

Agro-fotovoltaikus rendszerek létesítésének lehetőségei és potenciális szerepük a modern villamosenergia-rendszerben

RÁDLI-BURJÁN BERNADETT¹

Bevezetés

A globális energiaigény és az élelmiszer-termelési igény egyidejű növekedése egyre erősebb földhasználati konfliktust eredményez. A megújuló villamosenergia-termelés bővítésében a fotovoltaikus rendszerek kiemelt szerepet töltenek be, ugyanakkor a nagy kiterjedésű naperőművek jelentős földterületet igényelnek [1], [2]. Magyarországon a dekarbonizációs célok és a megújulóenergia-résarány növelése várhatóan tovább erősíti a napelemes kapacitások bővülését, miközben a mezőgazdasági területek védelme stratégiai érdek [3].

Az agro-fotovoltaikus rendszerek célja, hogy ugyanazon földterületen egyszerre valósuljon meg villamosenergia-termelés és mezőgazdasági hasznosítás. E kettős földhasználat akkor tekinthető sikeresnek, ha a napelemes alrendszer és a növénytermesztési alrendszer nem csupán fizikailag fér meg egymás mellett, hanem kölcsönhatásaik is mérték, optimalizáltak. Kutatásom központi kérdése, hogy milyen szerkezeti kialakítás és vezérlési stratégia mellett tartható fenn a növénykultúra számára szükséges fényellátottság úgy, hogy közben a villamosenergia-termelés gazdaságilag és energetikailag is releváns maradjon.

Szakirodalmi áttekintés

Az agro-fotovoltaikus rendszerek alkalmazhatók állattenyésztési és növénytermesztési környezetben is. A kiskérődzők legeltetése viszonylag kisebb szerkezeti módosítással illeszthető meglévő naperőművekhez; ebben az esetben a növényzetkezelés részben kiváltható, miközben a panelek árnyékot és csapadék elleni védelmet biztosítanak [4]. Növénytermesztés esetén a kialakítás összetettebb: a sorközök növelésére, a panelek megemelésére, illetve a művelőgépek és termesztéstechnológiai műveletek helyigényének figyelembevételére van szükség [5].

Világszerte számos agro-fotovoltaikus rendszer található, melyek jellemzően kutatási szakaszban vannak. A technológiában Kína tart a legelőrébb, itt több mint 12GWp beépített teljesítményű agro-fotovoltaikus rendszer került már telepítésre, melyek lefedik a mezőgazdaság teljes spektrumát [6]. Európában Franciaországban dolgozták ki elsőként az

¹ Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola, Témavezető: Dr. Weltsch Zoltán, egyetemi docens, Vállalati szakértő: Dr. Fekete Rita, Munkáltató: ZalaZONE InnoTech Nonprofit Kft.

agro-fotovoltaikus rendszerek jogszabályi környezetét, valamint támogattak is ilyen projekteket összesen 15 MW beépített teljesítménnyel [7].

A napelempanelek a talajközeli mikroklímát is módosítják. A szakirodalom szerint mérsékelhetik a hőmérsékleti szélsőségeket, csökkenthetik a párolgási veszteséget, és mechanikai védelmet nyújthatnak az intenzív besugárzás, heves csapadék vagy jégeső ellen [7], [8]. Ezzel párhuzamosan a növényállomány párologtatása kedvezően befolyásolhatja a modulok üzemi hőmérsékletét, ami a fotovoltaikus teljesítmény szempontjából is releváns kölcsönhatás [9], [10]. A rendszertervezés legfontosabb kompromisszuma azonban a fény megosztása: a panelek által hasznosított sugárzás egy része nem jut el a növényállományhoz, ezért a fény térbeli és időbeli eloszlását kell értékelni [11], [12].

