

UO‘K: 535.24.022; 621.383.51: 621.565.45

YANGI TIPDAGI SOVITISH TIZIMIGA EGA FOTOELEKTRIK-ISSIQLIK QURILMASINING UMUMIY ISSIQLIK-FIZIKAVIY PARAMETRLARINI HISOBIIY TADQIQ ETISH NATIJALARI

Sabirov Habibillo,

O‘zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi,
S.A. Azimov nomidagi Fizika-texnika instituti,
Bosh ilmiy xodim, professor

Aliqulov Ramazon Bahrom o‘g‘li,

O‘zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi,
S.A. Azimov nomidagi Fizika-texnika instituti,
Tayanch doktorant,
ramazonaliqulov209@gmail.com

Annotatsiya: Maqolada avtonom fotoelektrik-issiqlik qurilmasining issiqlik-fizikaviy parametrlarini hisobiy tadqiq etish natijalari keltirilgan. Qurilma mobil quyosh energetik tizimi asosida ishlab chiqilgan bo‘lib, u ikki asosiy qism — fotoelektr (PV) panel va sovutish tizimidan tashkil topgan. Panelda haroratning ortib ketishi fotoelektr samaradorlikni kamaytiradi, shu sababli suyuqlik aylanuvchi sovutish tizimi qo‘llanilgan. COMSOL Multiphysics dasturida issiqlik o‘tkazuvchanlik, konveksiya va nurlanish jarayonlari asosida modellashirish ishlari olib borildi. Hisoblash natijalari panel sirt haroratining kun davomida o‘zgarishini, suyuqlik tezligi va radiator samaradorligining dinamikasini aniqlash imkonini berdi. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatdiki, havo oqimi tezligi ortgan sari issiqlik almashinuvi intensivligi ham ortadi va bu qurilmaning umumiy energiya samaradorligini yaxshilaydi.

Kalit so‘zlar: mobil quyosh energetik qurilmasi, issiqlik almashinuvi, COMSOL Multiphysics, sovutish tizimi, fotoelektr samaradorlik, havo tezligi, issiqlik tahlili.

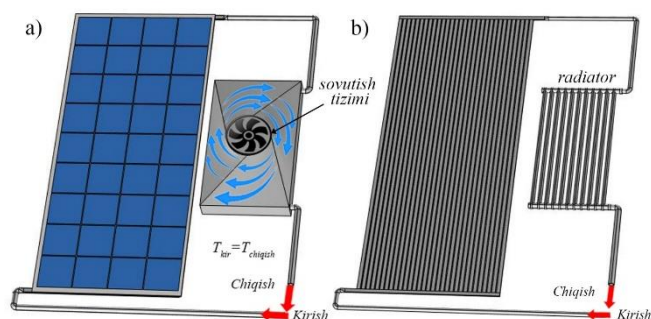
Kirish: Avtonom fotoelektrik-issiqlik qurilmasining samarali ishlashi, uning konstruktiv elementlari o‘rtasida yuz beruvchi issiqlik-fizikaviy jarayonlarni chuqur tahlil qilish va ularni matematik modellashirish orqali aniqlanadi. Bunday modellashirish tizimdagi issiqlik oqimi, harorat taqsimoti, konvektiv va radiatsion issiqlik almashinuvi, shuningdek sovutish jarayonlarini nazariy asosda o‘rganish imkonini beradi.

Mobil quyosh energetik qurilmalarida asosiy energiya tashuvchi omil quyosh nurlanishidan hosil bo‘ladigan issiqlikdir. Qurilma konstruksiyasi va ishlash sharoitiga qarab, unda issiqlik almashinuvi jarayonlari issiqlik o‘tkazuvchanlik, konveksiya va nurlanish orqali kechadi. Ushbu jarayonlarni hisobiy baholash qurilmaning samaradorligini aniqlash hamda optimal konstruktiv yechimlarni tanlashda muhim ahamiyat kasb etadi.

