

QUYOSH ELEKTR STANSIYALARINING SAMARADORLIGINI OSHIRISH USULLARI

Rahmonov Majidbek Zavqiy o'g'li

Jizzax politexnika instituti, Energetika muhandisligi fakulteti, 401-23 EE guruh talabasi

<https://doi.org/10.5281/zenodo.21715882>

Annotatsiya: Quyosh elektr stansiyasining samaradorligi faqat modul pasportida ko'rsatilgan foydali ish koeffitsienti bilan belgilanmaydi. Yillik energiya hosiliga quyosh resursi, modul harorati, changlanish, soyalanish, qatorlar oralig'i, MPPT va inverter ishlashi, kabel yo'qotishlari, trekerning mavjudligi, tarmoq cheklovlari hamda texnik xizmat sifati bir vaqtda ta'sir qiladi. Ushbu maqolada yuqori samarali modullar, optimal qiyalik va azimuth, bir o'qli trekerlar, bifasial panellar, passiv issiqlik boshqaruvi, holatga asoslangan tozalash, elektr zanjirini optimallashtirish, SCADA va sun'iy intellekt yordamida prediktiv xizmat ko'rsatish usullari sodda tilda, lekin muhandislik mezonlari bilan yoritiladi. O'zbekistonning quyosh salohiyati kontekstida 100 MWp stansiya uchun hisobiy ssenariy ham berilib, energiya o'sishi bilan CAPEX/OPEX va noaniqlik o'rtasidagi muvozanat ko'rsatiladi.

Kalit so'zlar: fotovoltaika, performance ratio, soiling, MPPT, inverter, bifasial modul, treker, SCADA, energiya hosili.

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Рахмонов Мажидбек Завкий ўғли

Джизакский политехнический институт, факультет энергетического инжиниринга,
студент группы 401-23 EE

Аннотация: Эффективность солнечной электростанции определяется не только коэффициентом полезного действия модуля, указанным в паспорте. На годовую выработку энергии одновременно влияют солнечный ресурс, температура модуля, загрязнение поверхности (soiling), затенение, расстояние между рядами, работа MPPT и инвертора, кабельные потери, наличие трекеров, сетевые ограничения, а также качество технического обслуживания. В данной статье простым языком, но с инженерной точностью рассматриваются высокоэффективные модули, оптимальный угол наклона и азимут, одноосные трекеры, бифациальные панели, пассивное управление температурным режимом, очистка на основе состояния, оптимизация электрической схемы, а также предиктивное обслуживание с помощью SCADA и искусственного интеллекта. В контексте солнечного потенциала Узбекистана приведён расчётный сценарий для станции мощностью 100 МВт, показывающий баланс между ростом выработки энергии, CAPEX/OPEX и неопределённостью.

Ключевые слова: фотовольтаика, коэффициент производительности (performance ratio), загрязнение поверхности (soiling), MPPT, инвертор, бифациальный модуль, трекер, SCADA, выработка энергии.

METHODS FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF SOLAR POWER PLANTS

Rahmonov Majidbek Zavqiy o'g'li

Jizzakh Polytechnic Institute, Faculty of Energy Engineering, student of group 401-23 EE

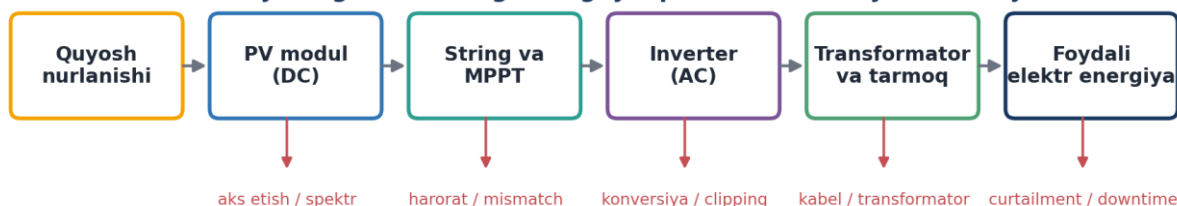
Abstract: The efficiency of a solar power plant is not determined solely by the module efficiency stated on its datasheet. Annual energy yield is simultaneously affected by the solar resource, module temperature, soiling, shading, row spacing, MPPT and inverter operation, cable losses, the presence of trackers, grid constraints, and the quality of maintenance. This article presents, in accessible language but with engineering rigor, methods such as high-efficiency modules, optimal tilt and azimuth, single-axis trackers, bifacial panels, passive thermal management, condition-based cleaning, electrical circuit optimization, and predictive maintenance using SCADA and artificial intelligence. In the context of Uzbekistan's solar potential, a calculation scenario for a 100 MWp plant is also provided, showing the balance between energy gain, CAPEX/OPEX, and uncertainty.

Keywords: photovoltaics, performance ratio, soiling, MPPT, inverter, bifacial module, tracker, SCADA, energy yield.

KIRISH

Fraunhofer ISE ma'lumotiga ko'ra, 2025-yil yakunida dunyodagi jami fotovoltaiik quvvat qariyb 2 974 GWp ga yetdi; tijoriy monokristalli kremniy modullarining samaradorligi esa o'n yil ichida taxminan 17% dan 25% ga yaqinlashdi [1]. Biroq modulning yuqori FIKi stansiya avtomatik ravishda yuqori yillik hosil beradi degani emas. Amaliy maqsad - bir xil o'rnatilgan quvvatdan ko'proq, barqarorroq va iqtisodiy jihatdan foydali AC energiya olishdir. Shuning uchun samaradorlikni yacheyka, modul, massiv, elektr zanjiri va butun stansiya darajasida alohida ko'rish kerak.

