



AGROFOTOVOLTAIK TIZIMLAR MONITORINGI: ARDUINO ASOSIDAGI MODULLI YONDASHUV

Shohrubbek Muxtorjonov Muzaffar og'li
Qayumov Javohir Abduqahhor o'g'li

Annotatsiya: Agrofotovoltai (APV) tizimlar qishloq xo'jaligi maydonida PV panellarni ekinlar bilan birgalikda joylashtirish orqali yer resursidan samarali foydalanish, mikroiklimni yumshatish va irrigatsiya yukini kamaytirish imkonini beradi. Biroq ekinlar hosildorligi, mikroiklim (PPFD/DLI, VPD, tuproq namligi) va elektr ishlash ko'rsatkichlari (quvvat, PR) o'rtasidagi muvozanatni dalada doimiy kuzatmasdan optimallashtirish qiyin. Ushbu tezis Arduino asosidagi modulli monitoring yondashuvini taklif etadi: yorug'lik (BH1750/PPFD), havo harorati/namligi (SHT3x), tuproq namligi/EC/harorat, barg harorati (IR), shamol va quyosh radiatsiyasi sensorlari, shuningdek, PV zanjiri kuchlanish/toki (INA219) kabi tugunlardan iborat sensor tarmog'i. Arxitektura SD-karta va RTC bilan ishonchli loglashni, RS-485/Modbus yoki ESP32 orqali Wi-Fi/LoRa telemetriyasini, chekka hisoblarda DLI, VPD, ET_o va outlier-filtrlashni ko'zda tutadi. Ma'lumotlar oqimi MQTT-Node-RED-InfluxDB-Grafana orqali vizuallashtiriladi. Kutilayotgan natijalar: (i) APV soyalanish darajasi va irrigatsiya qarorlarini dalaviy ma'lumotlar bilan bog'lash, (ii) PR va mikroiklim ko'rsatkichlari orasidagi korrelyatsiyalarni ochish, (iii) arzon, kengayadigan va replikasiya qilinadigan ochiq apparat-dasturiy platformani taqdim etish.

Kalit so'zlar: Agrofotovoltai; Arduino; Modulli monitoring; PPFD/DLI; VPD; ET_o; RS-485/Modbus; ESP32/LoRa; INA219; InfluxDB; Grafana; PR

Kirish

Qishloq xo'jaligida energiya, suv va yer resurslari o'rtasidagi raqobat keskinlashgani sari agrofotovoltai (APV) yondashuv yerning ikki maqsadli (oziq-ovqat va elektr) foydalanilishini ta'minlab, iqlim xavfini kamaytirishning istiqbolli yo'li sifatida qaralmoqda. PV panellari ostida yuzaga keladigan soya, konveksiya va bug'lanish sharoitlari ko'pincha havo/barg harorati va namlik rejimini yumshatadi, bu esa irrigatsiya ehtiyojini pasaytirishi va issiq stressini yengillashtirishi mumkin. Shu bilan birga, haddan tashqari soyalash fotosintetik foton oqimi zichligini (PPFD) cheklab, hosildorlikka salbiy ta'sir ko'rsatishi ehtimoli mavjud. Demak, APV konfiguratsiyasi (balandlik, qator oralig'i, GCR, burchak va boshqalar) bo'yicha optimal zona dalaviy ma'lumotlarga tayanib boshqarilishi lozim.

Amaliyotda ko'plab APV maydonlari cheklangan sensorlar yoki uzluksiz loglash infratuzilmasi bo'lmagani sababli, mikroiklim–ekin–energiya bog'liqligi yetarli darajada o'lchanmaydi. Sifatli, vaqtinchalik va makonsal jihatdan yetarlicha zich kuzatuv bo'lmasa, irrigatsiya jadvali, soyalanish darajasi, panellar tiltini boshqarish (agar dinamik bo'lsa) va texnik xizmat ko'rsatish qarorlari "taxmin"ga tayanib qoladi. Shu nuqtai nazardan, arzon, modulli va kengayadigan monitoring tizimi APV samaradorligini oshirishning kalit omilidir.

Ushbu ish Arduino/ESP32 ekotizimi asosida dalada tez o'rnatiladigan sensor tugunlarini taklif etadi. Optik yorug'lik o'lchagichlari (BH1750) va/savdo PPFd sensori yordamida fotosintetik nurlanish aniqlanadi; SHT3x havo harorati/namligi bo'yicha VPD chekka darajada hisoblanadi; tuproq namligi/EC/harorat probalari sug'orish bilan bog'liq mass-balansni kuzatadi; IR-pirometr barg haroratini qayd etadi; shamol sensori konvektiv sovishini baholaydi. PV tomonida INA219 kabi datchiklar kuchlanish/tok/ quvvatni o'lchab, Performance Ratio (PR) va ishlab chiqarish barqarorligini tahlil qilishga imkon beradi.

