QURUQ VA ISSIQ IQLIM SHAROITIDA BIFATSIAL FOTOELEKTRIK PANELLAR ASOSIDAGI AGRIVOLTAIK QURILMALARNING GEOMETRIK PARAMETRLARINI ENERGETIK VA AGROTEXNIK MEZONLAR BO'YICHA ASOSLASH

Norqulov Xurshid Sharofiddin o‘g’li
norqulov0xurshid@gmail.com

Annotatsiya. Mazkur maqolada quruq va issiq iqlim sharoitida bifatsial fotoelektrik panellar asosida tashkil etiladigan agrivoltaik qurilmalarning geometrik parametrlarini energetik va agrotexnik mezonlar asosida tanlash masalalari o‘rganiladi. Panel qatorlari orasidagi masofa, o‘rnatish balandligi, qiyalik burchagi, azimut yo‘nalishi va yer yuzasining albedosi kabi omillarning elektr energiyasi ishlab chiqarish, ekinlarga tushadigan fotosintetik faol radiatsiya, tuproq namligi va sug‘orish samaradorligiga ta’siri tahlil qilinadi. Qurilmalarning energetik va agrotexnik ko‘rsatkichlarini kompleks baholash uchun matematik bog‘lanishlar hamda optimallashtirish mezonlari taklif etiladi. Tadqiqot natijasida agrivoltaik tizimlarni muayyan iqlim, ekin turi va agrotexnik talablar asosida loyihalash bo‘yicha ilmiy-amaliy tavsiyalar shakllantiriladi.

Kalit so‘zlar: agrivoltaika, bifatsial fotoelektrik panel, quruq iqlim, geometrik parametrlar, energetik samaradorlik, qatorlar oralig‘i, qiyalik burchagi, fotosintetik faol radiatsiya, suvdan foydalanish samaradorligi, agrotexnik mezonlar.

Аннотация. В данной статье рассматриваются вопросы выбора геометрических параметров агровольтаических устройств на основе двусторонних фотоэлектрических панелей в сухом и жарком климате с учетом энергетических и агротехнических критериев. Анализируется влияние таких факторов, как расстояние между рядами панелей, высота установки, угол наклона, азимутальное направление и альбедо земной поверхности, на выработку электроэнергии, фотосинтетически активное излучение, падающее на культуры, влажность почвы и эффективность орошения. Предложены математические зависимости и критерии оптимизации для комплексной оценки энергетических и агротехнических показателей устройств. В результате исследования сформулированы научно-практические рекомендации по проектированию агровольтаических систем с учетом специфики климата, типа культур и агротехнических требований.

Ключевые слова: агровольтаика, двусторонняя фотоэлектрическая панель, сухой климат, геометрические параметры, энергоэффективность, расстояние между рядами, угол наклона, фотосинтетически активное излучение, эффективность использования воды, агротехнические критерии.

Abstract. This article examines the geometric optimization of agrivoltaic systems based on bifacial photovoltaic modules under hot and arid climatic conditions. The effects of row spacing, mounting height, tilt angle, azimuth orientation, and ground albedo on electricity

generation, photosynthetically active radiation, soil moisture, and irrigation efficiency are analyzed. Mathematical relationships and integrated optimization criteria are proposed to assess the energy and agronomic performance of agrivoltaic installations. The study provides a methodological framework for selecting system configurations according to local climatic conditions, crop requirements, and agricultural machinery constraints.

Key words: agrivoltaics, bifacial photovoltaic modules, arid climate, geometric parameters, energy efficiency, row spacing, tilt angle, photosynthetically active radiation, water-use efficiency, agronomic criteria.