Samaradorlik - zanjirning har bir bo'g'inidagi yo'qotishlarni kamaytirish natijasi



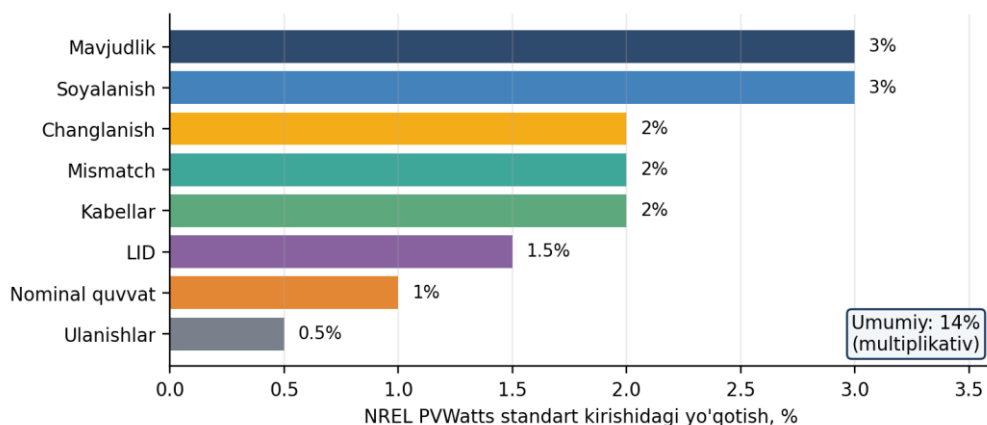
1-rasm. Quyosh elektr stansiyasidagi energiya zanjiri: har bir bosqichda kichik yo'qotishlarni kamaytirish yakunda katta MWh beradi.

MATERIALLAR VA METODLAR

Samaradorlikni to'g'ri baholash: faqat modul foizi yetarli emas

PV loyihada uchta ko'rsatkichni aralashtirmaslik muhim. Modul FIKi tushayotgan nurlanishning qanchasi elektr quvvatiga aylanishini bildiradi. Maxsus energiya hosili (specific yield) esa yil davomida har bir kWp o'rnatilgan quvvat qancha kWh berganini ko'rsatadi. Performance ratio (PR) ob-havo va nurlanish miqdorini hisobga olgan holda stansiyaning tizim sifatini baholaydi. PR yuqori bo'lsa, mavjud quyosh resursi elektr energiyasiga kamroq yo'qotish bilan aylantirilgan bo'ladi.

NREL PVWatts modelida inverterdan tashqari standart tizim yo'qotishlari changlanish, soylanish, mismatch, kabellar, ulanishlar, yorug'lik ta'siridagi dastlabki pasayish, nominal quvvat og'ishi va mavjudlikdan tuziladi. Ularning standart jami qiymati 14% bo'lib, oddiy yig'indi emas, ketma-ket ko'paytiriladigan kamaytirish koeffitsientlari orqali hisoblanadi [4]. Qurg'oqchil hududda changlanish 2% dan ancha yuqori, soyasi yo'q va yaxshi xizmat ko'rsatiladigan stansiyada esa boshqa ayrim yo'qotishlar pastroq bo'lishi mumkin.



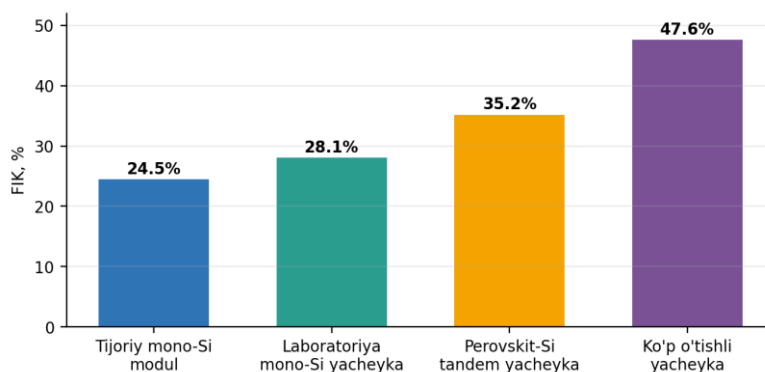
2-rasm. PVWatts V5 standart yo'qotish kirishlari [4]. Haqiqiy loyiha uchun qiymatlar joy bo'yicha o'lchanadi.

1-jadval. Ko'p loyihalarda uchraydigan yo'naltiruvchi diapazonlar; ular standart yoki kafolat emas.

Ko'rsatkich	Muhandislik diapazoni	Izoh
Modul FIKi	21-25%	Maydon cheklangan bo'lsa muhim; yillik MWhni yakka o'zi belgilamaydi
PR	0.75-0.88	Past PR - issiqlik, soiling, elektr yoki mavjudlik muammosining signali
Mavjudlik	>99% maqsad	Inverter, treker, tarmoq va rejalashtirilgan to'xtashlarni ajratish kerak
Soiling ratio	0.93-1.00	Tozalash chegarasi energiya narxi va xizmat xarajatiga bog'liq
Clipping	1-3%/yil	DC/AC nisbatini optimallashtirishda ataylab qabul qilinishi mumkin

Yuqori samarali modullar va optik yo'qotishlarni kamaytirish.