Adabiyotlar tahlili va metodologiya. Mobil quyosh energetik qurilmasi ikki asosiy qismlardan iborat: quyosh paneli va sovutish tizimi. Qurilmaning samarali ishlashi ko‘p jihatdan uning issiqlik rejimiga bog‘liqdir. Chunki quyosh panelida haroratning ortib ketishi uning fotoelektrik samaradorligini sezilarli darajada kamaytiradi. Amaliy tadqiqotlarga ko‘ra, panel haroratining har bir 10°C ga ortishi samaradorlikni o‘rtacha 3–5 % ga pasaytiradi. Qurilmada issiqlikni nazorat qilish uchun panelning orqa qismi bo‘ylab suyuqlik oqadigan kanallar joylashtirilgan[1,2,3]. Ushbu suyuqlik yopiq kontur bo‘ylab aylanadi va quyosh panelidan ortiqcha issiqlikni o‘ziga yutadi. Natijada quyosh panelining harorati pasayadi, ammo suyuqlikning o‘z harorati sezilarli darajada ortadi. Sovuqlashgan panelning barqaror ishlashini ta‘minlash bilan birga, qizigan suyuqlikni keyingi bosqichda qayta sovutish zarur bo‘ladi[4,5]. Shu maqsadda qurilmaga radiator



o‘rnatilgan. Radiator suyuqlikdan issiqlikni tashqi muhitga chiqarib yuboradi. Radiatorning yuqori qismida ventilyator joylashtirilgan bo‘lib, u havo oqimini majburiy ravishda ta‘minlab, issiqlik almashinuv jarayonining samaradorligini oshiradi. Bunda issiqlik almashinuvi jarayoni tabiiy konveksiyaga nisbatan ancha intensiv kechadi va suyuqlikning harorati ma‘lum darajagacha pasaytiriladi. Shunday qilib, yopiq konturda aylanuvchi suyuqlik qayta sovitilib, quyosh paneliga uzatiladi va sikl takrorlanadi. Bu tizim quyosh paneli haroratini me‘yoriy diapazonda ushlab turib, qurilmaning umumiy samaradorligini sezilarli darajada oshiradi.



1- rasm. Mobil quyosh energetik qurilmasi modelining a) umumiy ko‘rinishi, b) ichki qismining umumiy ko‘rinishi.

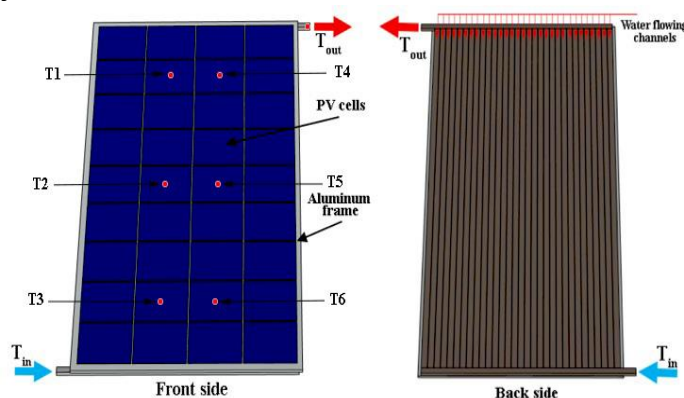
1-rasmda mobil quyosh energetik qurilmasining modelashtirilgan umumiy ko‘rinishi (a) hamda ichki qismi (b) tasvirlangan. Qurilma quyosh panellari orqali elektr energiya ishlab chiqaradi va hosil bo‘lgan energiya yordamida sovitish tizimi (ventilyator) hamda issiqlikni tashuvchi suyuqlik aylanishini ta‘minlovchi nasos boshqariladi.

a) Umumiy ko‘rinish – quyosh panellari blokidan iborat bo‘lib, quyoshdan tushayotgan energiyani elektr tokiga aylantiradi. Elektr energiyasi yordamida sovitish tizimi ishga tushiriladi, bu esa qurilmaning ortiqcha qizishini oldini oladi.

b) Ichki qism ko‘rinishi – radiator hamda issiqlik almashinuv kanallaridan tashkil topgan. Radiator qurilma ichida hosil bo‘lgan issiqlikni tashqi muhitga samarali ravishda chiqarib yuboradi. Suv yoki issiqlik tashuvchi boshqa suyuqlik kirish qismidan kiritilib, issiqlikni qabul qilib olgach chiqish qismidan

tashqariga chiqariladi. Shu tarzda qurilma issiqlik energiyasini yig‘adi va undan foydali ish uchun foydalanish imkoniyati yaratiladi.