Kirish. Jahon miqyosida energiya iste'molining ortib borishi, suv resurslarining cheklanganligi va qishloq xo‘jaligi yerlaridan oqilona foydalanish zarurati qayta tiklanuvchi energiya texnologiyalarini an'anaviy ishlab chiqarish tizimlari bilan integratsiyalashni talab qilmoqda. Ayniqsa, quruq va issiq iqlim sharoitida quyosh radiatsiyasining yuqoriligi fotoelektrik energiya ishlab chiqarish uchun qulay imkoniyat yaratadi. Biroq bunday hududlarda yuqori havo harorati, kuchli bug‘lanish, tuproq namligining tez kamayishi va o‘simliklarning issiqlik stressiga uchrashi qishloq xo‘jaligi mahsuldorligiga salbiy ta'sir ko‘rsatishi mumkin. Mazkur sharoitda agrivoltaik texnologiyalar, ya'ni bir yer maydonida qishloq xo‘jaligi ekinlarini yetishtirish va elektr energiyasi ishlab chiqarishni birlashtiruvchi tizimlar alohida ilmiy-amaliy ahamiyatga ega. Agrivoltaik qurilmalarda fotoelektrik panellar ekinlar ustida, qatorlar orasida yoki vertikal holatda joylashtirilishi mumkin. Panel konstruksiyasining turi, geometrik o‘lchamlari va joylashish sxemasi elektr energiyasi ishlab chiqarish bilan bir qatorda o‘simliklar uchun mavjud yorug‘lik, tuproqning issiqlik rejimi va suv sarfiga ham ta'sir ko‘rsatadi.

Bifatsial fotoelektrik panellarning asosiy afzalligi shundaki, ular quyosh nurlanishini old va orqa sirtlari orqali elektr energiyasiga aylantirishi mumkin. Old sirtga to‘g‘ridan-to‘g‘ri va tarqoq nurlanish tushsa, orqa sirtga atmosfera va atrofdagi yuzalardan qaytgan nurlanish ham yetib boradi. Shu sababli panelning balandligi, qiyalik burchagi, qatorlar oralig‘i va yer yuzasining qaytaruvchanligi tizimning energetik ko‘rsatkichlarini belgilovchi muhim omillar hisoblanadi.

Agrivoltaik qurilmalarda geometrik parametrlarni faqat maksimal elektr energiyasi ishlab chiqarish nuqtayi nazaridan tanlash yetarli emas. Panellar orasidagi masofani kamaytirish yer maydonining birligiga to‘g‘ri keladigan o‘rnatilgan quvvatni oshirishi mumkin, ammo ekinlarga tushadigan quyosh nurlanishini cheklashi ehtimoli mavjud. Aksincha, qatorlar oralig‘ining ortishi o‘simliklar uchun yorug‘lik sharoitini yaxshilashi mumkin, biroq bir gektarga joylashtiriladigan fotoelektrik modullar sonini kamaytiradi. Shuning uchun quruq va issiq iqlim sharoitida agrivoltaik qurilmalarni loyihalashda energetik, agrotexnik va suv resurslaridan foydalanish ko‘rsatkichlarini o‘zaro muvofiqlashtirish zarur.

Tadqiqotning maqsadi quruq va issiq iqlim sharoitida bifatsial fotoelektrik panellar asosidagi agrivoltaik qurilmalarning geometrik parametrlarini elektr energiyasi ishlab chiqarish, ekinlarning yorug‘lik bilan ta'minlanishi, suvdan foydalanish samaradorligi va qishloq xo‘jaligi texnikasining ishlash talablarini hisobga olgan holda ilmiy asoslash.

Tadqiqot vazifalari: agrivoltaik qurilmalarning energetik va agrotexnik ko‘rsatkichlarini belgilovchi asosiy geometrik parametrlarni aniqlash, panel qatorlari oralig‘i, o‘rnatish balandligi va qiyalik burchagining o‘zaro bog‘liqligini tahlil qilish, bifatsial panellarning orqa

sirtiga tushadigan qaytgan nurlanishni baholash, ekinlar uchun fotosintetik faol radiatsiya va soyalangan maydon ulushini hisobga olish, energetik va agrotexnik mezonlar asosida parametrlarni optimallashtirish metodikasini ishlab chiqish.

