Ilmiy tadqiqotlar va ularning yechimlari jurnali
Aoka guvohnoma № 323759 ISSN: 3060-4818

QUYOSH FOTOELEKTR ENERGIYASIDA ISHLAYDIGAN AVTONOM ATMOSFERA SUV GENERATORINING ENERGIYA SAMARADORLIGI: FARG'ONA VODIYSI UCHUN PSIXROMETRIK MODEL, TAJRIBAVIY KALIBRLASH VA ISH REJIMINI OPTIMALLASHTIRISH

Mahammadjonov Qudratbek Ulug'bek o'g'li
Farg'ona davlat texnika universiteti
qudratbekmahammadjonov2002@gmail.com
https://doi.org/10.5281/zenodo.23274088

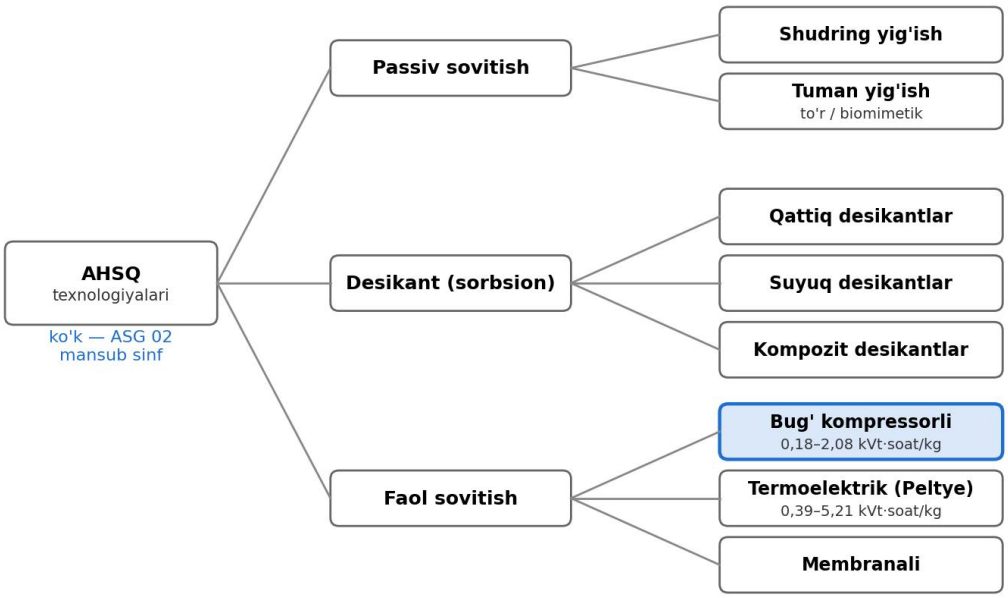
Annotatsiya. Bug' kompressorli atmosfera suv generatorlarining (AHSQ) solishtirma energiya sarfi (SES) yuqori bo'lib, quyosh fotoelektr stansiyasi (FES) bilan avtonom ishlaganda unumdorlikni bevosita cheklaydi; xorijiy qurilmalarning pasport ko'rsatkichlari (30 °C, 80 %) Farg'ona iqlimiga mos kelmaydi. Maqsad — ASG 02 (BWT-2) avtonom qurilmasi uchun eng kam energiya talab qiladigan ish rejimlarini nazariy va tajribaviy asoslash. Metodologiya. Farg'ona meteostansiyasining (WMO 38618) 1991–2020-yillar iqlim me'yorlari asosida kondensat (+5 °C) va muz (−3 °C) rejimlari uchun psixrometrik model tuzildi; model Trotec TTK 140S qurilmasining 24 nuqtali o'lchov ma'lumotlari bilan kalibrlandi va natijalar CPC–absorbsion hamda PV–kompressorli tizimlar bilan qiyoslandi. Natijalar. Aprel–oktabrda kondensat rejimi SESi 0,61–0,88 kVt·soat/l (ideal chegara), kalibrlangan real qiymat 1,52–2,52 kVt·soat/l; noyabr–martda suv faqat muz rejimida 1,09–1,56 kVt·soat/l sarf bilan olinadi. Kalibrlash tenglamasi $SES_{real} = 3{,}70 \cdot SES_{model} - 0{,}73$ ($R^2 = 0{,}937$; MAPE 10,8 %). Tungi rejim SESni 32–60 %, kondensator issiqligi bilan muz eritish 12–20 % kamaytiradi. PV–kompressorli sxema 1 m² quyosh yuzasidan yiliga ~254 l suv beradi — CPC–absorbsion tizimdan (Tehron, 172 l) 1,5 marta ko'p. Ilmiy yangilik — Farg'ona uchun oylik rejim xaritasi, model–tajriba tuzatish koeffitsiyenti va birinchi qonun asosidagi SES_{min} mezoni.
Kalit so'zlar: atmosfera havosidan suv olish; solishtirma energiya sarfi; psixrometrik model; kalibrlash; muz eritish; issiqlik rekuperatsiyasi; fotoelektr stansiya; Farg'ona vodiysi.

Abstract. Month-by-month specific energy consumption (SEC) of a PV-powered vapour-compression atmospheric water generator (ASG 02) is modelled for the 1991–2020 climate normals of Fergana (WMO 38618). The psychrometric model gives 0.61–0.88 kWh/L in condensate mode (April–October) and 1.09–1.56 kWh/L in frosting mode with condenser-heat defrost (November–March). Calibration against 24 measured points of a commercial dehumidifier yields $SEC_{real} = 3.70 \cdot SEC_{model} - 0.73$ ($R^2 = 0.937$), i.e. 1.52–2.52 kWh/L for an unoptimised unit. Night-time operation cuts SEC by 32–60 %, recuperative defrost by 12–20 %. Per square metre of solar aperture the PV–compressor route yields ~254 L/year versus 172 L/year for a CPC–absorption system in a comparable semi-arid climate.
Keywords: atmospheric water generation; specific energy consumption; psychrometric model; calibration; defrosting; photovoltaic system; Fergana valley.

