



AGROFOTOVOLTAIK TIZIMLARNI TOZALASHDA JAHON TAJRIBASI VA ULARNING SAMARASI

Muxtorjonov Shohruh Muzaffar o'g'li

Anotatsiya: Agrofotovoltaik tizimlarda fotoelektr modullarining changlanishi energiya ishlab chiqarishni kamaytirishi bilan birga o'simliklarga tushadigan yorug'lik rejimini o'zgartirib, hosildorlikka ham ta'sir qiladi; shu bois tozalash jarayoni energetik, agronomik va suv resurslari nuqtai nazaridan birgalikda optimallashtirilishi zarur. Ushbu tezis jahon tajribasini tahlil qilib, passiv yechimlar — antisoiling va gidrofob qoplamalar, dinamik burchak va stow holati — hamda aktiv yechimlar — quruq cho'tka va robotik tozalash, havo purkash, past sarfli yuvish, elektrostatik usullar — ni iqlim zonasi, chang yuklamasi va zarralar granulometriyasi, yog'in shamol rejimi, suv narxi va mavjudligi hamda ekin sezgirligiga ko'ra solishtiradi. Monitoring uchun arzon soiling sensorlari, PR va soiling indeksiga asoslangan chegaraviy tetiklar, masofadan turib kuzatuv va qayta ishlatiladigan suv bilan yuvish protokollari tavsiya etiladi; qaror qabul qilishda PR, LCOE, suv izi, LER va hosildorlik kabi ko'rsatkichlar birgalikda baholanadi. Natijada, quruq va changli hududlardan, jumladan Markaziy Osiyo, shuningdek nam iqlimlarga qo'llash mumkin bo'lgan ko'p mezonli tozalash kalendari va tanlov matritsasi taklif etiladi.

Kalit so'zlar: agrofotovoltaik, changlanish, tozalash strategiyalari, robotik va quruq tozalash, antisoiling qoplama, elektrostatik tozalash, PR va LCOE, suv izi.

Kirish

Agrofotovoltaik tizim qishloq xo'jaligi maydonida elektr energiyasi ishlab chiqarish va ekin yetishtirish jarayonlarini uyg'unlashtiradi. Quruq va changli hududlarda panellar yuzasida to'planadigan chang energiya hosilini pasaytiradi, modul haroratini oshiradi, massivda nomutanosiblik va yo'qotishlarni kuchaytiradi. Shu bilan birga ekinlar uchun yorug'lik maydonining bir xilligi buziladi, bu esa fotosintez rejimi va hosildorlikka salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin. Shuning uchun tozalash agrofotovoltaik tizimlarning muhim ekspluatatsion bosqichi sifatida ko'riladi va u energetik, agronomik hamda iqtisodiy natijalarni yaxshilashga xizmat qiladi.

Tozalashning asosiy samaralari quyidagilardan iborat:

1. Energetik samaradorlikning ortishi – nurlanishning real qabul qilinishi tiklanadi, performance ratio PR barqarorlashadi, quvvat va ishlab chiqarishdagi mavsumiy tebranishlar kamayadi.
2. Agronomik muvozanat – panellar ostidagi yorug'lik tarqalishi bir xillashadi, kunlik yorug'lik dozalari va fotosintetik foton oqimining barqarorligi ta'minlanadi, ekinlar stressi qisqaradi.
3. Ishonchlilik va xavfsizlik – issiq nuqtalar va yig'ma zanjirda ortiqcha qizish xavfi kamayadi, kontaktlar va kabel ulanishlaridagi yuklar normallasadi.

4. Resurs boshqaruvi – suvni tejovchi yoki suvsiz usullar orqali yuvish jarayoni optimallashtiriladi, qayta ishlatiladigan suv va filtrlash protokollari qoʻllanib, ekologik iz qisqartiriladi.

5. Operatsion iqtisodiyot – tozalash kalendari va triggerlar yordamida xizmat koʻrsatish davriyligi ilmiy asoslanadi, ishlab chiqarish tannarxi LCOE pasayadi, butun hayot sikli boʻyicha daromadlilik yaxshilanadi.

6. Tizim nazorati – arzon chang sensorlari, PR va soiling indeksi boʻyicha belgilangan chegaralar, masofadan monitoring va hisobotlar orqali qarorlar tezkor qabul qilinadi.