Adabiyotlar tahlili. Agrivoltaik tizimlarni loyihalash bo‘yicha xalqaro tadqiqotlarda elektr energiyasi ishlab chiqarish va qishloq xo‘jaligi mahsuldorligi o‘rtasidagi muvozanat asosiy ilmiy muammolardan biri sifatida ko‘riladi. M. A. va boshqa tadqiqotchilar tomonidan ishlab chiqilgan texnologik yondashuvlar bilan bir qatorda, agrivoltaikaning turli konfiguratsiyalarini qiyosiy baholashga qaratilgan zamonaviy sharhlar panel geometriyasi, mikroiqlim va ekinlarning yorug‘likka bo‘lgan ehtiyojini birgalikda hisobga olish zarurligini ko‘rsatadi. 2024-yilda Renewable and Sustainable Energy Reviews jurnalida chop etilgan kompleks sharhda agrivoltaik tizimlarning texnik, ekologik va ijtimoiy jihatlari, jumladan, ekin turi, elektr energiyasi ishlab chiqarish, suvdan foydalanish va yer samaradorligi o‘rtasidagi munosabatlar tahlil qilingan [1]. Ushbu ish agrivoltaik tizimni faqat fotoelektrik qurilma sifatida emas, balki energetika va qishloq xo‘jaligi faoliyatini birlashtiruvchi kompleks tizim sifatida ko‘rish zarurligini asoslaydi.

Bifatsial fotoelektrik texnologiyalar bo‘yicha Overview of the Fundamentals and Applications of Bifacial Photovoltaic Technology: Agrivoltaics and Aquavoltaics nomli ilmiy sharhda panellarning balandligi, qatorlar oralig‘i, qiyalik burchagi va yer sirtining albedosi kabi parametrlar energetik natijalarga ta’sir etuvchi omillar sifatida ko‘rib chiqilgan [2]. Ushbu manbada agrivoltaik qurilmalar uchun panel balandligi va qatorlar oralig‘ini ekinlar hamda foydalaniladigan yer maydonining xususiyatlariga mos ravishda tanlash zarurligi qayd etiladi. 2022-yilda Renewable Energy jurnalida e’lon qilingan tadqiqotda bifatsial panellarning qattiq o‘rnatilgan va kuzatuv mexanizmiga ega konfiguratsiyalari ostida fotosintetik faol radiatsiyaning fazoviy-vaqt bo‘yicha taqsimlanishi o‘rganilgan [3]. Natijalar panel qatorlarining joylashishi o‘simliklar uchun yorug‘likning bir tekis taqsimlanishiga sezilarli ta’sir qilishini ko‘rsatadi. Bu holat qatorlar oralig‘ini tanlashda faqat o‘rtacha nurlanishni emas, balki kun davomida hosil bo‘ladigan soya dinamikasini ham hisobga olish zarurligini anglatadi. 2025-yilda chop etilgan tizimli sharhda agrivoltaik tizimlarning mahsuldorligi, iqtisodiy samaradorligi va ekologik afzalliklari tahlil qilingan [4]. Tadqiqotda quruq va yarim quruq hududlarda soyalanishning suvdan foydalanish samaradorligi va ekinlar mikroiqlimiga ta’siri alohida ahamiyatga ega ekanligi ko‘rsatilgan. Shu bilan birga, elektr energiyasi va qishloq xo‘jaligi mahsulotlari bo‘yicha natijalar iqlim, ekin turi va qurilma geometriyasiga qarab o‘zgarishi ta’kidlangan. 2025-yilda Applied Energy jurnalida e’lon qilingan ishda bifatsial panellar asosidagi V-simon agrivoltaik konfiguratsiyaning energetik samaradorligi modellashtirish yordamida baholangan [5]. Tadqiqotda panel geometriyasi va quyosh kuzatuv mexanizmining elektr energiyasi ishlab chiqarish hamda yer maydonidan foydalanishga ta’siri ko‘rib chiqilgan. Ushbu yondashuv muayyan geometrik sxemalarni matematik modellashtirish orqali baholash mumkinligini ko‘rsatadi, biroq uning natijalarini boshqa iqlim va ekin sharoitlariga bevosita ko‘chirishdan oldin mahalliy parametrlar bilan tekshirish zarur. Adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, agrivoltaik qurilmalar uchun yagona universal geometriya mavjud emas. Optimal parametrlar quyosh radiatsiyasining mavsumiy taqsimoti, ekinlarning yorug‘likka talabi, tuproq yuzasining qaytaruvchanligi, sug‘orish usuli va qishloq xo‘jaligi texnikasining o‘lchamlariga bog‘liq. Shu sababli ushbu maqolada