1. Kirish

Dolzarblik. O'zbekistonning ko'plab qishloq hududlarida markazlashgan ichimlik suvi ta'minoti yo'q yoki uzilishlar bilan beriladi. Atmosferada ~14 ming km³ suv bug'i mavjud, bu daryo va ko'llardagi chuchuk suvdan (~1200 km³) bir necha barobar ko'p [25]. 2019-yilda atmosfera suv generatorlari bozori 2,1 mlrd AQSh dollariga baholangan, uning 98,9 % ini sovitib kondensatsiyalash usulidagi qurilmalar tashkil etgan [27]. Asosiy texnik to'siq — yuqori SES: suvning kondensatsiya issiqligining o'zi ~0,683 kVt·soat/l [22], amaldagi qurilmalarda SES iqlimga qarab 0,3–1,0 kVt·soat/l [9], quruq havoda 1,2 kVt·soat/l gacha [8].

Adabiyotlar tahlili. Havodan suv olish texnologiyalari uch guruhga bo'linadi (1-rasm): passiv sovitish, desikant (sorbsion) va faol sovitish [26]. Faol sovitish usulidagi qurilmalar ichida bug' kompressorli sxema eng tejamkor: UPC 0,18–2,08 kVt·soat/kg, termoelektrik (Peltye) qurilmalarda esa 0,39–5,21 kVt·soat/kg [26]. Termoelektrik sovitgichlar COP qiymati 0,1 dan past [24]. Bu xulosani Jeleznyak va hammualliflar [29] ham tasdiqlaydi: 200 Vt FES bilan ishlaydigan generatorda parokompressor, Stirling va termoelektrik mashinalar solishtirilib, eng yuqori unumdorlik parokompressor mashinada olingan (84; 48 va 2 l/sut), termoelektrik variantda solishtirma sarf 2,17 kVt·soat/l bo'lgan.



1-rasm. Havodan suv olish texnologiyalarining tasnifi ([26] asosida qayta ishlangan)

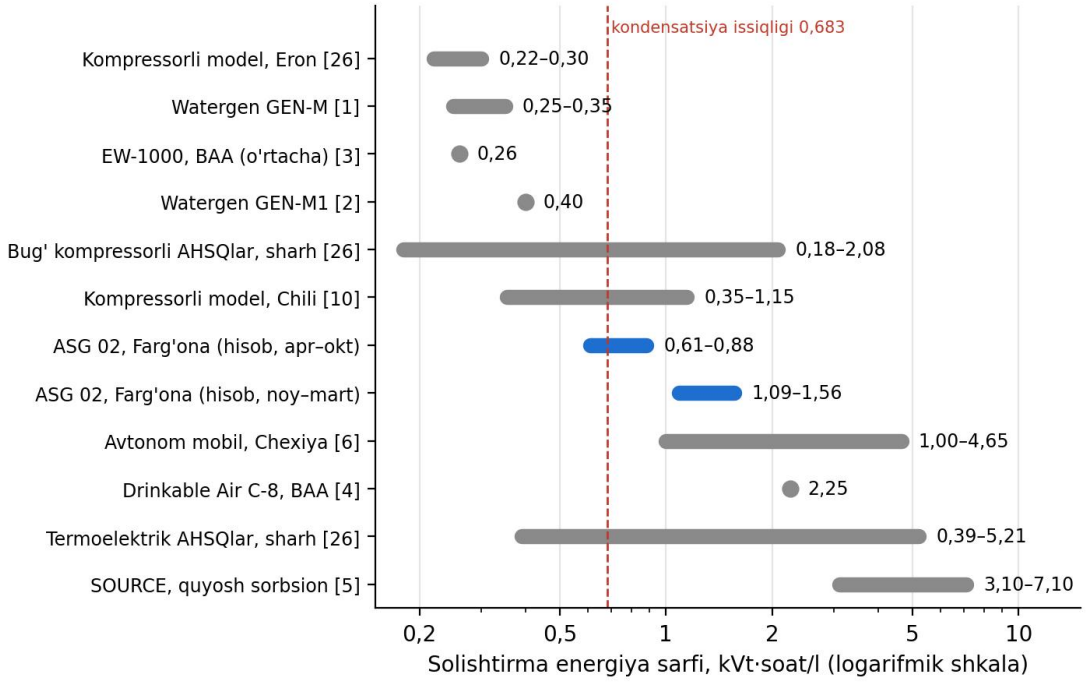
Tijorat qurilmalarining texnologik zanjiri bir xil (2-rasm): havo filtrlanadi, issiqlik almashtirgichda namlik kondensatsiyalanadi, xom suv bufer idishda yig'iladi, so'ng filtrlar va ultrabinafsha lampa orqali tozalanadi [25]. ASG 02 ham shu zanjirga ega; farqi — elektr ta'minoti quyosh FES va akkumulyatordan olinadi.



2-rasm. Kompressorli tijorat qurilmasining texnologik zanjiri (Watergen, [25] asosida qayta chizilgan)

Salek va hammualliflar [28] CPC kollektori va ammiak–suv absorbsion sikliga asoslangan quyosh-issiqlik AHSQ modelini uch xil iqlim uchun tahlil qilgan. Yillik suv hajmi Tehronda (yarim quruq) 1711 l, Bandar-Abbosda 4012 l, Ramsarda 3358 l; o'rtacha issiqlik SPC mos ravishda ~8; 3 va 3,5 kVt·soat/l. Tizim eksergiya yo'qotishlarining ~88 % i CPC kollektorga to'g'ri kelgan, eksergetik FIK 14–19 % ni tashkil etgan. Mualliflar tizim quruq havoda samaradorlikni keskin yo'qotishini asosiy cheklov sifatida ko'rsatgan.

Correia va hammualliflar [30] tijorat namlik yutgichini (Trotec TTK 140S, R290) iqlim kamerasida 22–35 °C va 40–70 % RH oralig'idagi 24 rejimda sinab, solishtirma sarf 0,73–4,40 kVt·soat/l ekanini o'lchagan. Ular PVGIS ma'lumotlari asosida 1 l/kun suv uchun zarur PV maydonini hisoblagan: eng og'ir oy bo'yicha Lissabonda 3,72 m², Pretoriyada 7,14 m², Er-Riyodda 8,80 m². Avtonom quyosh qurilmalari bo'yicha sharhlar unumdorlik odatda kuniga bir necha litrdan oshmasligini ko'rsatadi; mobil avtonom desikant–kompressor qurilma ~8 l/kun beradi, SES 1,00–4,65 kVt·soat/l [6]. Analoglarning solishtirma energiya sarfi 3-rasmda umumlashtirilgan.