Qurilmaning ishlash tamoyili issiqlik balans tenglamalari asosida baholanib, COMSOL Multiphysics dasturida modellashirildi. Natijada qurilma elementlaridagi harorat taqsimoti, sovitish tizimining samaradorligi va radiator orqali issiqlik chiqarilish darajasi aniqlanib, qurilmaning umumiy issiqlik-fizikaviy parametrlarini baholash imkoni yaratildi.



2-rasm. Quyosh panelining sirti va suyuqlik kirish va chiqish nuqtalaridagi T1, T2, T3, T4, T5 va T6 harorat datchiklari.

2-rasmda modelashtirilgan quyosh panelining old (front side) va orqa (back side) qismlarining konstruktiv tuzilishi, harorat o‘lchash nuqtalari hamda issiqlik tashuvchi suyuqlikning kirish-chiqish yo‘nalishlari keltirilgan. Ushbu panel fotoelektr moduli (PV cells) bilan birgalikda issiqlik yig‘uvchi sovitish tizimi sifatida ishlaydi. Bunda quyosh nurlari fotoelementlar tomonidan yutilib, elektr energiyasiga aylantiriladi, jarayon davomida ajralib chiqqan issiqlik esa orqa qismdagi suyuqlik kanallari orqali olib chiqiladi.

Old tomoni

Panelning old qismida quyosh nurlanishini qabul qiluvchi fotoelektr elementlar (PV cells) joylashgan. Ushbu qatlamda T₁, T₂, T₃, T₄, T₅ va T₆ harorat datchiklari o‘rnatilgan bo‘lib, ular quyosh paneli yuzasida haroratning vertikal va gorizontal taqsimotini aniqlash uchun xizmat qiladi.



- T_1, T_2, T_3 datchiklari – pastdan yuqoriga yo‘nalgan holda panel yuzasining turli zonalarida joylashtirilgan.
- T_4, T_5, T_6 datchiklari – ichki qatlamlarda haroratning chuqurlik bo‘yicha o‘zgarishini o‘lchash imkonini beradi.

Panelning tashqi perimetri alyuminiy ramka bilan mustahkamlangan bo‘lib, u konstruksiyaning mexanik barqarorligini ta‘minlaydi va issiqlikni bir tekisda tarqatish vazifasini bajaradi.

Orqa tomoni

Panelning orqa tomonida suv oqim kanallari (water flowing channels) joylashgan. Bu kanallar orqali issiqlik tashuvchi suyuqlik — asosan suv yoki glikol aralashmasi — harakatlanadi.

- Kirish nuqtasi (T_{in}) orqali sovuq suyuqlik tizimga kiradi.
- Chiqish nuqtasi (T_{out}) orqali isitilgan suyuqlik tashqariga chiqadi.

Suyuqlik panellar orqasidagi kanallar orqali oqib o‘tarkan, fotoelementlar tomonidan hosil qilingan ortiqcha issiqlikni yutadi va uni tashqi issiqlik akkumulyatori yoki radiator tizimiga uzatadi.

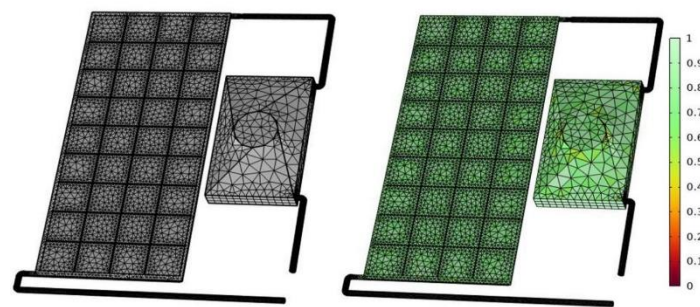
2.5-jadval. Chegaraviy qiymatlar

Parameter	Qiymati	tavsifi
U_0	0.3[m/s]	Kirish tezligi suv uchun
U_1	0.5, 0.8, 1.1 [m/s]	Kirish tezligi havo uchun
A	0.992[m ²]	PV panel yuzasi
T_{in}	293.15[K]	Kirish harorati
$T_{initial}$	293.15[K]	Dastlabki harorat