parametrlarni kompleks energetik va agrotexnik mezonlar asosida tanlashga yo‘naltirilgan metodologik yondashuv taklif etiladi.

Muhokama. Quruq va issiq iqlim sharoitida bifatsial fotoelektrik panellar asosidagi agrivoltaik qurilmalarning geometrik parametrlarini tanlash elektr energiyasi ishlab chiqarish, qishloq xo‘jaligi ekinlarining biologik ehtiyojlari va suv resurslaridan foydalanish samaradorligi o‘rtasidagi murakkab bog‘liqlikni hisobga olishni talab etadi. Tadqiqot doirasida ko‘rib chiqilgan nazariy yondashuvlar shuni ko‘rsatadiki, panel qatorlari oralig‘i, o‘rnatish balandligi, qiyalik burchagi va yer yuzasining albedosi bir-biri bilan uzviy bog‘liq bo‘lib, ularning har biri agrivoltaik tizimning umumiy samaradorligiga turlicha ta’sir ko‘rsatadi. Birinchi navbatda, panel qatorlari orasidagi masofaning energetik va agrotexnik ko‘rsatkichlarga ta’sirini muhokama qilish lozim. Qatorlar oralig‘ining kamaytirilishi muayyan yer maydoniga ko‘proq fotoelektrik modullar joylashtirish imkonini beradi. Natijada bir gektar maydon hisobiga o‘rnatilgan quvvatni oshirish mumkin. Biroq qatorlar zich joylashtirilganda panellarning o‘zaro soyalanishi kuchayishi, bifatsial modullarning orqa sirtiga tushadigan qaytgan nurlanish kamayishi va ekinlar uchun mavjud fotosintetik faol radiatsiya cheklanishi mumkin. Aksincha, qatorlar oralig‘ining kengayishi o‘simliklarga tushadigan yorug‘lik miqdorini oshirishi va qishloq xo‘jaligi texnikasining harakatlanishini yengillashtirishi mumkin, lekin yer birligiga to‘g‘ri keladigan fotoelektrik quvvat zichligini kamaytiradi. Demak, qatorlar oralig‘ini tanlashda elektr energiyasi ishlab chiqarishning umumiy hajmi bilan ekinlar uchun zarur yorug‘lik sharoiti o‘rtasida maqbul muvozanatni ta’minlash zarur.