3-rasm. Analoglar va ASG 02 ning solishtirma energiya sarfi (logarifmik shkala)

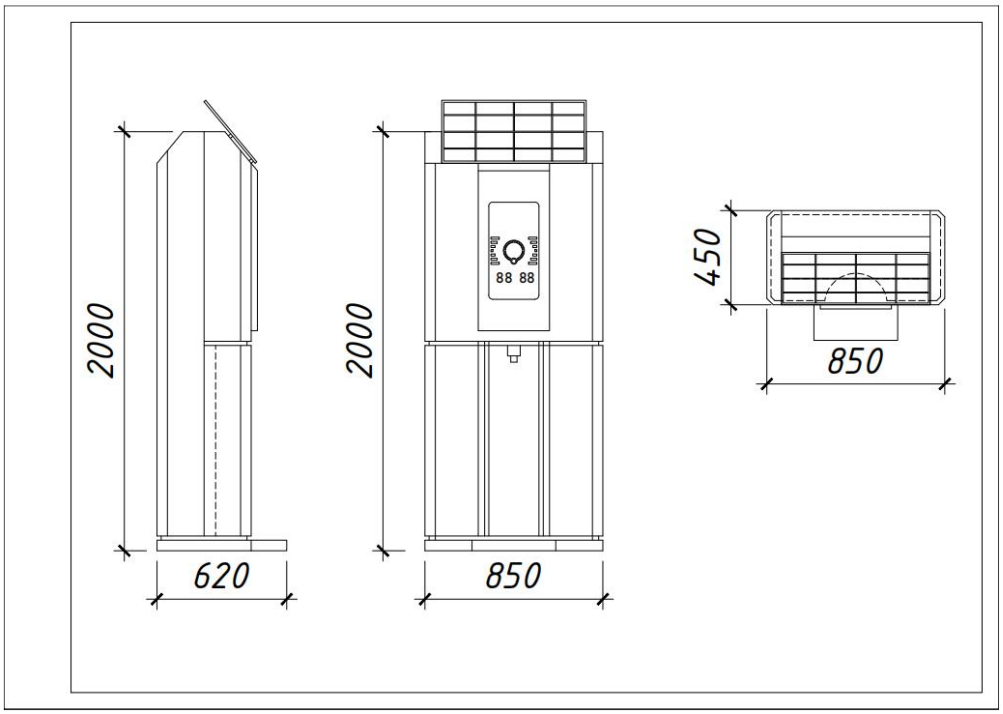
Ilmiy bo'shliq (research gap). Tahlil quyidagi uchta bo'shliqni ko'rsatadi. Birinchidan, Markaziy Osiyoning kontinental iqlimi uchun oylik va sutkalik rejim xaritasi mavjud emas; adabiyotdagi modellar asosan issiq-nam qirg'oq iqlimiga qaratilgan [26, 28]. Ikkinchidan, psixrometrik modellar ideal (pastki) chegarani beradi, real qurilma bilan tafovuti miqdoriy baholanmagan; [30] dagi o'lchov massivi bunday kalibrlash uchun imkon beradi. Uchinchidan, muz rejimi va uni eritish energiyasi avtonom FES qurilmalari kontekstida o'rganilmagan, patentlar esa tarmoqqa ulangan issiqlik nasoslariga tegishli [13–17].

Gipoteza. Agar ish rejimi (kondensat yoki muz) shudring nuqtasi va sutka vaqtiga qarab tanlansa hamda muz kondensator issiqligi bilan eritilsa, Farg'ona sharoitida avtonom AHSQning SESi doimiy rejimga nisbatan kamida 30 % ga kamayadi.

Tadqiqot maqsadi — ASG 02 avtonom qurilmasi uchun Farg'ona iqlimida eng kam energiya talab qiladigan ish rejimlarini psixrometrik modellashtirish, uni tajriba ma'lumotlari bilan kalibrlash va tayanch tizimlar [28–30] bilan qiyoslash asosida ilmiy asoslash.

2. Materiallar va metodlar

2.1. Tadqiqot obyekti. ASG 02 (BWT-2) — FarDTUda ishlab chiqilgan, quyosh FES va akkumulyator bilan ta'minlanadigan bug' kompressorli AHSQ. Statsionar variant gabariti 2000 × 850 × 620 mm, quyosh moduli qurilmaning yuqori qismiga o'rnatilgan (4-rasm).



4-rasm. ASG 02 qurilmasining uch ko'rinishdagi chizmasi va gabarit o'lchamlari, mm

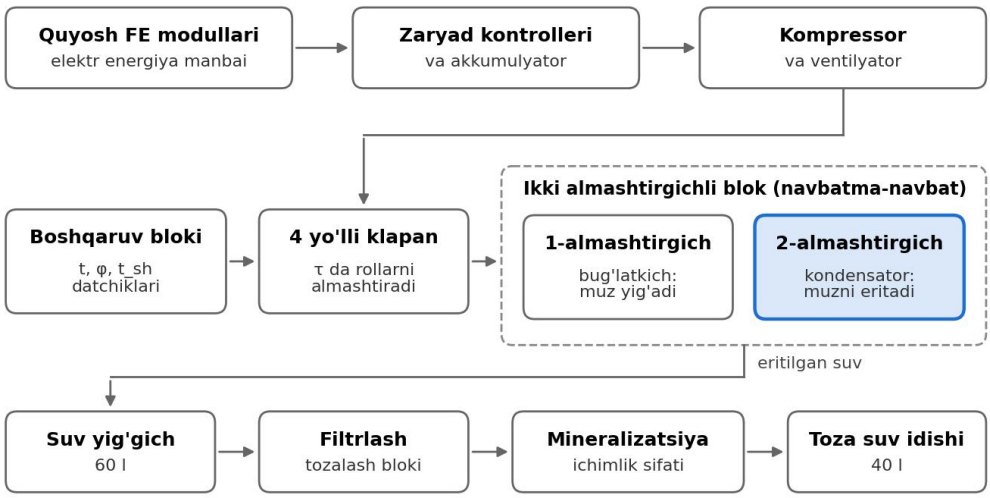
Mobil variant g'ildirakli platformaga o'rnatilgan bo'lib, ikki quyosh paneli, 60 l kondensat va 40 l toza suv idishi bilan jihozlangan (5-



rasm).