Ma'lumotlar uzluksizligi uchun RTC va SD-loglash qo'llanilib, aloqa qatlamida RS-485/Modbus (simli, shovqinga barqaror) yoki ESP32 asosida Wi-Fi/LoRa (simli imkon yo'q joylarda) yechimlari ishlatiladi. Chekka (edge) hisoblar DLI, VPD, ETo (FAO-56) kabi indikatorlarni on-site hisoblab, anomaliya-filtrlash va yo'qolgan qiymatlarni maskalashni amalga oshiradi; yuqori qatlamda esa MQTT–Node-RED–InfluxDB–Grafana zanjiri real vaqt vizualizatsiya va tahlilni ta'minlaydi.

Tadqiqotning maqsadi — APV maydonlari uchun ochiq, takrorlanadigan va iqtisodiy samarali monitoring platformasini ishlab chiqish hamda u orqali (i) soyalanish–mikroiklim–hosildorlik munosabatlarini dalaviy ma'lumotlar bilan tavsiflash, (ii) irrigatsiya va texnik xizmat ko'rsatish qarorlarini ma'lumotga asoslangan tarzda optimallashtirish, (iii) PV ishlash ko'rsatkichlarini mikroiklim dinamikasi bilan bog'lashdir. Asosiy tadqiqot savollari: Q1) APV soyalanish darajasining PPFd/DLI va VPD ga marginal ta'siri qanday? Q2) VPD/DLI/ETo ning dalaviy fluktuatsiyalarini inobatga olgan holda irrigatsiya jadvalini qanday sozlash mumkin? Q3) Mikroiklim ko'rsatkichlari bilan PR yoki quvvat ishlab chiqarishning barqarorligi o'rtasida qanday korrelyatsiyalar mavjud?

Kutilayotgan ilmiy/amaliy qo'shimcha qiymat — monitoring platformasining ochiq kodli (apparat va dasturiy) dizayni, ma'lumotlar modeli va QA/QC protokollarini taqdim etish, shuningdek, APV konfiguratsiya parametrlari bo'yicha tavsiya etilgan "ishchi oynalar"ni dalaviy tahlil asosida belgilashdir. Natijada, taklif etilayotgan modulli yondashuv nafaqat APV maydonlarida, balki issiqxona-APV integratsiyasi va suv tejovchi irrigatsiya tizimlarida ham qo'llanilishi mumkin.

Albatta. Quyida "Asosiy qism"ning **umumiy ko'rinishi** — keraksiz detallarni ayamasdan, konsepsiya va amaliy qadamlarga urg'u berildi.

Asosiy qism

1) Dolzarblik

Issiq to'lqinlar, suv tanqisligi va energiya narxlarining o'zgaruvchanligi sharoitida agrofotovoltaik (APV) yondashuv bir maydonda elektr ishlab chiqarish va dehqonchilikni uyg'unlashtiradi. Bunday tizimlarda uzluksiz, ishonchli va arzon monitoring bo'lmasa, soyalanish darajasi, sug'orish va texnik xizmat bo'yicha qarorlar

“taxmin”ga tayanib qoladi. Shuning uchun Arduino asosidagi modulli monitoring — hozirgi paytda tez joriy qilinadigan, iqtisodiy jihatdan maqbul yechimdir.

2) Maqsad va vazifalar

- APV maydonlari uchun modulli (bosqichma-bosqich kengayadigan) monitoring arxitekturasini taklif etish.

- Mikroiqim, tuproq hamda PV elektr ko‘rsatkichlarini bir tizimda yig‘ish, saqlash va vizuallashtirish.

- Qishloq xo‘jaligi qarorlarini (sug‘orish, soyalanish, xizmat) ma’lumotga asoslangan qilish.

3) Tizim arxitekturas

Sensor qismi

- *Mikroiqlim*: havo harorati/namligi, yorug‘lik/radiatsiya, shamol, barg harorati.

- *Tuproq*: namlik, elektr o‘tkazuvchanlik (sho‘rlanish belgisi), tuproq harorati.

- *PV elektr*: kuchlanish, tok, quvvat, panel/atrof harorati.

- Chekka (edge) hisoblash: asosiy ko‘rsatkichlarni joyida hisoblash (masalan, DLI, VPD, ET_o ning soddalashtirilgan baholari), xatolarni filtrlash.

- Aloqa va saqlash: simli (RS-485) yoki simsiz (Wi-Fi/LoRa) uzatish; lokal loglash va markaziy bazaga yuborish.

- Vizuallashtirish va tahlil: real vaqt grafiklari, hisobotlar, ogohlantirishlar (triggerlar).

4) Kuzatiladigan ko‘rsatkichlar

- Yorug‘lik/radiatsiya: fotosintez uchun dolzarb ko‘rsatkichlar (masalan, DLI) va soyalanish profili.

- Havo: harorat/namlik va VPD (issiq va qurg‘oqchil stress belgisi).

- Tuproq: namlik dinamikasi va sho‘rlanish xavfi (EC) bo‘yicha kuzatuv; sug‘orish samaradorligi.

- PV tomoni: kuchlanish–tok–quvvat, ishlash barqarorligi, PR kabi agregat ko‘rsatkichlar.

5) Ma’lumot oqimi va sifat nazorati

- Yig‘ish: sensorlar → chekka modul → markaziy bazaga uzatish (interval: 1–15 daqiqa).