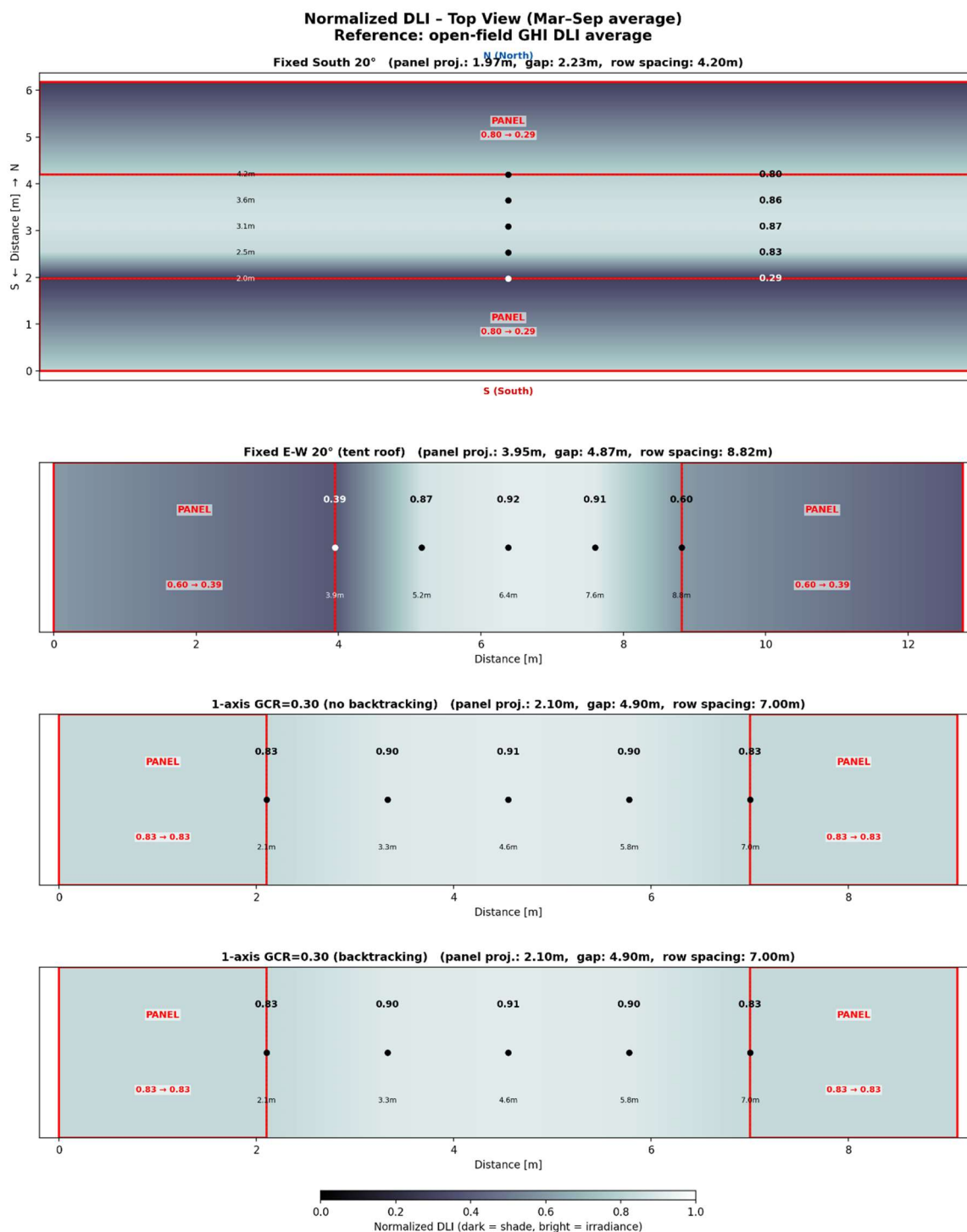
Energiatermelési és fényellátottsági szimulációk

Növényélettani szempontból nem az összes beeső rövidhullámú sugárzás, hanem a fotoszintetikusan aktív sugárzás (PAR, 400-700 nm) a meghatározó. A pillanatnyi megvilágítás helyett a növények számára a napi integrált fotonfluxus, vagyis a daily light integral (DLI; $\text{mol m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$) ad fiziológiailag értelmezhető mérőszámot, mely egyszerre veszi figyelembe a fényintenzitást és a megvilágítás időtartamát [13], [14]. A DLI alkalmazása lehetővé teszi, hogy az agro-fotovoltaikus konstrukciók ne csupán átlagos árnyékolási arány, hanem növényfaj-specifikus fényigény alapján legyenek összehasonlíthatók.