5-rasm. Quyosh energiyasi asosida atmosfera havosidan suv olish ishlanmasining chizmasi.

Asosiy konstruktiv xususiyati — ikki bir xil issiqlik almashtirgich 4 yo'lli klapan orqali τ davr bilan bug'latkich va kondensator rollarini almashtiradi (6-rasm).



6-rasm. ASG 02 qurilmasining prinsipial sxemasi

2.2. Iqlim ma'lumotlari. Farg'ona meteostansiyasining (WMO 38618) 1991–2020-yillar oylik o'rtacha harorat, nisbiy namlik hamda sutkalik maksimal va minimal harorat me'yorlari [19]. Yillik global radiatsiya 1500–1550 kVt·soat/m² [20].

2.3. Psixrometrik model. Havoning namlik miqdori:

$$d = 622\,\frac{\varphi\, p_s(t)}{p - \varphi\, p_s(t)}, \quad g/kg \qquad (1)$$

bu yerda $p_s(t)$ — Magnus formulasi bo'yicha to'yingan bug' bosimi ($t < 0$ °C da muz ustidagi koeffitsiyentlar bilan), $p = 101{,}325$ kPa. 1 kg suvga to'g'ri keladigan sovitish issiqligi va SES:

$$q_0 = \frac{h_1 - h_2 - \Delta d\, h_w}{\Delta d}, \qquad SES = \frac{q_0}{3600\,COP} + SES_{er} \qquad (2)$$

bu yerda $\Delta d = d_1 - d_2$; h_1, h_2 — kirish va chiqish havosi entalpiyasi; h_w — kondensat yoki muz entalpiyasi. Havo sovitkichdan $\varphi_2 = 95$ % bilan chiqadi deb qabul qilindi.

2.4. Birinchi qonun bo'yicha nazorat mezoni (taklif etilmoqda). Har qanday kondensatsion AHSQ uchun SES quyidagi pastki chegaradan kam bo'la olmaydi:

$$SES_{min} = \frac{r}{3600\,COP}, \qquad r \approx 2450\ kJ/kg \qquad (3)$$

COP = 2,8 da SES_{min} = 0,24 kVt·soat/l. Mezon adabiyotdagi natijalarning energetik izchilligini tekshirish uchun ishlatildi (3.5-bo'lim).

2.5. Muz eritish energiyasi.

$$Q_{er} = \frac{m\,(c_m\,\Delta t + r_m)}{\eta_{er}}, \qquad r_m = 333{,}5\ kJ/kg \qquad (4)$$

Elektr eritish samaradorligi o'lchovlarda 21,6–49,4 % [11]; hisobda η_{er} = 0,4, ya'ni SES_{er} = 0,23 kVt·soat/l. Kondensator issiqligi bilan eritishda klapan va o'tish jarayonlari yo'qotishlari [12] SES_{er} = 0,02 kVt·soat/l.

2.6. Tajribaviy kalibrlash. Model [30] dagi 24 ta o'lchov nuqtasi (22–35 °C; 40–70 %) uchun qayta hisoblandi va eng kichik kvadratlar usulida chiziqli o'tkazish funksiyasi topildi:

$$SES_{real} = k\,SES_{model} + b \qquad (5)$$

Sifat R^2 va o'rtacha nisbiy xato (MAPE) bilan baholandi. Farg'onaning [30] oralig'iga tushadigan oylari (may–sentabr) uchun o'lchangan xarita bilan bevosita bichiziqli interpolatsiya ham bajarildi.

2.7. FES va akkumulyator.

$$P_{FES} = \frac{SES\,V_{kun}}{H_{kun}\,\eta_{tiz}}, \qquad C_{ak} = \frac{E_{tun}\,N}{U\,DoD\,\eta_{ak}} \qquad (6)$$

bu yerda H_{kun} — cho'qqi quyosh soatlari (yillik o'rtacha 4,2 soat, yozda 7,0 soat), $\eta_{tiz} \approx 0{,}75$; panel quvvat zichligi 210 Vt/m².

2.8. Qiyosiy ko'rsatkich. Turli quyosh texnologiyalarini taqqoslash uchun quyosh yuzasining solishtirma suv unumdorligi kiritildi:

$$Y_A = \frac{M_{yil}}{A_{quyosh}}, \quad l/(m^2 \cdot yil) \qquad (7)$$

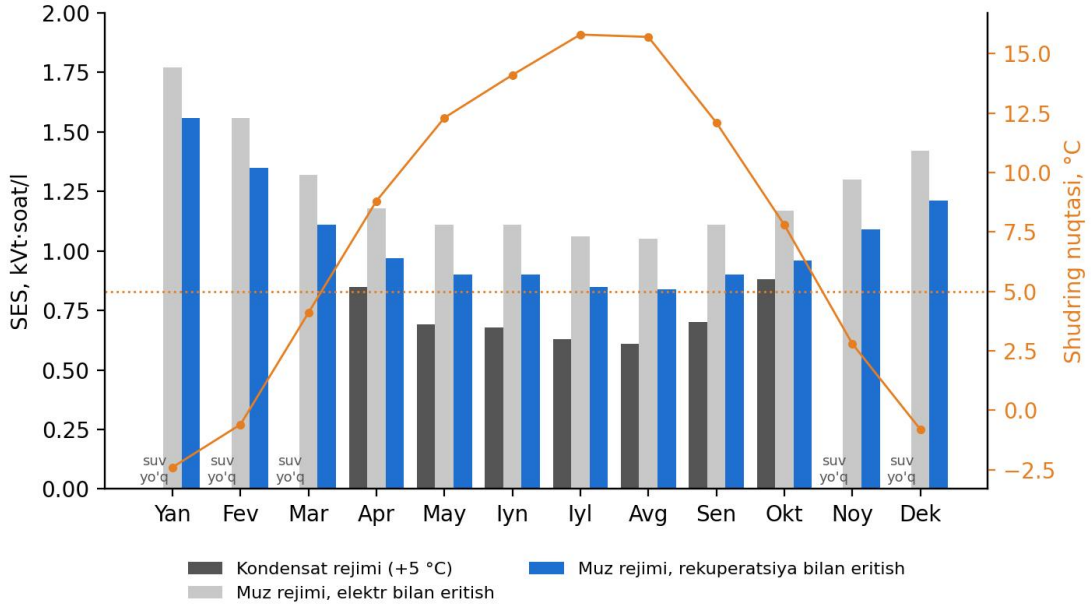
2.9. Qabul qilingan farazlar va cheklovlar. COP doimiy (kondensat 2,8; muz 2,2); ventilyator energiyasi alohida hisobga olinmagan; sutka ichida d = const. Shu sababli model SESning pastki (ideal) chegarasini beradi, real chegara (5) tenglama bilan baholanadi. SES ~1/COP ga proporsional: COP ±20 % o'zgarsa, SES −17…+25 % o'zgaradi.