- Sifat: avtomatik chetga chiqarish (outlier) filtrlari, yo‘qolgan qiymatlarni vaqtincha to‘ldirish, zaxira loglash.

- Boshqaruv: threshold asosidagi ogohlantirishlar (masalan, VPD haddan yuqori bo‘lsa, irrigatsiyani ko‘rib chiqish).

6) Joylashtirish yondashuvi

- Profil bo‘yicha punktlar: panel osti (ko‘p soya), qator cheti (yarim soya), ochiq nazorat nuqtasi — uchala sharoitni taqqoslash uchun.

- Balandlik va joylashuv: havo datchiklari odam bo‘yi balandlikda, yorug‘lik datchiklari ekin tepasida, tuproq probalari 2–3 chuqurlikda.

- Modullik: avval minimal to‘plam, keyin ehtiyojga qarab yangi sensor/gateway qo‘shish.

7) Qarorlarni qo‘llab-quvvatlash

- Sug'orish: tuproq namligi + VPD/ET₀ dinamikasi asosida jadvalni tuzatish; ortiqcha suv sarfini kamaytirish.
- Soyalanish va konfiguratsiya: DLI/yorug'lik xaritalari orqali qator oralig'i va balandlikni qayta ko'rib chiqish.
- Texnik xizmat: PV chiqishi va mikroiklim o'zgarishlaridagi g'ayrioddiy naqshlar bo'yicha erta ogohlantirish.
- Hosildorlik tahlili: mavsum yakunida ekin natijalari bilan mikroiklim va PR ko'rsatkichlarini bog'lash.

8) Kutilayotgan natijalar va ta'sir

- Suv tejamkorligi va hosil barqarorligi uchun ma'lumotga tayangan boshqaruv.
- APV konfiguratsiyasini lokal iqlimga moslashtirish (optimal soya).
- Iqtisodiy samaradorlik: arzon, ochiq va kengayadigan platforma orqali tez ROI.
- Replikatsiya: boshqa maydon va ekin turlariga oson ko'chirish.

9) Cheklovlar

- Arzon sensorlarda drift bo'lishi mumkin — mavsumiy tekshirish zarur.
- Simsiz aloqa qamrovi relyef va to'siqlarga sezgir — gateway joylashuvi muhim.
- Chang va namlik sharoitida korpus/konnektorlarni muntazam servis qilish talab etiladi.

Xulosa

Issiq to'lqinlar va suv tanqisligi sharoitida APV maydonlari uchun Arduino/ESP32 asosidagi modulli monitoring — tez joriy qilinadigan, arzon va kengayadigan yechim bo'lib, mikroiklim (T/RH, VPD), yorug'lik (PPFD/DLI), tuproq (namlik/EC/T) hamda PV elektr (V/I/P, PR) ko'rsatkichlarini bir zanjirda yig'ish–hisoblash–saqlash–vizuallashtirishni ta'minlaydi. RS-485/Wi-Fi/LoRa aloqa, RTC/SD zaxira loglash va chekka hisoblar (DLI, VPD, soddalashtirilgan ET₀) yordamida tizim real vaqtda ishonchli ma'lumot beradi, Node-RED → InfluxDB → Grafana oqimi esa qarorlarni (sug'orish, soyalanish, texnik xizmat) ma'lumotga tayangan holga keltiradi. Panel osti–qator cheti–ochiq nazorat nuqtalarida joylashtirish soyalanish gradientini ochib, konfiguratsiyani lokal iqlimga moslashtirishga xizmat qiladi; outlier-filtrlash, gap-fill va sensor sog'lig'i metrikalari ma'lumot sifatini barqaror ushlab turadi. Natijada suv tejallishi va hosil barqarorligi kuchayadi, PV ishlash ko'rsatkichlari va PR yaxshilanadi, ochiq apparat-dasturiy dizayn esa turli maydon va ekinlarda replikatsiya hamda tez ROI imkonini yaratadi. Mavjud xatarlar — arzon sensorlarda kalibr drifti, simsiz qamrov cheklovlari va chang/nemlik ta'siri — mavsumiy kalibrlash, to'g'ri gateway joylashuvi va IP65 himoya choralari bilan kamaytiriladi. Keyingi bosqich sifatida referens stansiya bilan dalaviy validatsiya, irrigatsiya va soyalanish uchun prediktiv (ML) boshqaruv, hamda batafsil iqtisodiy tahlil tavsiya etiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., & Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops: The concept of “agrivoltaics”. *Renewable Energy*, 36, 2725–2732.

2. Marrou, H., Dufour, L., & Wery, J. (2013). Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth limited by reduced light availability? *Agricultural and Forest Meteorology*, 177, 117–132.
3. Barron-Gafford, G. A., et al. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, 2, 848–855.
4. Weselek, A., et al. (2019). Agrivoltaic systems: Applications, challenges, and opportunities. *Agronomy for Sustainable Development*, 39, 35.
5. Dinesh, H., & Pearce, J. M. (2016). The potential of agrivoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 299–308.