Panelni o‘rnatish balandligi ham agrivoltaik tizimning muhim geometrik parametrlaridan biridir. Panel balandligining oshirilishi ekinlar ustidagi bo‘shliqni kengaytirib, agrotexnik texnikaning ishlashi va ayrim hollarda yorug‘likning maydon bo‘ylab taqsimlanishini yaxshilashi mumkin. Balandroq konstruksiyalarda quyosh nurlarining panel ostidagi maydonga tushish geometriyasi ham o‘zgaradi. Shu bilan birga, tayanch konstruksiyalarining balandligi ortishi shamol yuklamalari, poydevor talablari, material sarfi va montaj xarajatlariga ta’sir qiladi. Shuning uchun panel balandligini oshirish har doim ham umumiy iqtisodiy samaradorlikning ortishini anglatmaydi. Ushbu parametr ekinlarning balandligi, foydalaniladigan texnikaning o‘lchamlari, xavfsizlik talablari va konstruktiv hisob-kitoblar asosida aniqlanishi lozim. Qiyalik burchagining ta’siri ham ikki tomonlama xususiyatga ega. Energetik nuqtayi nazardan, panelning qiyalik burchagi quyosh nurlarining old va orqa sirtlarga tushishiga, kunlik va mavsumiy elektr energiyasi ishlab chiqarishga ta’sir ko‘rsatadi. Agrotexnik jihatdan esa qiyalik burchagi panel soyasining uzunligi, shakli va vaqt bo‘yicha siljishini belgilaydi. Muayyan sharoitlarda kichikroq qiyalik burchagi soyaning geometrik taqsimlanishini o‘zgartirib, ekinlarga tushadigan radiatsiya miqdorini oshirishi mumkin. Biroq eng maqbul burchakni faqat tush paytidagi quyosh holati bo‘yicha aniqlash yetarli emas. Yil davomida quyosh balandligining o‘zgarishi, ekinning vegetatsiya davri va elektr energiyasiga bo‘lgan talab profili ham hisobga olinishi kerak.

Bifatsial fotoelektrik panellarning o‘ziga xos xususiyati ularning orqa sirtidan ham elektr energiyasi olish imkoniyatidir. Ushbu imkoniyatdan samarali foydalanish yer yuzasining qaytaruvchanligi, panelning yerdan balandligi, qatorlar oralig‘i va orqa sirtning soyalanish darajasiga bog‘liq. Quruq va issiq iqlimli hududlarda tuproq yuzasining rangi, namligi, o‘simlik qoplami va ishlov berish holati albedoning o‘zgarishiga sabab bo‘lishi mumkin. Shu

bois bir xil geometrik parametrlar turli tuproq sharoitlarida bir xil energetik natija bermaydi. Bifatsiallikdan olinadigan qo‘shimcha energiyani baholashda faqat albedoni hisobga olish emas, balki panel orqa sirtiga tushadigan nurlanishning haqiqiy taqsimlanishini ham aniqlash zarur. Quruq va issiq iqlim sharoitida agrivoltaik qurilmalarning agrotexnik afzalliklari, ayniqsa, tuproq namligi va o‘simliklarning issiqlik rejimi bilan bog‘liq. Panellar hosil qiladigan soya tuproq yuzasiga tushadigan to‘g‘ridan-to‘g‘ri quyosh radiatsiyasini kamaytirib, ayrim sharoitlarda tuproq harorati va bevosita bug‘lanishni pasaytirishi mumkin. Bu holat sug‘orish oralig‘ini boshqarish va suvdan foydalanish samaradorligini yaxshilash uchun imkoniyat yaratadi. Biroq mazkur ta’sir barcha ekinlar va barcha tuproq sharoitlarida bir xil namoyon bo‘lmaydi. Ortiqcha soyalanish o‘simliklarning fotosintez faolligini cheklashi, biologik rivojlanishini sekinlashtirishi va hosildorlikka salbiy ta’sir ko‘rsatishi mumkin. Shu sababli soyalanishning suvni tejashga ta’siri hosildorlik, ekinning rivojlanish bosqichlari va sug‘orish rejimi bilan birgalikda baholanishi kerak. Ekinlarga tushadigan fotosintetik faol radiatsiya agrivoltaik tizimning agrotexnik samaradorligini aniqlashda muhim mezon hisoblanadi. Panel ostidagi maydonning o‘rtacha yoritilganligi yetarli bo‘lishi mumkin, biroq qatorlar orasida yoki panel tayanchlari yaqinida radiatsiya notekis taqsimlanishi ehtimoli mavjud. Bunday notekislik o‘simliklarning o‘sishi va hosilning maydon bo‘ylab bir xil shakllanishiga ta’sir qilishi mumkin. Shuning uchun agrivoltaik qurilmalarni baholashda faqat o‘rtacha PAR qiymatini emas, balki radiatsiyaning fazoviy taqsimlanishini, kun davomida o‘zgarishini va ekinning kritik fenologik bosqichlaridagi miqdorini ham hisobga olish maqsadga muvofiq.