Jahon sharoitida chang yuklamasi, shamol va yogʻin rejimining oʻziga xosligi, sugʻorish suvi resurslarining cheklanganligi tozalash strategiyalarini ehtiyotkorlik bilan tanlashni talab etadi. Suv sarfini minimallashtiruvchi yoki suvsiz texnologiyalar, robotlashgan quruq tozalash va burchakni boshqarish kabi yechimlar mahalliy iqlim hamda ekin turlari bilan uygʻunlashtirilganda eng katta samara beradi. Ushbu ishda tozalashning passiv va aktiv usullari taqqoslanadi, koʻp mezonli tanlov matritsasi hamda mavsumiy tozalash kalendari taklif etiladi. Maqsad yer ekvivalent koeffitsienti LER, PR, LCOE va hosildorlik kabi koʻrsatkichlarni birgalikda yaxshilovchi amaliy yondashuvni shakllantirishdir.

Asosiy qism: Dunyo tajribasida APV panellarini tozalashning samarali texnikalari, davlatlar kesimida

APV maydonlarida tozalash texnologiyalari tanlovi iqlim zonasi, chang yuklamasi va zarralar granulometriyasi, yogʻin va shamol rejimi, suv resurslarining mavjudligi, xizmat koʻrsatish infratuzilmasi hamda ekinlarning sezgiriligiga tayangan holda amalga oshiriladi. Baholashda energiya ishlab chiqarishning tiklanishi va barqarorligi, PR koʻrsatkichining dinamikasi, LER, suv izi hamda LCOE kabi mezonlar birgalikda koʻrib chiqiladi. Maqsad energetik foyda, agronomik barqarorlik va ekologik izni muvozanatlashtirgan holda optimal ekspluatatsion yechimga erishishdir.

Quruq va suv sarfsiz robotik tozalash bugungi kunda eng koʻp tatbiq etilayotgan yondashuv hisoblanadi. Qatorlar boʻylab harakatlanuvchi avtonom qurilmalar choʻtka yoki havo purkash yordamida changni muntazam bartaraf etadi, suv logistikasi talab qilinmaydi, xizmat sikllari qisqa va takrorlanadigan boʻladi. Birlashgan Arab Amirliklarida Dubay energetika operatori yirik quyosh parklari uchun suvsiz robotik tozalashni amaliyotga kiritib samaradorlik va suv tejamkorligini oshirmoqda. Hindistonning Rajasthan hududida yirik ishlab chiqaruvchilar suvsiz robotlarni bosqichma bosqich joriy etmoqda. Isroil va boshqa mamlakatlarda masofadan boshqariladigan, trekerlarga mos modellar keng miqyosda qoʻllanmoqda. Ushbu yechim yuqori chang yuklamasida PR yoʻqotishlarini tez tiklashi hamda mavsumiy tebranishlarni kamaytirishi bilan ajralib turadi.

Avtomatlashtirilgan nam yuvish tizimlari deionizatsiyalangan suvni past bosimda purkash orqali mexanik ishqalanishsiz ishlaydi. Bu usul yopishqoq ifloslanish va shoʻrlanish kuzatiladigan maydonlar uchun foydali boʻlib, suvni qayta aylantirish va filtrlash bosqichlari ekologik izni pasaytiradi. Isroil va AQShdagi fermer xoʻjaliklarida doimiy jadvalga ulangan avtomatik yuvish tizimlari shoʻr dogʻlar va organik ifloslanishlarni tezda bartaraf etish amaliy natijasini koʻrsatmoqda. Tunda bajariladigan sikllar modul haroratini oshirmaydi va optik qatlamning degradatsiyasini cheklaydi.

Elektrostatik kontakt siz tozalash panel yuzasida elektr maydonini hosil qilib chang zarralarini ko'tarish va yuzadan siljitish tamoyiliga tayangan holda ishlaydi. Suv va cho'tka talab etilmaydi, yuzaga mexanik ta'sir minimal bo'ladi. AQShda ilmiy guruhlar sahro sharoitlariga mo'ljallangan prototiplarni dala sinovlariga olib chiqmoqda. Ushbu texnologiya quruq iqlimlar uchun istiqbolli yo'nalish bo'lib, amaliy joriy etishdan avval joyga xos namlik va chang tarkibi sharoitida sinovdan o'tkazishni talab qiladi.

Changga qarshi qoplamalar passiv himoya vositasi sifatida qo'llanadi. Hidrofob, fotokatalitik yoki antistatik sirtlar chang yopishishini kamaytiradi va yuvish davriyligini siyraklashtiradi.