3. Natijalar va muhokama

3.1. Oylik rejim xaritasi. Model natijalari mustaqil qayta hisoblashda to'liq takrorlandi (farq ≤ 0,01 kVt·soat/l). Yil ikki davrga bo'linadi: aprel–oktabrda shudring nuqtasi 7,8–15,8 °C va kondensat rejimi eng tejamkor; noyabr–martda t_{sh} = −2,4…+4,1 °C bo'lgani uchun +5 °C li sovitkichda suv ajralmaydi (1-jadval, 7-rasm).

1-jadval. Farg'ona uchun oylik SES, kVt·soat/l (ideal model va kalibrlangan real qiymat)

Oy	t, °C	φ, %	t_{sh}, °C	d, g/kg	Kondensat (model)	Kondensat (kalibr., (5))	Latent ulush, %	Muz + elektr eritish	Muz + rekup.	Tavsiya rejim
Yanvar	0,5	81	−2,4	3,17	—	—	—	1,77	1,56	Muz + rekup.
Fevral	3,2	76	−0,6	3,60	—	—	—	1,56	1,35	Muz + rekup.
Mart	9,9	67	4,1	5,05	—	—	—	1,32	1,11	Muz + rekup.
Aprel	16,3	61	8,8	7,00	0,85	2,43	29	1,18	0,97	Kondensat
May	21,4	56	12,3	8,87	0,69	1,82	36	1,11	0,90	Kondensat
Iyun	25,9	48	14,1	9,99	0,68	1,80	36	1,11	0,90	Kondensat
Iyul	27,8	48	15,8	11,19	0,63	1,60	39	1,06	0,85	Kondensat
Avgust	26,3	52	15,7	11,10	0,61	1,52	41	1,05	0,84	Kondensat
Sentabr	21,2	56	12,1	8,76	0,70	1,85	35	1,11	0,90	Kondensat
Oktabr	14,1	66	7,8	6,58	0,88	2,52	28	1,17	0,96	Kondensat
Noyabr	7,1	74	2,8	4,61	—	—	—	1,30	1,09	Muz + rekup.
Dekabr	1,9	82	−0,8	3,55	—	—	—	1,42	1,21	Muz + rekup.



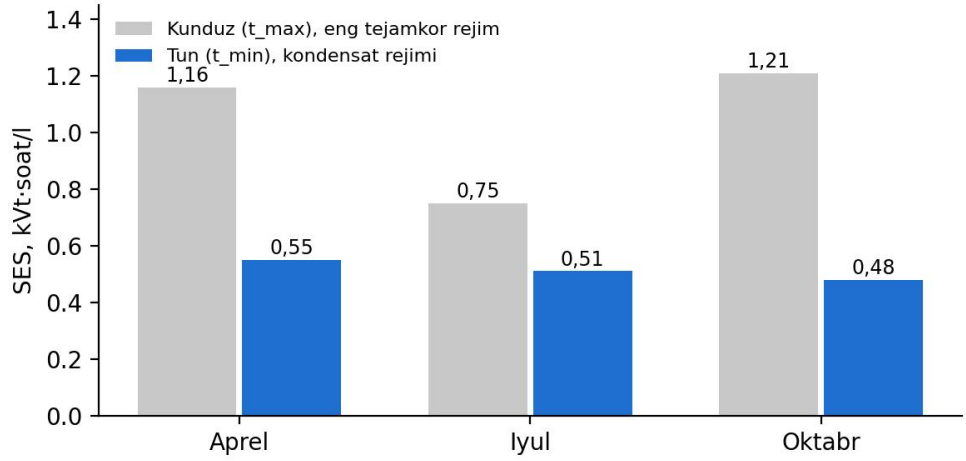
7-rasm. Farg'ona sharoitida rejimlar bo'yicha oylik SES va shudring nuqtasi

Muhim yangi natija — latent ulush: sovitish quvvatining atigi 28–41 % i suvni kondensatsiyalashga, qolgan 59–72 % i havoni shudring nuqtasigacha sezgir sovitishga sarflanadi. Demak, SESni kamaytirishning eng katta zaxirasi — kirish havosini chiqish havosi bilan oldindan sovituvchi rekuperator. Eng past SESli tijorat qurilmalari (0,25–0,35 kVt·soat/l, [1]) aynan shu yechimga ega.

3.2. Kunduzgi va tungi rejim. Havoning namlik miqdori sutka ichida deyarli o'zgarmaydi, harorat esa 12–15 °C ga o'zgaradi; shuning uchun tunda φ 74–96 % gacha oshadi (2-jadval, 8-rasm).