2026-yilgi Fraunhofer ISE hisobotida laboratoriya monokristalli kremniy yacheykasi uchun 28.1%, perovskit-kremniy tandem yacheykasi uchun 35.2% va yuqori konsentratsiyali ko'p o'tishli yacheyka uchun 47.6% rekord ko'rsatilgan. Tijoriy monokristalli kremniy modullari esa 25% ga yaqinlashgan [1]. Bu raqamlar texnologik zaxira borligini ko'rsatadi, ammo elektr stansiya uchun tanlov faqat eng katta FIK ustuniga qarab qilinmaydi.



3-rasm. Turli PV texnologiyalarining FIK darajalari. Ma'lumotlar [1] asosida; tijoriy modul qiymati yaqinlashtirilgan.

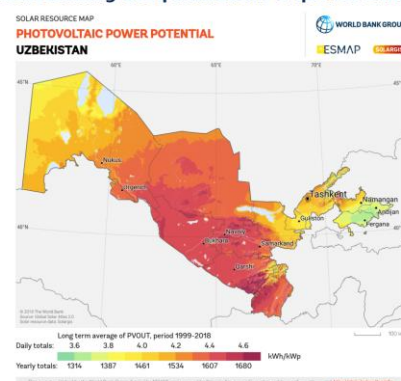
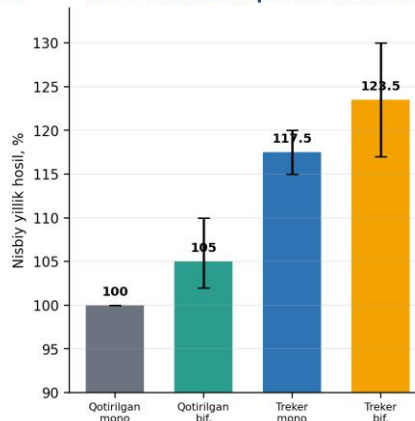
2-jadval. Texnologiyalar bo'yicha amaliy tanlov mezonlari; aniq qiymatlar ishlab chiqaruvchi datasheetiga bog'liq.

Texnologiya	Tipik modul FIKi	Kuchli tomoni	Loyiha tekshiruvi
PERC	20-22.5%	Keng tarqalgan, lekin yangi yirik loyihalarda ulushi kamaymoqda	LID/LeTID va yuqoriroq harorat sezgirligini tekshirish
n-type TOPCon	22-24.5%	Yuqori FIK, yaxshi bifasiallik, bozorda dominant yo'nalish	PID, UV va encapsulant sinovlarini bankability paketida ko'rish
HJT	22-24.5%	Past harorat koefitsienti va yuqori bifasiallik	Narx, ta'minot zanjiri va mexanik dizayn
Perovskit-Si tandem	26%+ maqsad	Maydon birligiga katta quvvat; R&D va ilk tijorat bosqichi	Uzoq muddatli barqarorlik, sertifikat va kafolat noaniqligi

Yuqori quvvatli modul va yuqori samarali modul bir xil tushuncha emas. Masalan, kattaroq yuza hisobiga 700 W modul olish mumkin, lekin uning FIKi kichikroq 450 W modulnikidan yuqori bo'lmisligi mumkin. Maydon, konstruksiya, kabel va mehnat xarajatlarini kamaytirish uchun W/m² hamda W/kg ko'rsatkichlari ko'riladi.

Optik yo'qotishlarni kamaytirish uchun anti-reflektiv qoplamali shisha, kichik soyali metall kontaktlar, yarim yacheyka va multi-busbar dizayni, to'g'ri modul orientatsiyasi, past burchakdagi nurlanish uchun yaxshi IAM xususiyati va bir xil rang-spektr javobiga ega stringlar muhim. Tanlovda kamida harorat koefitsienti, bifasiallik koefitsienti, yillik degradatsiya, birinchi yil pasayishi, PID/LeTID sinovlari, shamol-qor yuklari va kafolat shartlari birgalikda baholanadi.

Global Solar Atlas xaritasida O'zbekiston uchun uzoq muddatli PV quvvat salohiyati taxminan 1314-1680 kWh/kWp/yil oralig'ida ko'rsatiladi; eng yuqori ranglar Navoiy, Buxoro, Qashqadaryo va janubiy hududlarda ko'rinadi [5]. Bu dastlabki saralash uchun foydali, ammo bankable yield assessment o'rnini bosmaydi. Yakuniy loyiha kamida sun'iy yo'ldosh ma'lumotlari, joydagi nurlanish va meteorologik o'lchovlar, relief, albedo, chang, shamol, tarmoq va yer cheklovlarini birlashtirishi kerak.