Szimulációim során egy 1 hektáros ($100 \times 100 \text{ m}$) referencia-területre telepíthető rendszereket vizsgáltam. Az összehasonlítás négy fő rendszerkialakításra terjedt ki: déli tájolású fix döntésű rendszerre, kelet-nyugati tájolású (sátortetős) fix rendszerre, egytengelyes napkövető rendszerre backtracking nélkül, valamint backtracking algoritmussal. A modellezés során azonos fotovoltaikus komponenseket használtam: Longi LR7-72HTH 610 modulokat és Huawei SUN2000-100KTL-M2 invertereket. A meteorológiai bemenetet Zalaegerszeg térségére vonatkozó tipikus meteorológiai év (TMY) adatai biztosították [15].

A DLI számításához az órás talajszinti globálsugárzási értékeket napi besugárzássá aggregáltam, majd a teljes rövidhullámú sugárzás PAR-hányadát 43%-nak, az energia-foton átváltási tényezőt pedig $4,57 \mu\text{mol J}^{-1}$ értéknek tekintettem [13], [14], [15]. Az adatok kiértékelése során két agronómiailag releváns időablakot különítettem el: a teljes vegetációs időszakot (március-szeptember), valamint a nyári intenzív növekedési időszakot (május-augusztus).

A növénytermesztési alkalmasságot küszöbérték-alapú megközelítéssel vizsgáltam. A vegetációs időszakban 10, 15, 20 és 25 mol m⁻² nap⁻¹, a nyári időszakban 15, 20, 25 és 30 mol m⁻² nap⁻¹ DLI-küszöböket alkalmaztam. Ezek a kategóriák az árnyéktűrő, közepes fényigényű, nagy fényigényű és nagyon nagy fényigényű kultúrák fényellátottsági igényeit közelítik [13], [16].



1. ábra Térbeli fényeloszlás

A szimulációim igazolták, hogy az agro-fotovoltaikus rendszerekben a fényellátottság nem homogén, és a teljes területre számított átlagos DLI önmagában nem elegendő a növénytermesztési alkalmasság megítélésére. A fix rendszerekben erős térbeli kontraszt alakul ki: a paneleksorok alatt tartósan alacsonyabb DLI értékek mérhetők, míg a sorköz középső zónáiban jelentősen nagyobb megvilágítás marad fenn. A déli fix rendszer aszimmetrikus árnyékolási profilt, a kelet-nyugati sátozott kialakítás pedig szimmetrikusabb, de szélesebb árnyékolt zónákat eredményezett.

Az egytengelyes napkövető rendszerek ezzel szemben a fényt időben és térben egyenletesebben osztják el. Alacsonyabb talajfedettségi arány (GCR) mellett a normalizált DLI a sorköz nagy részén 0,85 felett maradt, és még magasabb GCR esetén is kevésbé alakultak ki tartósan árnyékolt, alacsony DLI-jű zónák. A backtracking és a backtracking nélküli vezérlés között a szezonális átlagos DLI-küszöbök szintjén nem mutatkozott eltérés [17]. Az egytengelyes napkövető rendszerek a vizsgált GCR-tartományban az alkalmazott küszöbértékeknél gyakorlatilag a teljes területen biztosították a megfelelő szezonális fényellátottságot. Így kijelenthető, hogy a trackeres kialakítás jelentősen kedvezőbb agronómiai fénykörnyezetet teremt, mint a fix rendszerek.

Energetikai oldalról az éves AC energiatermelés minden konstrukcióban a GCR növekedésével emelkedett, mivel az egységnyi területre telepíthető modulkapacitás nőtt. A fajlagos hozam ezzel ellentétes tendenciát mutatott: a nagyobb GCR fokozott árnyékolási és geometriai veszteségei miatt csökkent a kWh/kWp érték. A rendszertervezési optimum tehát nem azonos a maximális telepített teljesítménnyel; azt a választott növénykultúra fényigénye, a villamosenergia-termelési cél és a földhasználati stratégia együttesen határozza meg.