2-jadval. Eng tejamkor rejimdagi kunduzgi va tungi SES (model, kVt·soat/l)

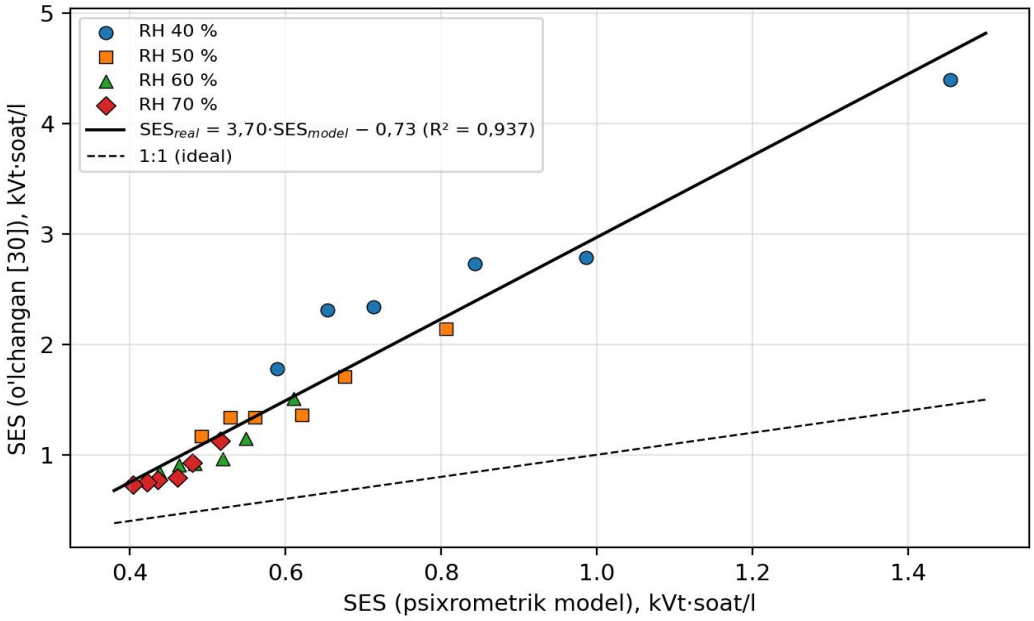
Oy	Kunduz: t, °C / φ, %	Kunduz SES	Tun: t, °C / φ, %	Tun SES	Kamayish
Aprel	22,5 / 41	1,16 (muz)	10,6 / 88	0,55	53 %
Iyul	35,1 / 32	0,75	20,6 / 74	0,51	32 %
Oktabr	21,4 / 42	1,21 (muz)	8,4 / 96	0,48	60 %



8-rasm. Eng tejamkor rejimdagi kunduzgi va tungi SES

Bu tendensiya [30] dagi o'lchovlar bilan mustaqil tasdiqlanadi: 22 °C da RH 40 % dan 70 % ga oshganda real SES 4,40 dan 1,13 kVt·soat/l gacha (−74 %) kamaygan. Model COPni doimiy deb olgani uchun tungi yutuq konservativ baholangan: tunda kondensator past haroratli havo bilan sovitiladi va COP oshadi. Salek va boshq. [28] ham atrof-muhit harorati oshganda absorbsion sikl COPi va eksergetik FIK pasayishini ko'rsatgan. Kunduzi havo quruq bo'lgan bahor va kuzda muz rejimi kondensatdan tejamkor (oktabr: 1,21 ga qarshi 1,39).

3.3. Model–tajriba kalibrlash. 24 nuqta bo'yicha olingan o'tkazish funksiyasi: $SES_{real} = 3{,}70 \cdot SES_{model} - 0{,}73$ ($R^2 = 0{,}937$; MAPE = 10,8 %) (9-rasm). Real/model nisbati 1,71 (35 °C; 70 %) dan 3,53 (32 °C; 40 %) gacha o'zgaradi, ya'ni doimiy



emas.

9-rasm. Psixrometrik model va [30] dagi o'lchangan SES o'rtasidagi bog'liqlik.

3-jadval. Farg'ona oylarida model va [30] o'lchov xaritasi

Oy	Model SES	O'lchangan xarita [30]	(5) bo'yicha	Real/model	Unumdorlik [30], l/soat
May	0,69	1,76	1,82	2,55	0,38
Iyun	0,68	1,79	1,80	2,62	0,39
Iyul	0,63	1,61	1,60	2,55	0,44
Avgust	0,61	1,39	1,52	2,28	0,49
Sentabr	0,70	1,76	1,85	2,52	0,38

Tafovutning fizik ma'nosi: real qurilmada ventilyator, kompressor yordamchi yuklamalari va bypass omili (havoning bir qismi sovitkichga tegmasdan o'tishi) suv miqdoridan qat'i nazar doimiy sarf beradi. [30] da quvvat RH 40 → 70 % da atigi 2–9 % oshgan, suv esa 146–314 % oshgan. Shu sababli quruq havoda doimiy sarf ulushi keskin ortadi. Bu tungi rejim foydasining ikkinchi, mustaqil sababini ochadi. Eslatma: [30] dagi 24-rasm qiymatlari (0,55–0,66 kVt·soat/l) 4-jadvaldagi o'lchovlar bilan mos kelmaydi, shuning uchun kalibrlashda faqat 4-jadval ishlatildi.

3.4. CPC–absorbsion tizim bilan qiyos [28]. Ideal modellar o'zaro solishtirildi. Farg'onada 1 m² PV maydoni yiliga ~240 kVt·soat elektr beradi (1525 × 0,21 × 0,75); oylarga moslangan o'rtacha SES 0,945 kVt·soat/l bo'lganda $Y_A \approx 254$ l/(m²·yil). [28] da 9,974 m² CPC uchun Y_A Tehronda 172,

Ramsarda 337, Bandar-Abbosda 402 l/(m²·yil). Yarim quruq iqlimli Tehron bilan solishtirganda PV–kompressorli yo'l 1,5 marta ko'p suv beradi. Buning sababi — absorbsion sikl generator suvi 373 K ga yetgunga qadar ishlamaydi, PV + akkumulyator esa energiyani tungi, eng tejamkor soatlarga ko'chirish imkonini beradi.