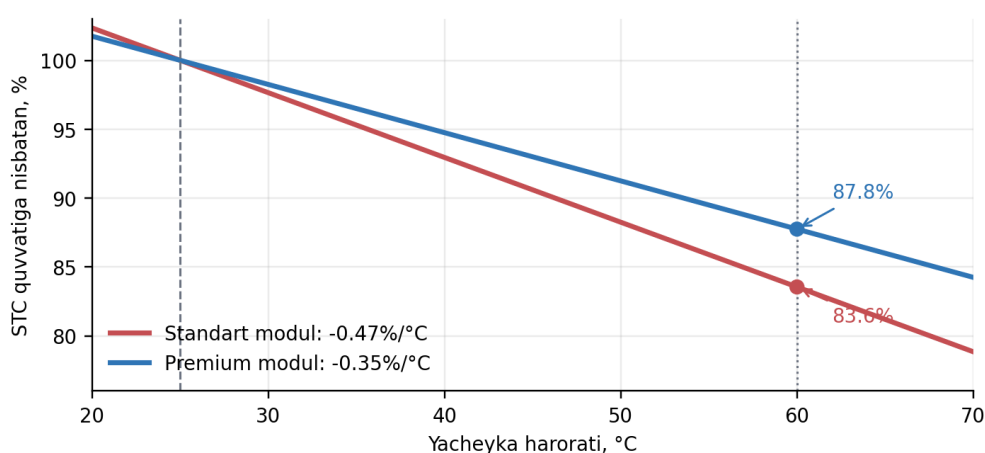
O'zbekistonning uzoq muddatli PV quvvat salohiyati**Treker va bifasial qo'shimcha hosili**

4-rasm. Chapda: World Bank/ESMAP Global Solar Atlas, Solargis (1999-2018 uzoq muddatli davr) [5]. O'ngda: IEA PVPS diapazonlari asosidagi nisbiy hosil [3].

Shimoliy yarimsharda yillik maksimum uchun modullar ko'pincha janubga yo'naltiriladi, qiyalik esa mahalliy kenglikka yaqin boshlang'ich nuqta sifatida olinadi. Lekin yakuniy burchak faqat astronomiyaga emas: yozgi yuk profili, qatorlar soyasi, shamol yuki, qor va changning sirpanishi, yer maydoni va tarmoqdagi energiya qiymatiga bog'liq. Sharq-g'arb sxemasi ayrim joylarda kunduzgi profilni tekislashi va yer birligiga ko'proq quvvat joylashtirishi mumkin, biroq bir kWp uchun yillik energiya janubiy optimal qiyalikdan pastroq bo'lishi ehtimol.

IEA PVPS bo'yicha bir o'qli trekerlarning odatiy yillik qo'shimcha hosili 15-20%, bifasial modullarniki 2-10% bo'lib, ularning ta'siri odatda qo'shiladi [3]. Buning uchun qator balandligi, pitch/GCR, orqa tomondagi soylanish, yer albedosi va kabellar orqa nurlanishni to'smasligi optimallashtiriladi. Backtracking ertalab va kechqurun qatorlararo soyani kamaytiradi. Shu bilan birga treker motorlari, reduktorlar, datchiklar va boshqaruv algoritmlari yangi nosozlik nuqtalarini yaratadi; kuchli shamol, do'l va qor uchun xavfsiz stow holati majburiy tekshiriladi.

Quyosh moduli yorug'likni yutganda uning katta qismi issiqlikka aylanadi. Yozgi ochiq kunda yacheyka harorati tashqi havodan 20-35°C yuqori bo'lishi mumkin. Kremniy yacheykasida harorat oshishi ochiq zanjir kuchlanishini pasaytiradi va natijada maksimal quvvat kamayadi. NREL PVWatts modelida eski 'standart' modul uchun -0.47%/°C, 'premium' modul uchun -0.35%/°C va thin-film uchun -0.20%/°C koeffitsient ishlatiladi [4]. Zamonaviy datasheetdagi aniq koeffitsient albatta loyihaga kiritiladi.



5-rasm. 60°C yacheyka haroratida -0.35%/°C modul taxminan 87.8%, -0.47%/°C modul esa 83.6% STC quvvatida ishlaydi [4].

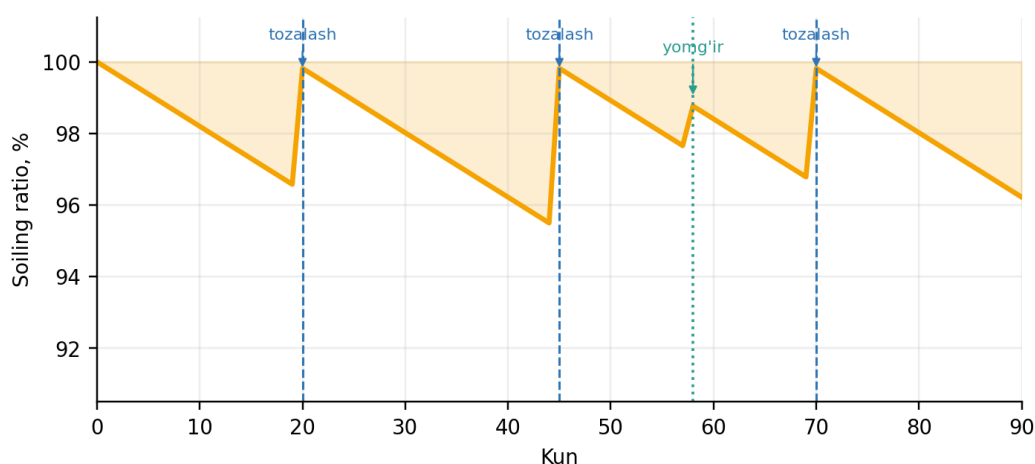
3-jadval. Haroratni kamaytirish usullarining tizim darajasidagi bahosi.