Tesztrendszer előkészítése és kivitelezése

A kutatás része egy gyakorlati agro-fotovoltaikus tesztrendszer kialakítása. A rendszer önfogyasztást csökkentő, vissz-watt védelemmel ellátott naperőműként került kivitelezésre, amelyben a megtermelt villamos energia a telephely belső fogyasztását mérsékli, hálózati visszatáplálás nélkül [18]. A telephely idősoros fogyasztási adatai és a várható naperőművi termelés összevetése alapján az optimális AC oldali beépített teljesítmény 100 kW-ra adódott.

A naperőművi szerkezet alapját észak-déli irányú sorokból álló, egy tengelyen kelet-nyugati irányban forgatható tartószerkezet adja. Ez lehetőséget ad a hagyományos napkövetés és a növény fényigényeire optimalizált vezérlés összehasonlítására [17], [19]. A kijelölt területen 9 db észak-déli irányú sor kerül kialakításra; 6 sor hagyományos Longi LR7-72HTH 610

modulból, 3 sor pedig részben fényáteresztő kétoldalú modulból áll. A két modultípus együttes alkalmazása lehetővé teszi a fényáteresztés, a kétoldali hasznosítás és a mikroklimatikus hatások összevetését [20].



2. ábra Elkészült naperőművi rendszer

A növénykultúra kiválasztásánál elsődleges szempont volt az árnyéktűrés, a szélsőséges időjárási hatásokkal szembeni érzékenység, az öntözés és mechanikai védelem gyakori alkalmazása, a művelés helyigénye, valamint a termés gazdasági értéke. E szempontok alapján a málna megfelelő modellkultúrának tekinthető. A tesztrendszerben egy mediterrán klímához jobban illeszkedő Evita fajta és egy magyar nemesítésű Fertődi zamatos fajta került telepítésre. A napelemek alatti ültetvény mellett napelemek nélküli kontroll ültetvény is kialakításra került, azonos termesztéstechnológiai paraméterek mellett, hogy az agro-fotovoltaikus környezet hatásai elkülöníthetők legyenek a növénytermesztésben.

Szenzorrendszer kialakítása

A mérési rendszer célja, hogy az energiatermelési, mikroklimatikus és növénytermesztési paramétereket vizsgálata.

Az energiatermelés részletes vizsgálatához a szenzorrendszer méri a soronkénti energiatermelést, a feszültséget és az áramerősséget, valamint a napelempanelek hőmérsékletét szintén soronként.

A növénytermesztés szempontjából releváns mikroklimatikus adatok is rögzítésre kerülnek (talajnedvesség és talajhőmérséklet több mélységben; léghőmérséklet és páratartalom több magasságban; levélhőmérséklet) az agro-fotovoltaikus rendszerben és a kontrollültetvényben

egyaránt. A növénytermesztésre gyakorolt hatás részletes elemzéséhez vizsgálni fogom a fenológiai fázisokat, a terméstömeget, a bogyóméret, a színt, a cukortartalom, és további beltartalmi jellemzőket.

A szenzorrendszer rögzíti továbbá az általános időjárási adatokat, amelyek mind az energiatermelés, mind a növénytermesztés szempontjából relevánsak.

További kutatási feladatok

A tesztrendszer alkalmas lesz annak vizsgálatára, hogy a napelemes tartószerkezet milyen korlátokat és lehetőségeket jelent a málnatermesztés gépesíthetősége, automatizálhatósága és munkaszervezése szempontjából. A tartószerkezet magassága, a sorok távolsága, a forgó elemek üzemi tartománya és a kábelezés mind befolyásolja az alkalmazható gépek méretét és mozgásterét. Ugyanakkor a helyben rendelkezésre álló villamos energia elősegítheti az elektromos hajtású, szenzor vezérelt vagy autonóm eszközök alkalmazását.

A további kutatás egyik fő célja a forgatási algoritmus optimalizálása. A hagyományos napkövetés elsődlegesen az energiatermelést maximalizálja, míg a növénytermesztési célú vezérlésnek a DLI térbeli eloszlását, a kritikus fenológiai időszakokat és a túlzott besugárzás elleni védelmet is figyelembe kell vennie. A cél nem feltétlenül a maximális fény biztosítása, hanem az adott kultúra számára optimális fény- és mikroklímaállapot fenntartása a hozam és a minőség stabilizálása mellett.