3.5. Parokompressor–Stirling–Peltye qiyosi [29] va energetik izchillik. [29] ning sifat xulosasi (parokompressor mashina eng maqbul) bizning tanlovimizni qo'llab-quvvatlaydi. Biroq (3) mezon miqdoriy natijalarda nomuvofiqlikni ko'rsatadi: $\varepsilon = 2{,}24$ da $SES_{min} = 0{,}30$ kVt·soat/l, maqolada esa 0,05 kVt·soat/l keltirilgan. 200 Vt FES sutkasiga 4,8 kVt·soat beradi, bu ideal holatda ham ≤ 16 l/sut suvga yetadi (84 l/sut emas); kompressor quvvati (0,309 kVt) ham FES quvvatidan katta. Ehtimol, energiya balansiga kompressor sarfi kiritilmagan. Shu sababli [29] ning miqdoriy natijalari qiyoslashda ishlatilmadi.

3.6. FES quvvati va panel maydoni.

4-jadval. FES quvvati va panel maydoni (SES = 0,72 kVt·soat/l, aprel–oktabr o'rtachasi)

Suv, l/kun	Energiya, kVt·soat/kun	FES, kVt (yoz, H = 7,0)	FES, kVt (yillik, H = 4,2)	Panel maydoni, m²
10	7,2	1,4	2,3	11
50	36	6,9	11,4	54
100	72	13,7	22,9	109

1 l/kun uchun zarur maydon Farg'onada ideal holatda 0,65 (yoz) – 1,09 m² (yillik), kalibrlangan real holatda 1,75–2,92 m². [30] da (550 Vt panel, PR = 0,8 — bizning 210 Vt/m² × 0,75 ga yaqin) Lissabon uchun 0,95–3,72 m², Er-Riyod uchun 8,80 m² gacha. Demak, Farg'ona radiatsiyasi respublikada eng past bo'lsa ham, uning nisbatan nam kontinental iqlimi Er-Riyodga nisbatan 3–8 marta kam PV maydon talab qiladi. Ikki panelli mobil ASG 02 (~0,33 kVt) yillik o'rtacha 1,4 l/kun, yozda tungi rejimda 3,4 l/kun gacha suv beradi (ideal chegara).

3.7. Muz eritish va rekuperatsiya. Muzni eritish uchun 0,093 kVt·soat/l kerak, kondensatorda esa 2,7–4,9 kVt·soat/l issiqlik ajraladi — 29–53 marta ko'p. Ikki almashtirgichli navbatma-navbat sxema elektr eritishga nisbatan SESni 12–20 % kamaytiradi: yanvarda 1,77 → 1,56, martda 1,32 → 1,11 kVt·soat/l. Muz qatlami havo oqimini to'sishidan oldin eritiladi; tajribalarda optimal havo tezligi ~2,25 m/s [26].

5-jadval. Tayanch tadqiqotlar va ushbu ishning qiyosiy tavsifi

Ko'rsatkich	**Salek va boshq. [28]**	**Jeleznyak va boshq. [29]**	**Correia va boshq. [30]**	**Ushbu ish (ASG 02)**
Energiya manbai	CPC (quyosh-issiqlik)	Avtonom FES, 200 Vt	PV (hisobiy)	PV + akkumulyator
Sovitish usuli	NH_3–H_2O absorbsion	Parokompressor / Stirling / Peltye	Parokompressor (R290)	Parokompressor, 2 almashtirgich
Metod	MATLAB+EES, energiya-eksergiya	Analitik hisob	Iqlim kamerasi, 24 rejim	Psixrometrik model + kalibrlash
SES, kVt·soat/l	3–8 (issiqlik)	0,05 (nomuvofiq), Peltye 2,17	0,73–4,40	0,61–1,56 (ideal); 1,52–2,52 (real)
Muz rejimi	Yo'q	Yo'q	Yo'q	Bor, rekuperativ eritish

Ko'rsatkich	Salek va boshq. [28]	Jeleznyak va boshq. [29]	Correia va boshq. [30]	Ushbu ish (ASG 02)
Sutkalik rejim	Kunduzgi	Ko'rib chiqilmagan	Ko'rib chiqilmagan	Tungi ish: −32…−60 %
Asosiy cheklov	Quruq havoda samarasiz	Energiya balansi buzilgan	PV sinalmagan	Tajribada tasdiqlash kerak

4. Xulosa

Gipoteza tasdiqlandi: rejimni shudring nuqtasi va sutka vaqtiga qarab tanlash hamda rekuperativ muz eritish Farg'ona sharoitida SESni 32–60 % gacha kamaytiradi.

Ilmiy yangilik:

1. Farg'ona vodiysi (WMO 38618, 1991–2020) uchun avtonom AHSQning oylik rejim xaritasi birinchi marta tuzildi: aprel–oktabrda kondensat rejimi (0,61–0,88 kVt·soat/l), noyabr–martda muz + rekuperatsiya rejimi (1,09–1,56 kVt·soat/l); rejimlar orasidagi o'tish mezoni — shudring nuqtasi ≈ +5 °C.
2. Psixrometrik model tajriba ma'lumotlari bilan kalibrlandi: $SES_{real} = 3{,}70 \cdot SES_{model} - 0{,}73$ ($R^2 = 0{,}937$). Real/model nisbati quruq havoda 3,5 gacha oshishi ko'rsatildi va bu doimiy yordamchi sarflar ulushining o'sishi bilan izohlandi.
3. Sovitish quvvatining faqat 28–41 % i latent jarayonga sarflanishi aniqlandi; bu havo rekuperatorini SESni kamaytirishning asosiy zaxirasi sifatida asoslaydi.
4. Birinchi qonun asosidagi $SES_{min} = r/(3600 \cdot COP)$ mezoni taklif etildi va adabiyotdagi natijalarning energetik izchilligini tekshirishda qo'llandi.
5. PV + akkumulyator + parokompressor sxemasi quyosh yuzasining birligidan CPC + absorbsion sxemaga nisbatan 1,5 marta ko'p suv berishi (254 ga qarshi 172 l/(m²·yil)) ko'rsatildi.

Amaliy ahamiyati. Natijalar ASG 02 boshqaruv algoritmining asosini tashkil etadi: kunduzi akkumulyatorni zaryadlash, kechqurun va tunda suv olish, $t_{sh} < +5$ °C da muz rejimiga o'tish. FES va akkumulyatorni loyihalash metodikasi (6) ishlab chiqildi: 10 l/kun uchun 1,4–2,3 kVt FES va ~82 A·soat (48 V, $LiFePO_4$) akkumulyator; real chegara bo'yicha FES quvvati 2,5–2,7 marta ko'proq olinishi kerak.