Germaniyada olib borilgan dala tadqiqotlari shuni ko'rsatadiki, haqiqiy samaradorlik iqlim va chang granulometriyasiga kuchli bog'liq bo'ladi. Shu sababli qoplama tanlashdan oldin maydonning o'zida sinov o'tkazish, chidamlilikni va optik xossalarning vaqt bo'yicha o'zgarishini monitoring qilish zarur. APV sharoitida ekinlar va tuproq xavfsizligi bo'yicha ehtiyot choralarga qat'iy amal qilinadi.

Dizayn va ekspluatatsion optimallashtirish tozalash ehtiyojini tizimli ravishda kamaytiradi. Modul burchagi, qatorlar orasidagi masofa va yo'laklar changning tabiiy sirpanishini kuchaytiruvchi tarzda loyihalanadi. Kabel ulanishlari va issiq nuqtalar profilaktik nazorat qilinadi, yuklanish balanslanadi. Qatar tajribasi vertikalga yaqin sharq va g'arb yo'nalishli konfiguratsiyaning cho'l hududlarida chang to'planishini pasaytirish hamda yillik ishlab chiqarishni oshirish salohiyatiga ega ekanini ko'rsatmoqda. Bunday dizayn yechimlari APV agrotexnik talablari, texnika harakat yo'llari va tuproqni yemirilishdan himoya qiluvchi choralarga moslashtiriladi.

Monitoringga tayangan tozalash kalendari iqtisodiy va energetik optimumga erishishning asosiy vositasidir. PR trendlari, soiling indeksi, radiatsiya va quvvat o'lchovlari integratsiyalangan holda tahlil qilinadi va chegaraviy qiymatga yetilganda tozalash jarayoni ishga tushiriladi. Bu yondashuv ortiqcha yuvishlarni kamaytiradi, xizmat ko'rsatish xarajatlarini pasaytiradi va yo'qotilgan ishlab chiqarishni tez tiklaydi. Hisobotlar asosida mavsumlar bo'yicha hamda yilma yil solishtirishlar olib boriladi, irrigatsiya va ekin fenologiyasi bilan uyg'unlashgan ekspluatatsion jadval shakllantiriladi.

Yuqori soiling mintaqalaridagi dala kuzatuvlari texnologiya tanlovini yanada aniqroq qiladi. Chili hududidagi Atakama cho'lida uzoq muddatli o'lchovlar quruq mavsumda soiling yo'qotishlari katta bo'lishi mumkinligini ko'rsatgani sababli tozalash davriyligi qisqa sikllar asosida rejalashtiriladi. Qatar poligonlarida chang tarkibi, abraziv xavf va turli tozalash usullarining nisbiy ta'siri tizimli ravishda baholangan, bu esa joyga mos texnologik paketni shakllantirishda amaliy yo'riqnoma vazifasini bajaradi.

Umumlashtirilgan holda APV maydonlari uchun birlamchi tayanch yechim sifatida suv sarfsiz quruq robotik tozalash tavsiya etiladi. Yopishqoq ifloslanish kuchli bo'lgan sharoitda avtomatlashtirilgan nam yuvish qayta aylantirish bilan birga qo'llanadi. Qoplamalar faqat dalaviy sinov natijalari ijobiy bo'lganida tanlanadi. Cho'l sharoitida vertikal sharq va g'arb konfiguratsiyasi soilingni kamaytiruvchi dizayn yondashuvi bo'lishi mumkin. Qarorlar PR, LCOE, suv izi va LER ko'rsatkichlariga tayangan holda, real vaqt monitoringi ma'lumotlari asosida qabul qilinadi. O'zbekiston sharoitida suvni tejaydigan yoki umuman suv talab qilmaydigan texnologiyalar, qayta

aylantiriladigan suv sikli hamda ekinlarni himoya qiluvchi robot yo'llari va tuproqni mustahkamlovchi choralarga tayanish eng maqbul natijani beradi.

Qo'shimcha ilmiy-amaliy jihatlar

Tozalashni boshlash chegarasi iqtisodiy va meteorologik ma'lumotlarga tayangan holda aniqlanadi. Amaliy yondashuvda soiling natijasida yo'qotilgan energiya tiklanishidan olinadigan kutilgan daromad tozalash xarajatidan yuqori bo'lishi shart. Bu qaror quyosh nurlanishi prognozi, ehtimoliy yog'in voqealari va tariflar bilan birga baholanadi. Yog'in ehtimoli yuqori bo'lgan davrda yuvishni kechiktirish maqsadga muvofiq, ammo yopishqoq ifloslanish ustun bo'lgan sharoitda tabiiy yuvilish yetarli bo'lmasligi mumkin.