Energetik va agrotexnik ko‘rsatkichlarni yagona tizimda baholash ko‘p mezonli optimallashtirish zarurligini ko‘rsatadi. Elektr energiyasini maksimal ishlab chiqarishga yo‘naltirilgan konfiguratsiya qishloq xo‘jaligi ekinlari uchun eng qulay sharoitni yaratmasligi mumkin. Xuddi shuningdek, ekinlar uchun maksimal ochiq maydonni saqlashga qaratilgan yechim fotoelektrik tizimning o‘rnatilgan quvvatini va elektr energiyasi ishlab chiqarish hajmini kamaytirishi mumkin. Shu sababli loyihalashda elektr energiyasi ishlab chiqarish, hosildorlik, suv sarfi, texnikaning ishlashi va konstruksiyaning iqtisodiy xarajatlari o‘zaro taqqoslanishi lozim. Yer ekvivalentligi koeffitsiyenti kabi integrallashgan ko‘rsatkichlar agrivoltaik tizimning yer resurslaridan foydalanish samaradorligini dastlabki baholashga yordam beradi, biroq ular iqtisodiy foyda va ekologik natijalarni to‘liq ifodalash uchun yetarli emas. Taklif etilgan metodologiyaning amaliy ahamiyati shundaki, u agrivoltaik qurilmalarning geometrik parametrlarini alohida ko‘rsatkichlar bo‘yicha emas, balki o‘zaro bog‘liq mezonlar asosida tanlash imkonini beradi. Dastlabki loyihalash bosqichida bir nechta qatorlar oralig‘i, panel balandligi va qiyalik burchagi variantlarini modellashtirish, keyinchalik ularni mahalliy meteorologik va agrotexnik ma’lumotlar asosida taqqoslash tavsiya etiladi. Bunda quyosh radiatsiyasi, modul harorati, orqa sirt nurlanishi, tuproq namligi, PAR, hosildorlik va sug‘orish suvi sarfi bo‘yicha ma’lumotlarni birgalikda yig‘ish muhimdir.

Mazkur muhokamaning cheklovi shundaki, ko‘rib chiqilgan xulosalar nazariy tahlil va matematik bog‘lanishlarga asoslangan bo‘lib, muayyan hududda o‘tkazilgan dala tajribasi natijalari bilan tasdiqlanmagan. Shu sababli geometrik parametrlarning aniq optimal qiymatlarini belgilash uchun mahalliy iqlim ma’lumotlari, tanlangan ekinning biologik xususiyatlari va tajriba maydonidagi o‘lchovlardan foydalanish zarur. Kelgusidagi tadqiqotlarda turli qatorlar oralig‘i va qiyalik burchagiga ega tajriba variantlarini taqqoslash,

ularning elektr energiyasi ishlab chiqarishi, hosildorligi va suv sarfiga ta’sirini bir necha vegetatsiya davri davomida kuzatish ilmiy jihatdan asoslangan tavsiyalar ishlab chiqishga imkon beradi. Umuman olganda, muhokama natijalari bifatsial agrivoltaik qurilmalarning geometrik parametrlarini asoslashda energetik samaradorlik, ekinlarning yorug‘lik ehtiyoji, suvdan foydalanish samaradorligi va agrotexnik talablar birgalikda ko‘rib chiqilishi lozimligini ko‘rsatadi. Quruq va issiq iqlim sharoitida eng maqbul konfiguratsiya faqat mahalliy sharoitlarga moslashtirilgan modellashtirish va dala sinovlari orqali aniqlanishi mumkin.