2.6-jadval. Materiallar xususiyatlari

Material	Solishtir ma issiqlik sig‘imi	Issiqlik o‘tkazuvchanligi	Zichligi
Si - Kremniy	700 $J/(kg \cdot K)$	131[W/(m ² K)]	2329[kg/m ³]
Suv	4200 $J/(kg \cdot K)$	0.598[W/(m ² K)]	998[kg/m ³]
Alyumin iy	900 $J/(kg \cdot K)$	238[W/(m ² K)]	2700[kg/m ³]

Natijalar. Mobil quyosh energetik qurilmasining issiqlik jarayonlarini aniqlik bilan modellashtirish uchun hisoblash sohasi noaniqlikni kamaytiruvchi va hisobiy barqarorlikni ta‘minlovchi nozik tarmoq (mesh) yordamida diskretlashtirildi[6,7]. Tarmoqning asosiy vazifasi — geometriyani soddalashtirmasdan, issiqlik o‘tkazuvchanlik, konveksiya va nurlanish jarayonlarini yuqori aniqlikda hisoblash imkonini berishdir.



3-rasm. Quyosh fotoelement (PV) sohalari uchun yaratilgan to‘r (mesh).

Mesh yaratishda Free Tetrahedral, Prism, Pyramid va Hexahedral elementlar kombinatsiyasi qo‘llanildi. Bu yondashuv geometriyaning murakkab qismlarida yuqori aniqlikni, tekis yuzalarda esa hisobiy tejamkorlikni ta‘minladi.

Tarmoq sifatini baholash uchun Skewness mezoni tanlandi. Skewness qiymati $0 \leq q \leq 1$ oralig‘ida o‘lchanib, 1 ga yaqin qiymatlar mukammal tarmoqni anglatadi. Ushbu modelda o‘rtacha sifat $q_{av} = 0.593$ bo‘lib, bu issiqlik uzatish jarayonlarini modellashtirish uchun yetarli darajada aniqlikni ta‘minlaydi. Eng past sifatli element qiymati $q_{min} = 0.01669$ bo‘lsa-da, bu elementlar geometriyaning chekka yoki murakkab qismlarida joylashganligi aniqlangan[8,9,10].

Yuqori issiqlik gradientlari kuzatiladigan sohalarda (quyosh panelining orqa kanallari va radiator atrofida) lokal mesh refinement qo‘llanilgan. Bu yondashuv issiqlik oqimi va harorat taqsimotining aniqligini oshirish bilan birga, umumiy hisoblash vaqtini qisqartiradi.

2.7-jadval. Qurilmaning hisoblash tarmog‘i parametrlarining asosiy ko‘rsatkichlari