Villamosenergia-rendszeri szempontból a decentralizált, időjárásfüggő termelés növekedése növeli a szabályozási tartalékok iránti igényt [21], [22]. A naperőművek hagyományosan főként lefelé irányuló szabályozást képesek biztosítani inverteres leszabályozással vagy forgatható rendszereknél a panelek optimális helyzetből való kiforgatásával [23]. Az agro-fotovoltaikus rendszerek sajátossága, hogy a növényfény-optimalizált működés bizonyos időszakokban tudatosan nem az energetikai maximumot követi. Ez elméletileg felszabályozási potenciált teremthet: ha a növénytermesztési célból visszafogott termelés rövid időre energetikai optimumhoz közelíthető anélkül, hogy a napi DLI-cél sérülne, a rendszer rugalmasabban illeszthető a villamosenergia-rendszer szabályozási igényeihez. Ennek számszerűsítése a következő kutatási szakasz egyik kiemelt feladata.

Hivatkozások

- [1] Enerdata, World Energy & Climate Statistics - Yearbook 2024, 2024.
- [2] Nemzeti Energia- és Klímaterv, 2023.
- [3] A. V. Klovov et al., A Mini-Review of Current Activities and Future Trends in Agrivoltaics, *Energies*, 16(7), 3009, 2023.
- [4] A. C. Andrew et al., Herbage Yield, Lamb Growth and Foraging Behavior in Agrivoltaic Production System, *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 659175, 2021.
- [5] Zimmermann PV-Agri, Agrivoltaic system solutions, 2025.
- [6] A. Chalgybayeva et al., Worldwide Research Trends in Agrivoltaic Systems - A Bibliometric Review, *Energies*, 16(2), 611, 2023.
- [7] M. Trommsdorff et al., Agrivoltaics: solar power generation and food production, in *Solar Energy Advancements in Agriculture and Food Production Systems*, Academic Press, 2022.
- [8] A. Weselek et al., Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops, *Agronomy for Sustainable Development*, 41, 59, 2021.
- [9] G. A. Barron-Gafford et al., Agrivoltaics provide mutual benefits across the food-energy-water nexus in drylands, *Nature Sustainability*, 2, 848-855, 2019.
- [10] C. Dupraz et al., Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use, *Renewable Energy*, 36(10), 2725-2732, 2011.
- [11] H. Marrou et al., Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels?, *Agricultural and Forest Meteorology*, 177, 117-132, 2013.
- [12] M. Laub et al., Contrasting yield responses at varying levels of shade suggest different suitability of crops for dual land-use systems, *Agronomy for Sustainable Development*, 42, 51, 2022.
- [13] P. C. Korczynski, J. Logan and J. E. Faust, Mapping Monthly Distribution of Daily Light Integrals, *HortTechnology*, 12(1), 2002.
- [14] K. J. McCree, The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants, *Agricultural Meteorology*, 9, 191-216, 1972.

- [15] M. Sengupta et al., The National Solar Radiation Data Base (NSRDB), Renewable and Sustainable Energy Reviews, 89, 51-60, 2018.
- [16] E. S. Runkle, DLI requirements, Greenhouse Product News / Michigan State University Extension, 2006.
- [17] E. Lorenzo, L. Narvarte and J. Munoz, Tracking and back-tracking, Progress in Photovoltaics, 19(6), 747-753, 2011.
- [18] E.ON, Kiserőművek csatlakozási lehetőségei, 2025.
- [19] H. Kabir et al., Analysis of Solar Panel Power Investigation using Fixed Axis and Tracking Systems, Elsevier, 2025.
- [20] R. Guerrero-Lemus et al., Bifacial solar photovoltaics - A technology review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 60, 1533-1549, 2016.
- [21] U. Shahzad et al., Protection of Distributed Generation, Energy and Power, 9, 614-653, 2017.
- [22] S. Chen, J. L. Mathieu and P. Seiler, The Effects of Renewable Power and Forecast Error Correlation on Balancing Reserve Needs, IEEE, 2018.
- [23] A. Narimani et al., Frequency regulation services from utility-scale solar PV plants, IEEE / renewable grid integration literature, 2017.