APV kontekstida tozalash ishlarini ekin fenologiyasi, o'sish fazalari va agrotexnik tadbirlar bilan muvofiqlashtirish zarur. Robotlarning harakat yo'llari ekinlarni shikastlamasligi, tuproq zichlanishi va changning qayta ko'tarilishi minimal darajada bo'lishi kerak. Kimyoviy vositalardan foydalanish cheklanadi, suv sifati barqaror nazorat qilinadi, oqova suv esa cho'kindi ajratish va filtrlashdan so'ng qayta aylantiriladi. Xavfsizlik nuqtai nazaridan elektr ulanishlarining mustahkamligi, izolyatsiya qarshiligi va yerga ulash ko'rsatkichlari muntazam tekshirilib boriladi, sensorlar va hisoblagichlarning kalibrlanishi esa PR bahosining ishonchliligini ta'minlaydi.

Umumlashtirilgan holda APV maydonlari uchun birlamchi tayanch yechim sifatida suv sarfsiz quruq robotik tozalash tavsiya etiladi. Yopishqoq ifloslanish kuchli bo'lgan sharoitda avtomatlashtirilgan nam yuvish qayta aylantirish bilan birga qo'llanadi. Qoplamalar faqat dalaviy sinov natijalari ijobiy bo'lganda tanlanadi. Cho'l sharoitida vertikal sharq va g'arb konfiguratsiyasi soilingni kamaytiruvchi dizayn yondashuvi bo'lishi mumkin. Qarorlar PR, LCOE, suv izi va LER ko'rsatkichlariga tayangan holda, real vaqt monitoringi ma'lumotlari asosida qabul qilinadi. O'zbekiston sharoitida suvni tejaydigan yoki umuman suv talab qilmaydigan texnologiyalar, qayta aylantiriladigan suv sikli hamda ekinlarni himoya qiluvchi robot yo'llari va tuproqni mustahkamlovchi choralarga tayanish eng maqbul natijani beradi.

Qisqa xulosa

Agrofotovoltaik panellarni tozalash energetik samaradorlikni tiklaydi, agronomik barqarorlikni mustahkamlaydi va hayot sikli tannarxini pasaytiradi. Jahon tajribasi shuni ko'rsatadiki, suv sarf qilmaydigan quruq robotik tozalash birlamchi tayanch yechim bo'lib, yuqori chang yuklamasida tez va barqaror natija beradi. Yopishqoq ifloslanish kuchli bo'lgan joylarda deionizatsiyalangan suvga tayanadigan avtomatlashtirilgan yuvish tizimlari qo'shimcha foyda beradi, suv esa qayta aylantirish orqali nazorat qilinadi. Qoplamalarning amaliy samarasini faqat dala sinovlari tasdiqlaydi, dizayn va ekspluatatsion optimallashtirish esa tozalash ehtiyojini tizimli ravishda kamaytiradi. Tozalash kalendari real vaqt monitoringiga, PR va soiling indeksi chegaralariga tayangan holda tuziladi, qarorlar LCOE, suv izi va LER kabi mezonlar bilan birgalikda baholanadi. O'zbekiston sharoitida suvni tejaydigan quruq robotik texnologiyalarni, zarurat tug'ilganda qayta aylantiriladigan suv sikli bilan nam yuvishni va ekin fenologiyasiga mos jadvalni qo'llash eng maqbul natija beradi.

Foydalanilgan adabiyotlar.

1. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998). *Ekinlarning evapotranspiratsiyasi: sugʻorish talablarini hisoblash boʻyicha qoʻllanma (FAO-56)*. FAO.
2. Dupraz, C. va boshq. (2011). *Quyosh PV panellari va ekinlarni birgalikda joylashtirish: yer resursidan optimal foydalanish*. Renewable Energy.
3. Barron-Gafford, G. A. va boshq. (2019). *Qurgʻoqchil hududlarda agrofotovoltaika: oziq-ovqat–energiya–suv (FEW) tizimida oʻzaro foyda*. Nature Sustainability.
4. Fraunhofer ISE (2020). *Agrofotovoltaika: qishloq xoʻjaligi va energetika oʻtishidagi imkoniyatlar (Qoʻllanma)*.
5. Marrou, H., Dufour, L., Wéry, J. (2013). *PV panellari soyasida yetishtirilgan salatlarda hosildorlik va nurlanishdan foydalanish samaradorligi*. European Journal of Agronomy.
6. Dinesh, H., Pearce, J. M. (2016). *Agrofotovoltaik tizimlarning salohiyati*. Renewable and Sustainable Energy Reviews.