Usul	Kutiladigan foyda	Cheklov
Past gamma li modul	Yuqori haroratda to'g'ridan-to'g'ri ko'proq quvvat	Narx va degradatsiya bilan birga baholash
Ochiq-rack va yetarli klirens	Tabiiy konveksiya, orqa havo oqimi	Shamol yuki va konstruktsiya balandligi
Qatorlarni shamol yo'nalishiga moslash	Issiq havo cho'ntagini kamaytirish	Soyalanish va yer chegaralari bilan muvozanat
Passiv issiqlik tarqatuvchi	Kichik/roof tizimlarda foydali bo'lishi mumkin	Utility-scale uchun og'irlik va narx

Faol suv/havo sovitish	Laboratoriyada katta termal foyda	Nasos energiyasi, suv, mineral iz va O&M ko'pincha foydani kamaytiradi
------------------------	-----------------------------------	--

Katta yer usti stansiyalarida eng tejamkor yechim odatda faol sovitish emas, balki past harorat koefitsientli modul, yaxshi orqa ventilyatsiya, qatorlar oralig'ini to'g'ri tanlash va issiqlikni ushlab qolmaydigan konstruksiyadir. Tozalash ishlarini ertalab yoki kechqurun bajarish termik zarba xavfini kamaytiradi. Agar suv bilan sovitish taklif qilinsa, sof energiya foydasi - qo'shimcha MWh minus nasos energiyasi, suv tayyorlash, korroziya va xizmat xarajati - alohida isbotlanishi kerak.

IEA PVPS 2025-yilgi fakt varag'ida chang, ifloslanish va biologik qoldiqlar sababli soiling global miqyosda o'rtacha 4-7% energiya yo'qotishiga sabab bo'lishi qayd etiladi [2]. Qurg'oqchil, shamolli va yog'ingarchilik kam hududlarda yo'qotish mavsumiy ravishda bundan yuqori bo'lishi mumkin. Chang faqat yorug'likni to'smaydi: notekis qatlam yacheykalar orasida mismatch, bypass diod ishlashi va lokal qizish xavfini ham oshiradi.



6-rasm. Qurg'oqchil hudud uchun hisobiy 'arra tishi' modeli. IEA PVPS tozalash jadvalini soiling o'lchovi va ob-havo prognozi bilan optimallashtirishni tavsiya qiladi [2].

Eng yaxshi jadval 'har oyning birinchi kuni' kabi qattiq reja emas, balki iqtisodiy chegaraga asoslangan holatli boshqaruvdir. Tozalashdan qaytadigan energiyaning qiymati xizmat narxi, suv, robot amortizatsiyasi va modul qoplamasiga zarar xavfidan katta bo'lganda ish boshlanadi. Soddalashtirilgan shart: $C_{clean} < \Delta E \times V_{energy}$. Bu yerda ΔE - tozalash bilan qaytariladigan energiya, V_{energy} - har bir MWhning loyiha uchun qiymati.

Har bir yirik zona uchun toza/iflos etalon juftligi yoki optik soiling sensori o'rnatish; sensorni kalibrlash va driftni nazorat qilish.

Chang bo'ronidan keyin va yuqori nurlanish mavsumi oldidan ustuvor tozalash; kuchli yomg'ir yoki yangi chang hodisasidan oldin behuda ish qilmaslik.

Suv tanqis joyda yumshoq quruq robot, havo yoki minimal suvli usulni abrazivlik sinovi bilan tanlash; qattiq cho'tka anti-reflektiv qoplamani shikastlamasligi kerak.

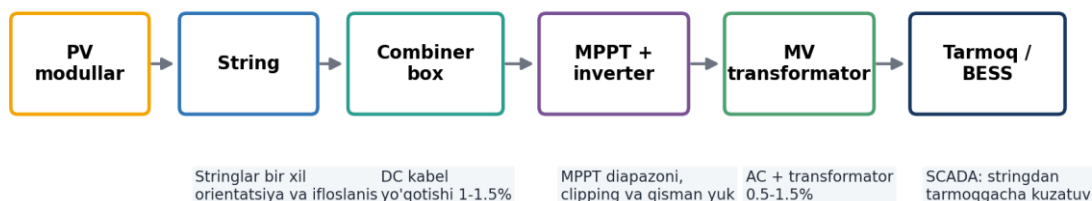
Qatorlararo va tashqi soya uchun 3D model, horizon profil, vegetation control va treker backtrackingdan foydalanish.

Dron termografiyasi bilan qush chiqindisi, singan shisha, hot-spot va bypass diod anomaliyasini ajratish; faqat RGB tasvirga tayanmaslik.

PV massivning eng yaxshi mexanik joylashuvi ham elektr zanjiri noto'g'ri loyihalansa kutilgan energiyani bermaydi. MPPT algoritmi modulning tok-kuchlanish xarakteristikasidagi maksimal quvvat nuqtasini kuzatadi. Bir MPPTga turli azimut, qiyalik, harorat yoki soyalanishga

ega stringlar ulansa, umumiy ish nuqtasi eng yaxshi stringlar quvvatini ham cheklashi mumkin. Shu sababli massiv elektr zonalarga ajratiladi va string darajasida tok hamda kuchlanish kuzatiladi.

Elektr zanjirini optimallashtirish: I²R, mismatch, clipping va nosozlik vaqtini birgalikda kamaytirish



7-rasm. Elektr zanjirida MPPT, kabel, inverter, transformator va SCADA bir tizim sifatida optimallashtiriladi.