Ko‘rsatkich nomi	Qiymati
------------------	---------

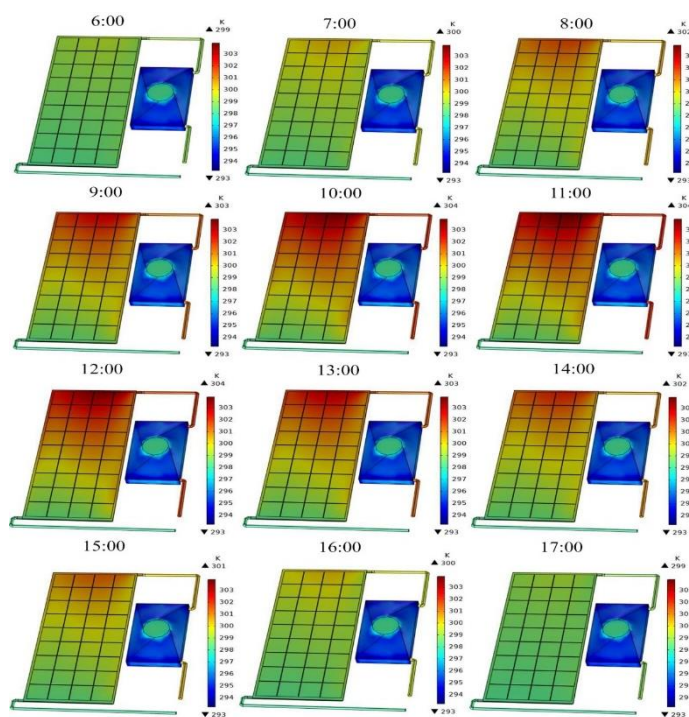


Umumiy elementlar soni	805 592 dona
Mesh tugunlari soni	269 501 dona
Tetrahedral elementlar soni	422 256
Prism elementlar soni	349 051
Pyramid elementlar soni	33 853
Hexahedral elementlar soni	432
Uchburchak (Triangle) elementlar soni	96 208
To‘rtburchak (Quad) elementlar soni	736
Minimal element sifati	0.01669
O‘rtacha element sifati	0.593
Element hajm nisbati	7.951×10^{-6}
Umumiy element hajmi	0.04861 m ³

3-rasmda mobil quyosh energetik qurilmasi sirtining sutkaning turli vaqtlarida (6:00 dan 17:00 gacha) modellashirilgan harorat taqsimoti keltirilgan. Grafik natijalardan ko‘rinadiki, quyosh nurlanishining intensivligi oshib borishi bilan panel sirt harorati ham bosqichma-bosqich ortib boradi.

2.8-jadval. Kunlik quyosh radiatsiyasining o‘zgarishi

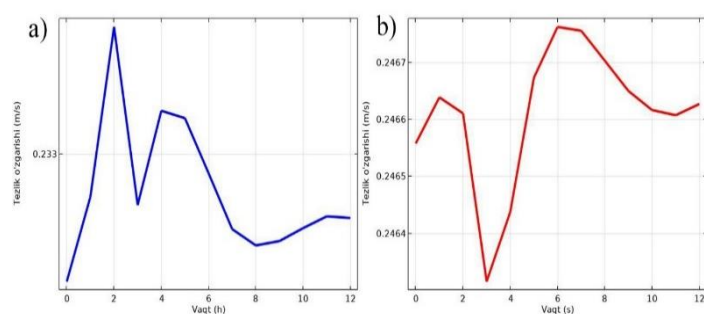
t (h)	8:0	9:0	10:0	11:0	12:0	13:0	14:0	15:0	16:0	17:0	18:0
$I_0 (W/m^2)$	250	450	650	800	950	1000	950	800	600	400	200



3-rasm. Mobil quyosh energetik qurilmasining sirt haroratlarning o‘zgarishi

Ertalabki soatlarda (6:00–8:00) panel sirt harorati 296–299 K oralig‘ida bo‘lib, bu davrda quyosh nurlanishi past qiymatlarda. Soat 11:00 dan 14:00 oralig‘ida esa quyosh nurlanishi maksimal darajaga yetadi va panelning yuqori qismlarida harorat 302–304 K gacha ko‘tariladi. Radiator va sovutish tizimi joylashgan orqa qismda esa harorat sezilarli darajada past, bu sovutish tizimining samarali ishlayotganini ko‘rsatadi. Kunning ikkinchi yarmida (15:00–17:00) quyosh nurlanishi kamaygani sababli panel yuzasi harorati asta-sekin pasayadi. Bu natijalar mobil quyosh energetik qurilmasida harorat dinamikasining vaqt bo‘yicha o‘zgarishini aniq aks ettirib, sovutish tizimining barqaror harorat rejimini ta‘minlashdagi rolini ko‘rsatadi.

