland: Agrivoltaics berry shading thresholds. In *AgriVoltaics World Conference 2025*. Fraunhofer ISE.
- Wolske, E., Dilley, C. A., Runkle, E. S., & Hanson, E. J. (2021). Berry quality and anthocyanin content of ‘Consort’ black currants grown under artificial shade. *Plants*, 10(4), 766. <https://doi.org/10.3390/plants10040766>.
- Wünsche, J. N., & Lakso, A. N. (2000). Apple tree physiology: Implications for orchard and tree management. *Compact Fruit Tree*, 33(3), 82–88.
- Zainali, S., Lu, S. M., Stridh, B., Avelin, A., Amaducci, S., Colauzzi, M., & Campana, P. E. (2023). Direct and diffuse shading factors modelling for the most representative agrivoltaic system layouts. *Applied Energy*, 339, 120981. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120981>.
- Zainali, S., Qadir, O., Parlak, S. C., Lu, S. M., Avelin, A., Stridh, B., & Campana, P. E. (2022). Computational fluid dynamics modelling of microclimate for a vertical agrivoltaic system. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.01971>.
- Zarco-Tejada, P. J., González-Dugo, V., & Berni, J. A. J. (2012). Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment*, 117, 322–337. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.007>.
- Zhang, J., Xu, W., Dou, Z., Pan, L., Wan, T., An, F., Yang, Z., & Cai, Y. (2025). Effect of Yangling inclined trellis tree shape on light interception efficiency, fruit quality, and yield of sweet cherry cv. ‘Jimei’. *PLOS ONE*, 20(3), e0317101. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0317101>.
- Zhang, W., Hendriks, P.-W., Uchanski, M., Page, S., Renwick, A., Maxwell, T., Kaiser, C., Dong, J., & de Koning, W. (2025). Climatic and design tipping points in agrivoltaic crop production systems: A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 45, 69. <https://doi.org/10.1007/s13593-025-01060-z>.
- Zotti, M., Mazzoleni, S., Mercaldo, L. V., Della Noce, M., Ferrara, M., Delli Veneri, P., Diano, M., Esposito, S., & Carteni, F. (2024). Testing the effect of semi-transparent spectrally selective thin-film photovoltaics for agrivoltaic application: A multi-experimental and multi-specific approach. *Heliyon*, 10(4), e26323. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26323>.



ISBN: 978-606-764-102-8