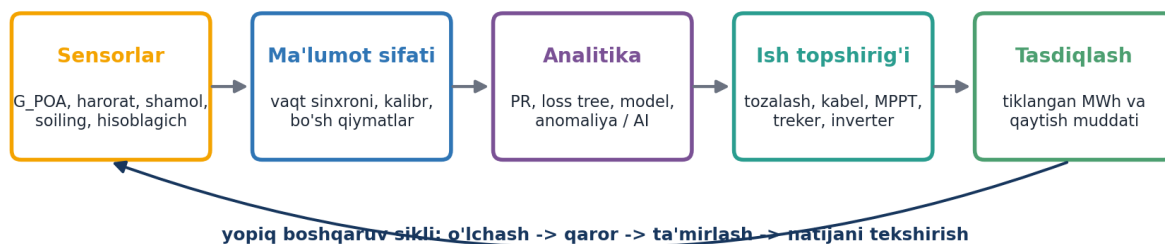
4-jadval. Dizayn maqsadlari; yakuniy qiymat datasheet, grid code va techno-economic model bilan aniqlanadi.

Parametr	Yo'naltiruvchi maqsad	Optimallashtirish mazmuni
DC/AC nisbati	1.10-1.35 ni ssenariy qilish	Ko'proq ertalab/kechki energiya, lekin clipping va issiqlik yukini tekshirish
DC kabel	1-1.5% gacha dizayn	Kesim, uzunlik, harorat va alyuminiy/misning hayotiy sikl narxi
AC + transformator	0.5-1.5%	Qisman yuk samaradorligi va reaktiv quvvat rejimi
Mismatch	<1-1.5% maqsad	Modul binning, string uzunligi va bir xil orientatsiya
Inverter mavjudligi	>99% maqsad	Zaxira qismlar, MTTR, servis shartnomasi va blok hajmi
Clipping	1-3%/yil ssenariy	Energiya qiymati, tarmoq limiti va inverter CAPEXiga qarab

PVWatts V5 uchun standart DC/AC nisbat 1.1, nominal inverter FIKi 96% deb olingan [4]; zamonaviy utility-scale inverterlar yuqoriroq samaradorlikka ega bo'lishi mumkin, lekin qisman yuk egri chizig'i, issiqda derating va reactive power talabi hal qiluvchi. Inverter blokini juda katta tanlash ertalab va bulutli soatlarda qisman yuk yo'qotishini oshiradi, juda kichik tanlash esa clippingni ko'paytiradi. Optimal nuqta soatlik meteorologiya, tarif, curtailment va uskuna narxi bilan topiladi.

Ekspluatatsiyada IV-curve tracing, combiner toklarining medianadan og'ishi, izolyatsiya qarshiligi, termografiya, transformator harorati va harmonikalar kuzatiladi. Nosozlikni 'quvvat yo'qoldi' degan umumiy signal emas, aniq loss tree orqali string, MPPT, inverter, transformator yoki tarmoq darajasiga ajratish tiklanish vaqtini qisqartiradi.

SCADA stansiyaning 'stetoskopi' bo'lib, yaxshi datchik va toza ma'lumotsiz eng kuchli sun'iy intellekt ham ishonchli tashxis qo'ya olmaydi. Utility-scale stansiyada kamida global va plane-of-array nurlanish, tashqi va modul harorati, shamol, yog'in, soiling, inverter va hisoblagich energiyasi, tarmoq holati o'lchanadi. Bifasial trekerda old/orqa POA nurlanishi, albedo, treker burchagi va qator ichidagi shamol ham muhim [3]. Sensorlar joylashuvi massivning haqiqiy sharoitini ifodalashi va o'zaro soylanmasligi kerak.



8-rasm. Raqamli boshqaruvning yopiq sikli: ma'lumot faqat amaliy ish va natija tekshiruvi bilan qiymat yaratadi.

5-jadval. Anomaliyani ehtimoliy sabab bilan bog'lash uchun oddiy diagnostika matritsasi.

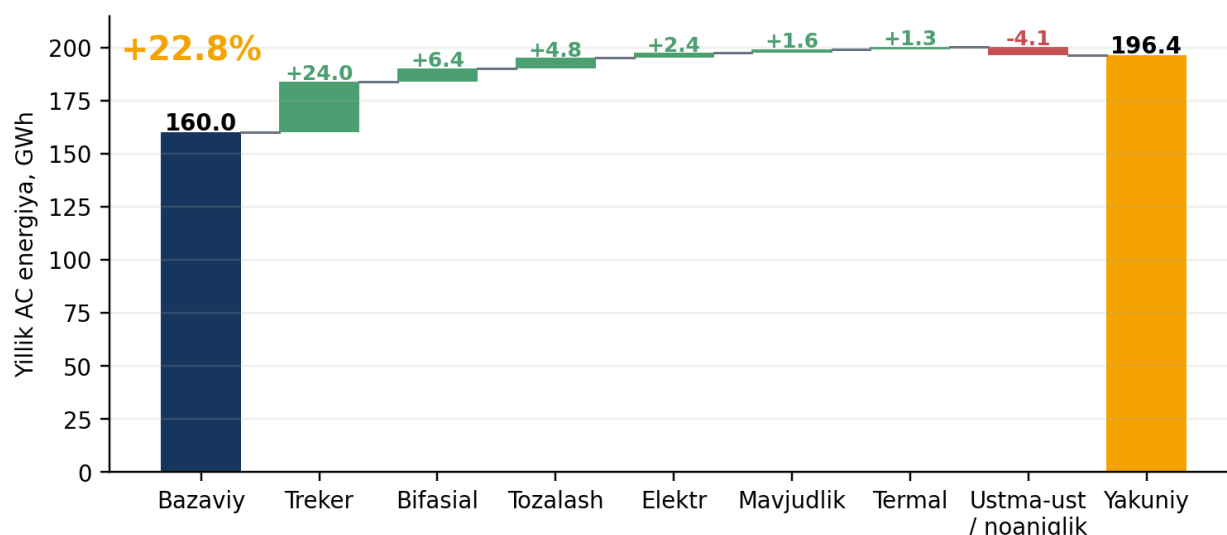
Signal	Ehtimoliy sabab	Tasdiqlovchi harakat
PR pasaydi, nurlanish normal	Soiling, termal derating, elektr yo'qotish yoki sensor drift	Etalon sensor, termografiya, loss tree
Bitta MPPT toki past	String uzilishi, fuse, konektor yoki notekis soya	String tekshiruvi va IV-curve
Treker burchagi buyruqdan farq qiladi	Motor, enkoder, mexanik tiqilish	Stow xavfsizligi va mexanik servis
Inverterda issiqda quvvat cheklanishi	Ventilyatsiya/filtr, ambient yoki noto'g'ri sizing	Derating egri chizig'i va HVAC
Hisobiy va o'lchangan nurlanish ajraladi	Sensor iflosligi, kalibr yoki vaqt sinxroni	Data quality bayrog'i va qayta kalibr