6-rasmda mobil quyosh energetik qurilmasida issiqlik tashuvchi suyuqlik tezligining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi ko‘rsatilgan: a) panel chiqishida, b) radiator chiqishida. Modellashirish natijalariga ko‘ra, panel chiqishida tezlik quyosh nurlanishi kuchaygan paytda qisqa muddatda oshib, maksimal qiymatga erishadi va keyin barqarorlashadi; radiator chiqishida esa tezlik deyarli doimiy bo‘lib, kichik tebranishlar bilan 0,2464–0,2468 m/s atrofida saqlanadi. Bu farq radiatorning oqimni silliqalashtirish va issiqlik almashinuvini barqarorlashtirishdagi rolini ko‘rsatadi, natijada tizimning gidrodinamik va termal samaradorligi ta‘minlanadi.

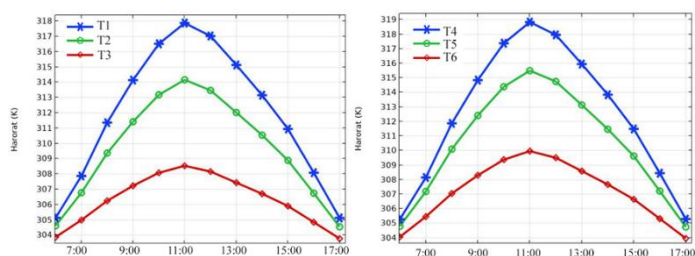


6-rasm. Suyuqlik tezligining o‘zgarishi a) panel chiqishidagi, b) radiator chiqishidagi.

7-rasmda quyosh panelining turli nuqtalarida joylashgan T_1 – T_6 harorat datchiklarida o‘lchangan haroratning kun davomida (06:00–17:00) o‘zgarish grafigi keltirilgan. Natijalar shuni ko‘rsatadiki, panel sirtida harorat quyosh nurlanishi intensivligi ortishi bilan 11:00–13:00 oralig‘ida maksimal qiymatga

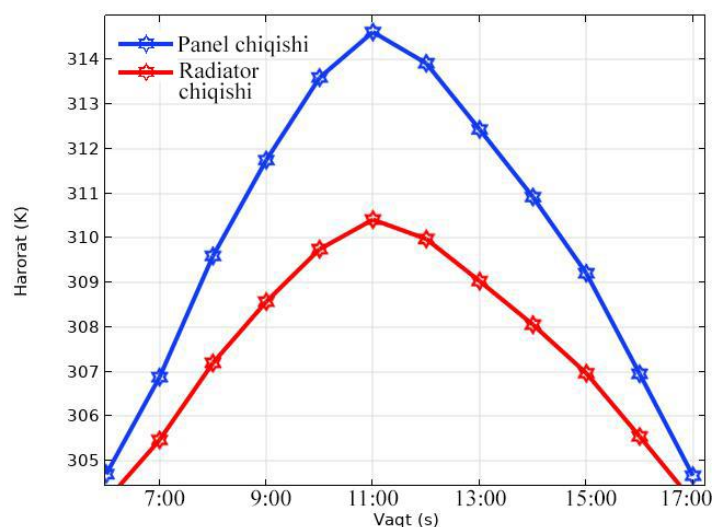


yetadi. T_1 – T_3 nuqtalari panelning old (yuza) qismida, T_4 – T_6 nuqtalari esa ichki qatlamda joylashgan bo‘lib, ularning harorati orasida ma’lum farq mavjud.



7-rasm. Quyosh panelining sirtida joylashgan T_1 – T_6 nuqtalarida harorat o‘zgarishi.