Cheklovlar. Model COPni doimiy, ventilyator energiyasini alohida hisobga olmaydi; kalibrlash boshqa (tijorat) qurilma ma'lumotlariga asoslangan va muz rejimiga ($t < 22$ °C) ekstrapolyatsiya qilinmagan.

Kelajakdagi tadqiqotlar: (1) ASG 02 tajriba namunasida (5) tenglamaning o'z koeffitsiyentlarini aniqlash va muz rejimini o'lchash; (2) almashinish davri τ, muz qalinligi va havo tezligining optimal qiymatlarini topish; (3) havo–havo rekuperatorini qo'shib, SESni 0,4 kVt·soat/l gacha tushirish imkoniyatini baholash; (4) PVGIS bo'yicha eng og'ir oy uchun FES o'lchamini hisoblash va suv tannarxini (CPK = AC/M) aniqlash; (5) olingan suvning kimyoviy va mikrobiologik tahlili.

Adabiyotlar

1. Watergen. GEN-M: technical specification. – 2019. – URL: https://us.watergen.com/wp-content/uploads/2019/11/GEN-M.pdf
2. Watergen. GEN-M1 – compact AWG solution. – URL: https://watergen.com/?p=3700

3. Khalaf B.T., Lopez Ferber N., Martins M., Chiesa M., Calvet N. Long-term performance evaluation of VCRS-based atmospheric water generation in arid climates // Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. – 2024. – Vol. 10. – 100855.
4. Ahmad F.F. et al. Performance analysis of atmospheric water generator under hot and humid climate conditions // Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. – 2022. – Vol. 6. – 100270. DOI: 10.1016/j.cscee.2022.100270
5. Brenes A.T., Chini C.M. Temporal and spatial variability of energy intensity for atmospheric water generators // Environmental Research: Infrastructure and Sustainability. – 2023. DOI: 10.1088/2634-4505/accec9
6. Pokorny N., Shemelin V., Novotny J. Experimental study and performance analysis of a mobile autonomous atmospheric water generator designed for arid climatic conditions // Energy. – 2022. – Vol. 250. – 123813. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123813
7. Ashour A.M., Ali S.A., Kadhim S.A. Performance evaluation of atmospheric water generation in different climates using thermoelectric cooling // Desalination and Water Treatment. – 2025.
8. Nigussie S.G. et al. Atmospheric water harvesting: technologies, materials, and pathways toward scalable and sustainable deployment // Energy Conversion and Management: X. – 2026.
9. Atmospheric water harvesting for climate-resilient water–energy systems: a review of technologies, design, operation and performance metrics // Results in Engineering. – 2026.
10. Cuevas C., Cendoya A., Sacasas D., Pezo M. Evaluation of the potential of atmospheric water generators to mitigate water scarcity in Northern Chile // Processes. – 2025. – Vol. 13. – 3003.
11. Kristofersson J., Reinholdt L., Vestergaard N. et al. Defrost efficiency for ammonia air cooled evaporator systems // 13th IIR Gustav Lorentzen Conference (GL2018). – Valencia, 2018.
12. Bertsch S., Ehrbar M., Hubacher B. et al. Comparison of defrosting electricity consumption in the reverse cycle and the hot gas method // 21st IIR International Congress of Refrigeration. – 2003.
13. Patent US 4215817 A. Devices for heating premises by the use of heat pumps and method therefor.
14. Patent EP 1598611. Heat pump system with two rows of evaporator working alternately in defrost mode.
15. Patent EP 2447096 A1. Heat pump system with two evaporators operating alternately for defrosting.
16. Patent US 6588225. Water making apparatus.
17. Patent US 12201938. Atmospheric water generator with a defrost system.
18. Patent US 2018/0209123 A1. Hybrid atmospheric water generator.
19. NOAA NCEI. WMO Climate Normals 1991–2020: Fergana (38618).
20. Solar energy potential and effective use in Uzbekistan // Clean Energy. – 2025. – Vol. 9, No. 6.
21. ASHRAE Handbook – Fundamentals. Chapter 1: Psychrometrics. – Atlanta: ASHRAE.
22. The energy–quality nexus in atmospheric water generation. – IAWHA, 2026.
23. O'zbekov M.O., Boynazarov B.B., Mahammadjonov Q.U., Saydaxmetov S.T. Quyosh havoqizdirgich kollektorlari yordamida energiya tejamkorligiga erishish // «Muqobil energiya manbalaridan samarali foydalanish muammolari va yechimlari» xalqaro anjumani. – Farg'ona, 2023. – B. 458–464.
24. Bhat I.M., Tabasum R., Mohd G., Majid K., Lone S. Atmospheric water generator technologies // In: Fosso-Kankeu E. et al. (eds) Atmospheric Water Harvesting Development and Challenges. – Cham: Springer, 2023. – P. 1–13.

25. Awad K.H., Awad M.M., Hamed A.M. Outdoor testing of double slope condensation surface for extraction of water from air // Ibid. – P. 15–39.
26. Hassan A.A., Ezzeddine M., Kordy M.G.M., Awad M.M. Techno-economic assessment of atmospheric water harvesting (AWH) technologies // Ibid. – P. 153–183.
27. Fosso-Kankeu E., Nkambule T.T.I., Mamba B.B. Businesses based on atmospheric water harvesting around the world // Ibid. – P. 185–199.
28. Salek F., Eshghi H., Zamen M., Ahmadi M.H. Energy and exergy analysis of an atmospheric water generator integrated with the compound parabolic collector with storage tank in various climates // Energy Reports. – 2022. – Vol. 8. – P. 2401–2412. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.01.178
29. Железняк К.Е., Угланов Д.А., Воротынцев И.Е., Чертыковцев П.А. Определение энергетических параметров эффективности атмосферных генераторов воды // Вестник Международной академии холода. – 2017. – № 4. – С. 46–51. DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-4-46-51
30. Correia V., Silva P.D., Pires L.C. Energy requirements and photovoltaic area for atmospheric water generation in different locations: Lisbon, Pretoria, and Riyadh // Energies. – 2023. – Vol. 16. – 5201. DOI: 10.3390/en16135201