Mashinali o'rganish normal ishlab chiqarish modelidan og'ishni erta ko'rishi, kamera va termal tasvirlardan modul nuqsonlarini saralashi, changlanish tezligini prognoz qilishi va ehtiyot qismlar zaxirasini optimallashtirishi mumkin. Ammo modelni mavsumiy o'zgarish, curtailment, sensor xatosi va haqiqiy nosozlikni farqlaydigan sifatli belgilangan ma'lumot bilan o'qitish zarur. Har bir alarm uchun 'topilgan muammo - bajarilgan ish - tiklangan MWh' zanjiri saqlansa, tizim vaqt o'tishi bilan foydaliroq bo'ladi.

Batareya modulning fizik FIKini oshirmaydi; aksincha, zaryad-razryad yo'qotishi bor. Biroq u tarmoqqa beriladigan foydali energiya ulushini oshirishi mumkin: peshin curtailmentini yutadi, energiyani yuqori qiymatli soatga siljitadi, rampalarni yumshatadi va reaktiv quvvat xizmatini beradi. Shuning uchun BESS 'samaradorlik' emas, 'foydalanish va qiymat koeffitsienti' sifatida baholanadi; soatlik dispatch modeli va degradatsiya xarajati shart.

NATIJALAR

O'zbekiston sharoitida 100 MWp stansiya uchun integrallashgan hisobiy misol. Quyidagi modelda IEA PVPS diapazonlarining konservativ cheti va muhandislik tiklash farazlari qo'llanadi. Bir o'qli treker +15%, bifasial modul +4%, yaxshilangan tozalash +3%, elektr/MPPT optimallashtiruv +1.5%, mavjudlik +1% va termal-layout +0.8% gross foyda beradi. Bu usullar to'liq mustaqil emas: masalan, trekerning qiyaligi tozalashga, bifasial tok esa inverter clippingiga ta'sir qiladi. Shu sababli ustma-ust ta'sir va noaniqlik uchun 4.1 GWh kamaytirish kiritildi.



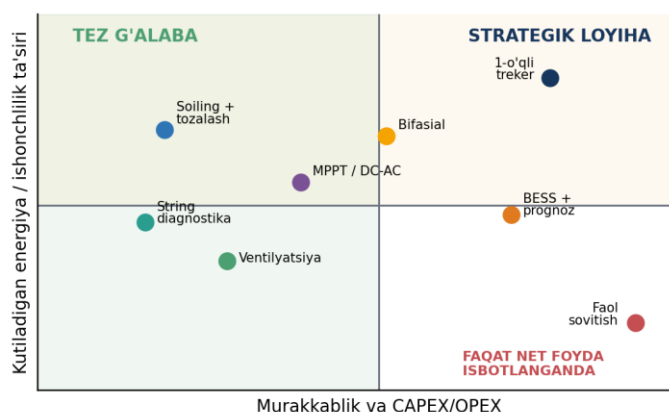
**9-rasm. Integrallashgan ssenariy: 160.0 GWh dan 196.4 GWh gacha, ya'ni +22.8%.
Bu hisobiy misol, bankable P50/P90 bahosi emas.**

6-jadval. Ssenariy komponentlari. Har bir loyiha uchun soatlik model, CAPEX/OPEX va noaniqliklar qayta hisoblanadi.