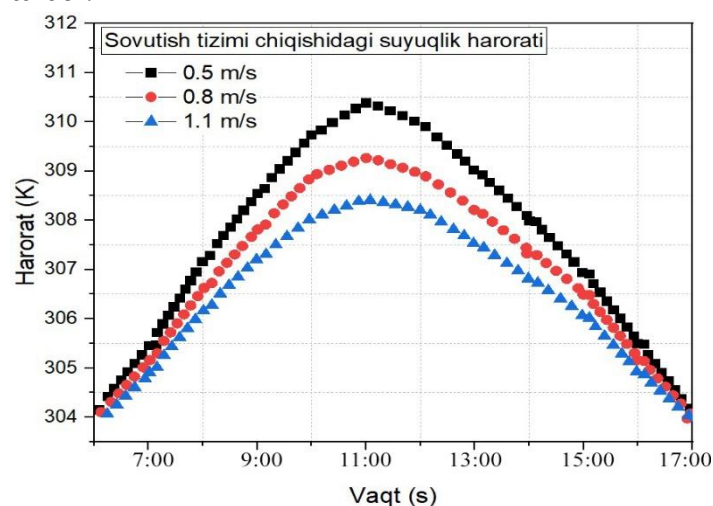
Tashqi sirt nuqtalarida (T_1 – T_3) harorat yuqoriroq bo‘lib, maksimal qiymat 317–318 K atrofida, ichki qatlamlarda esa (T_4 – T_6) biroz past — 315–316 K oralig‘ida qayd etilgan. Bu farq issiqlik oqimining yuqoridan pastga qarab tarqalishini va sovutish tizimi orqali issiqlikning barqaror chiqarilishini ko‘rsatadi. Natijalar panel yuzasidagi harorat taqsimoti quyosh nurlanishining vaqt bo‘yicha o‘zgarishiga to‘liq mos kelishini tasdiqlaydi.



8-rasm. Quyosh paneli va sovutish tizimining suv oquvchi kanalidan suyuqlik chiqish harorati.

8-rasmda mobil quyosh energetik qurilmasining panel chiqish qismi va radiator chiqish qismi bo‘yicha suyuqlikning harorat o‘zgarishi 0,5 m/s havo tezligida keltirilgan. Grafikdan ko‘rinib turibdiki, kun davomida harorat 06:00 dan 11:00 gacha ortib

boradi va quyosh nurlanishi eng yuqori darajaga yetgan paytda maksimal qiymatga erishadi. Panel chiqishidagi harorat (ko‘k chiziq) 314 K atrofida eng yuqori nuqtaga chiqadi, bu paytda quyosh energiyasi intensiv ravishda yutilmoqda. Radiator chiqishidagi harorat (qizil chiziq) esa nisbatan past bo‘lib, maksimal qiymati 310 K ni tashkil etadi, bu esa sovutish tizimi orqali o‘tuvchi suyuqlikning issiqlikni samarali tarzda olib chiqayotganini ko‘rsatadi. Kun oxiriga kelib, quyosh nurlanishi pasaygani sababli ikkala chiziq ham pastga yo‘nalgan holda kamayadi. Natijalar shuni ko‘rsatadiki, 0,5 m/s havo tezligida sovutish tizimi issiqlik almashinuvini barqarorlashtirib, panel haroratining ortiqcha ko‘tarilishini oldini oladi hamda qurilmaning umumiy energiya samaradorligini saqlab turadi.



9-rasm. Havoning turli oqim tezliklarida suyuqlik chiqish haroratining o‘zgarishi.

9-rasmda sovutish tizimidan chiqayotgan suyuqlikning harorati 0,5 m/s, 0,8 m/s va 1,1 m/s havo oqim tezliklarida qanday o‘zgarishini ko‘rsatuvchi grafik keltirilgan. Natijalar shuni ko‘rsatadiki, havo oqimi tezligi oshgan sari suyuqlikning chiqish harorati pasayib boradi.

Eng past havo tezligida (0,5 m/s) suyuqlik harorati eng yuqori qiymatga, ya’ni $\approx 310,5$ K gacha ko‘tariladi. Tezlik oshgani sayin, 0,8 m/s da harorat biroz kamayadi, 1,1 m/s da esa eng past qiymat (≈ 308 K) qayd etiladi. Bu esa yuqori havo tezligida issiqlik almashinuvi intensivligi ortib, suyuqlik yanada samarali sovishini ko‘rsatadi.



Umuman olganda, bu natijalar sovutish tizimining samaradorligi havo oqimining tezligiga to‘g‘ridan-to‘g‘ri bog‘liqligini tasdiqlaydi. Havo tezligi oshgan sari radiator orqali issiqlik uzatish koeffitsienti ortadi va tizimdagi ortiqcha issiqlik tezroq chiqariladi, bu esa qurilmaning issiqlik barqarorligi va energiya samaradorligini yaxshilaydi.