Xulosa. Quruq va issiq iqlim sharoitida bifatsial fotoelektrik panellar asosidagi agrivoltaik qurilmalarni loyihalash energetik va agrotexnik talablarning o‘zaro muvofiqligini ta’minlashni talab qiladi. Panel qatorlari oralig‘i, o‘rnatish balandligi, qiyalik burchagi, azimut yo‘nalishi va yer sirtining albedosi elektr energiyasi ishlab chiqarish bilan bir qatorda ekinlarning yorug‘lik rejimi, suv sarfi va agrotexnik ishlarning tashkil etilishiga ham ta’sir ko‘rsatadi.

Tadqiqotning nazariy tahlili asosida quyidagi xulosalar shakllantirildi. Birinchidan, agrivoltaik qurilmalarning geometrik parametrlarini faqat fotoelektrik samaradorlikni maksimal darajaga yetkazish asosida tanlash maqsadga muvofiq emas. Elektr energiyasi ishlab chiqarish, ekin hosildorligi, suvdan foydalanish samaradorligi va texnikaning erkin harakatlanishi birgalikda baholanishi kerak. Ikkinchidan, bifatsial panellarning orqa sirtidan olinadigan qo‘shimcha energiya yer yuzasining albedosi, panel balandligi, qiyalik burchagi va qatorlar oralig‘iga bog‘liq. Shu sababli albedo qiymatini taxmin qilish o‘rniga, loyiha maydonida o‘lchash yoki tegishli ma’lumotlar asosida baholash tavsiya etiladi. Uchinchidan, panel qatorlari oralig‘ini aniqlashda soyaning faqat geometrik uzunligi emas, balki uning kunlik va mavsumiy davomiyligi hamda ekinlarga tushadigan fotosintetik faol radiatsiya hisobga olinishi lozim. Umuman olganda, bifatsial agrivoltaik tizimlarning samaradorligi energetika va qishloq xo‘jaligini alohida emas, balki o‘zaro bog‘liq tizim sifatida loyihalashga bog‘liq. Mazkur yondashuv quruq va issiq iqlimli hududlarda quyosh energiyasidan foydalanish, suv resurslarini tejash va qishloq xo‘jaligi ishlab chiqarishining barqarorligini ta’minlashga xizmat qilishi mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Comprehensive review on agrivoltaics: technical, environmental and societal insights // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2024. Vol. 197. Article 114416. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114416.
2. Overview of the Fundamentals and Applications of Bifacial Photovoltaic Technology: Agrivoltaics and Aquavoltaics // Energies. 2022. Vol. 15, No. 23. Article 8777. DOI: https://doi.org/10.3390/en15238777.
3. Implications of spatial-temporal shading in agrivoltaics under fixed tilt & tracking bifacial photovoltaic panels // Renewable Energy. 2022. Vol. 190. P. 167–176. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.078.
4. A systematic review of agrivoltaics: productivity, profitability, and environmental co-benefits // Sustainable Production and Consumption. 2025. Vol. 56. P. 13–36. DOI: https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.03.006.

5. Guarino S., Buscemi A., Chiaruzzi C., Lo Brano V. Modelling and analysis of V-shaped bifacial PV systems for agrivoltaic applications: A Python-based approach for energy optimization // Applied Energy. 2025. Vol. 389. Article 125785. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125785.
6. IEA PVPS Task 13. Best Practices for the Optimization of Bifacial Photovoltaic Tracking Systems. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. Mavjud: https://iea-pvps.org/key-topics/best-practices-for-the-optimization-of-bifacial-photovoltaic-tracking-systems/.
7. Barron-Gafford G. A. et al. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands // Nature Sustainability. 2019. Vol. 2. P. 848–855. DOI: https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5.