Chora	Hisobiy ta'sir	Asos	Asosiy xavf
Bir o'qli treker	+24.0 GWh	IEA tipik 15-20% diapazonining past chegarasi	Motor, shamol/do'l stow, O&M
Bifasial modul	+6.4 GWh	Bazaga nisbatan 4%; IEA 2-10% ichida	Albedo, GCR, orqa soya, yuqori tok
Soiling boshqaruvi	+4.8 GWh	Yo'qotishning bir qismini qaytarish	Suv/robot, abrazivlik, mavsum
MPPT va elektr	+2.4 GWh	Mismatch, kabel va clipping optimallasuvi	Uskuna va grid code
Mavjudlik	+1.6 GWh	MTTR, zaxira va servis bilan	Tarmoq downtimeini alohida ajratish
Termal-layout	+1.3 GWh	Past gamma va ventilyatsiya	Yillik foyda oniy foydadan kichik
Ustma-ust/noaniqlik	-4.1 GWh	Ikki marta sanashni kamaytirish	P50/P90 modelida batafsil

Agar qo'shimcha 36.4 GWh energiyaning shartli qiymati 40 USD/MWh deb olinsa, yalpi qo'shimcha tushum taxminan 1.46 mln USD/yil bo'ladi. Bu raqamdan treker va bifasial qo'shimcha CAPEXi, robot yoki suvli tozalash OPEXi, ehtiyot qismlar, sug'urta, moliyalashtirish va degradatsiya ayriladi. Demak, 'eng ko'p MWh' har doim 'eng katta NPV' emas. Muhandislik qarori energiya hosili, ishonchlilik, suv, yer, tarmoq va 25-30 yillik pul oqimini birgalikda optimallashtiradi.

MUHOKAMA



Ustuvor tamoyil

- Avval o'lg'ach, keyin investitsiya qiling.
- Tez qaytadigan O&M choralarini birinchi bajaring.
- Treker, bifasial va BESSni faqat bir xil soatlik modelda taqqoslang.
- Suv, qum, shamol va tarmoq cheklovlarini dizayn kirishi deb qabul qiling.
- Har bir choraning tiklangan MWhni dalil bilan tasdiqlang.

10-rasm. Ta'sir-murakkablik matritsasi: aniq joylashuv texnik-iqtisodiy hisobdan keyin o'zgaradi.

Tavsiya etiladigan ketma-ketlik

№	Amaliy qadam
1.	Kamida bir yillik joy o'lg'achini ishonchli sun'iy yo'ldosh qatori bilan korrelyatsiya qilish; GHI/DNI, POA, harorat, shamol, yog'in, albedo va changni bir vaqtda yig'ish.
2.	Qotirilgan, trekerli va bifasial variantlar uchun bir xil meteorologiya, grid limit va moliyaviy farazlarda P50/P90, LCOE va NPV hisobini bajarish.
3.	Past harorat koeffitsientli, bankability va degradatsiya dalili kuchli n-type modulni tanlash; datasheet FIKidan tashqari bifasiallik, PID/LeTID, mexanik yuk va kafolatni tekshirish.
4.	Soiling sensoriga asoslangan threshold tozalashni joriy qilish; suv balansi, abrazivlik, robot unumdorligi va yomg'ir/chang prognozini jadvalga qo'shish.
5.	String-MPPT arxitekturasi, kabel kesimi, DC/AC nisbat, inverter qisman yuk va clippingini soatlik model bilan optimallashtirish.
6.	SCADA ma'lumot sifati, loss tree, IV-curve, termografiya va zaxira qismlar bilan MTTRni kamaytirish; har bir ish uchun tiklangan MWhni qayd etish.
7.	BESSni faqat real curtailment, tarif arbitraji yoki grid service ehtiyoji bo'lsa, round-trip yo'qotishi va degradatsiya bilan hisoblash.

XULOSA

Quyosh elektr stansiyasining samaradorligini oshirish bitta mo'jizaviy qurilma bilan emas, balki o'lg'ach, to'g'ri dizayn va intizomli ekspluatatsiya bilan amalga oshadi. Eng katta texnik sakrash odatda yuqori FIKli n-type modul, joyga mos qiyalik yoki treker, bifasial dizayn va yaxshi elektr arxitekturasi orqali keladi. Eng tez iqtisodiy foyda esa ko'pincha changlanishni o'lg'ach tozalash, sensor xatosini tuzatish, nosoz string va trekerlarni erta topish, inverter mavjudligini oshirish kabi O&M choralaridan olinadi.

O'zbekistonning kuchli quyosh resursi katta imkoniyat yaratadi, lekin yuqori harorat, chang, suv tanqisligi va shamolni chetlab o'tib bo'lmaydi. Har bir chora gross energiya o'sishi bilan emas, sof MWh, 25-30 yillik NPV, ishonchlilik va ekologik resurs sarfi bilan baholansa, stansiya real sharoitda pasport qiymatiga yaqinroq va uzoq muddat barqaror ishlaydi.

Foydalanilgan manbalar

1. Fraunhofer ISE. Photovoltaics Report. Version dated 13 July 2026. Solar cell/module efficiencies, market and cost data.
2. IEA PVPS Task 13/16. Understanding, Measuring, and Mitigating Soiling Losses in PV Power Systems. Fact Sheet, September 2025.
3. IEA PVPS Task 13. Best Practices for the Optimization of Bifacial Photovoltaic Tracking Systems. Report T13-26:2024, August 2024.
4. Dobos, A. P. PVWatts Version 5 Manual. NREL/TP-6A20-62641, National Renewable Energy Laboratory, 2014.
5. World Bank Group / ESMAP; Solargis. Global Solar Atlas: Uzbekistan - Photovoltaic Power Potential Map and country data.
6. IEC 61724-1:2021. Photovoltaic system performance - Part 1: Monitoring.
7. IEA PVPS Task 13. Soiling Losses - Impact on the Performance of Photovoltaic Power Plants. Report T13-21:2022.
8. Green, M. A. et al. Solar Cell Efficiency Tables (Version 68). Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2026.