Xulosa. O‘tkazilgan hisobiy tadqiqotlar natijalariga ko‘ra, ishlab chiqilgan avtonom fotoelektrik-issiqlik qurilmasi quyosh nurlanishi energiyasini samarali tarzda elektr va issiqlik energiyasiga aylantira olishi aniqlandi. COMSOL Multiphysics dasturida olib borilgan modellashirish natijalari qurilmaning issiqlik-fizikaviy jarayonlarini chuqur tahlil qilish imkonini berdi. Tadqiqotdan ma‘lum bo‘ldiki, quyosh paneli haroratining ortishi fotoelektr samaradorlikni kamaytiradi, ammo yopiq konturdagi suyuqlik sovutish tizimi bu salbiy ta‘sirni sezilarli darajada kamaytiradi. Havo oqimi tezligi oshgani sari radiator orqali issiqlik almashinuvi intensivligi ortib, sovutish tizimi samaradorligi yaxshilanadi. Radiator-ventilyator sovutish tizimi qo‘llanilishi natijasida quyosh paneli harorati 5-20 K ga kamaydi, bu yesa fotoelektrik-issiqlik batareyaning samaradorligini o‘rtacha 10-45 % ga oshirdi.

Adabiyotlar ro‘yxati

1. A. S. Ali and T. Bounahmidi, ‘Dynamic performance analysis of a photovoltaic thermal (PVT) collector with an extruded absorber using python optimization modeling object (Pyomo)’, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 247, no. January, p. 123028, 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123028.
2. E. Sakellariou and P. Axaopoulos, ‘An experimentally validated, transient model for sheet and tube PVT collector’, *Sol. Energy*, vol. 174, no. July, pp. 709–718, 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.09.058.
3. A. Khelifa, K. Touafek, L. Boutina, and B. M. Tahar, ‘Theoretical and experimental analysis of the solar collectors performances’, *IET Renew. Power Gener.*, vol. 12, no. 7, pp. 867–873, 2018, doi: 10.1049/iet-rpg.2017.0498.

4. M. M. Hasan and K. Hriczó, ‘The optimal approach of various analysis methodologies of a dual-purpose solar collector’, *Pollack Period.*, vol. 20, no. 2, pp. 130–135, 2025, doi: 10.1556/606.2024.01244.

5. C. S. Malvi, D. W. Dixon-Hardy, and R. Crook, ‘Energy balance model of combined photovoltaic solar-thermal system incorporating phase change material’, *Sol. Energy*, vol. 85, no. 7, pp. 1440–1446, 2011, doi: 10.1016/j.solener.2011.03.027.

6. W. Marańda and M. Piotrowicz, ‘Extraction of thermal model parameters for field-installed photovoltaic module’, *2010 27th Int. Conf. Microelectron. MIEL 2010 - Proc.*, no. June 2010, pp. 153–156, 2010, doi: 10.1109/MIEL.2010.5490512.

7. B. Herteleer, A. Kladas, G. Chowdhury, F. Catthoor, and J. Cappelle, ‘Investigating methods to improve photovoltaic thermal models at second-to-minute timescales’, *Sol. Energy*, vol. 263, no. December, 2023, doi: 10.1016/j.solener.2023.111889.

8. Y. Chaibi *et al.*, ‘Physical models for the design of photovoltaic/thermal collector systems’, *Sol. Energy*, vol. 226, no. August, pp. 134–146, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.08.048.

9. F. Veynandt, P. Klanatsky, H. Plank, and C. Heschl, ‘Hybrid photovoltaic-thermal solar collector modelling with parameter identification using operation data’, *Energy Build.*, vol. 295, no. March, p. 113277, 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113277.

10. Aliqulov R.B., Fotoelektrik-issiqlik batareyalarning samaradorligini oshirishda nanosuyuqlik foydalanish: Adabiyotlar sharhi. 2025-yil 3–4-oktyabr kunlari “Jahon miqyosida yashil iqtisodiyot va to‘rtinchi sanoat inqilobi doirasida qayta tiklanuvchi energetikaning roli: innovatsiyalar, texnologiyalar va barqaror rivojlanishni ta‘minlash” mavzusida xalqaro ilmiy-amaliy anjuman.bet 289-293

