



UO‘K: 621.383.51:536.24:628.164.8

[https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.3\(24\).2026.14](https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.3(24).2026.14)PV/T MODULINING ISSIQLIK-GIDRODINAMIK JARAYONLARINI
MODELLASHTIRISHToshmamatov Bobir Mansurovich¹-PhD, dotsent,<https://orcid.org/0000-0001-7051-5307> e-mail: bobur160189@mail.ru

Annayev Axmed-erkin tadqiqotchi

<https://orcid.org/0009-0002-7902-631X> e-mail: axmed.annayev@icloud.com¹Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi, O‘zbekiston

Annotatsiya. Kirish. Quruq va changlanish darajasi yuqori bo‘lgan hududlarda fotoelektr modullar yuzasida chang qatlamining to‘planishi quyosh nurlanishining faol qatlamga yetib borishini cheklab, elektr energiyasi ishlab chiqarish samaradorligini pasaytiradi. Shu bilan birga, PV panellarini ortiqcha qizib ketishdan saqlash, chang va boshqa zarrachalardan muntazam tozalash uchun chuchuk suv resurslarining cheklanganligi muhim ekspluatatsion muammolardan biri hisoblanadi.

Usul va materiallar. Mazkur tadqiqot ishida PV modulni Al_2O_3/H_2O nanosuyuqligi yordamida sovitish orqali olingan past potentsialli issiqlikdan membranali distillatsiyada sho‘r yoki mineralizatsiyalangan suvni tuzsizlantirish hamda hosil qilingan distillyatdan PV panellarni adaptiv tozalash tizimida foydalanishga asoslangan integrallashgan PV/T-MD tizimi ishlab chiqildi. PV/T modulining uchta parallel nanosuyuqlik kanaliga ega 3D modeli COMSOL Multiphysics dasturida chekli elementlar usuli asosida modellashtirildi.

Natijalar. Sonli modellashtirish natijasida PV/T modulida harorat 297-320 K, nanosuyuqlik oqim tezligi 0,060-0,103 m/s oralig‘ida o‘zgarishi aniqlandi. Parallel kanallardagi maksimal gidravlik bosim yo‘qotilishi 13,1 Pa ni tashkil qilgan.

Xulosa. Taklif etilgan PV/T-MD tizimi PV modulni sovitish, past potentsialli issiqlikdan qayta foydalanish, sho‘r suvdan texnik toza distillyat olish va ushbu suvdan panellarni changdan avtonom tozalashda foydalanish jarayonlarini yagona texnologik konturda birlashtirish imkonini beradi. Tizim quruq, issiq va suv tanqis hududlardagi fotoelektr stansiyalar uchun istiqbolli energiya va resurs tejankor yechim hisoblanadi.

Kalit so‘zlar: fotoelektr modul, PV/T tizimi, membranali distillatsiya, nanosuyuqlik, Al_2O_3/H_2O , panel tozalash, distillyat suv, COMSOL Multiphysics dasturi, issiqlik almashinuvi, energiya samaradorligi.

Дата поступления: 28.08.2026. После обработки: 04.09.2026 Принято печать: 23.09.2026

For citation: Toshmamatov B.M., Annaev A. Modeling of Thermal-Hydrodynamic Processes in a PV/T Module. Muqobil energetika. 2026. 3(24). pp. 109-115.

УДК: 621.383.51:536.24:628.164.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В PV/T-
МОДУЛЕТошмаматов Бобир Мансурович¹ - PhD, доцент,<https://orcid.org/0000-0001-7051-5307> e-mail: bobur160189@mail.ru

Аннаев Ахмед - независимый исследователь

<https://orcid.org/0009-0002-7902-631X> e-mail: axmed.annayev@icloud.com¹Каршинский государственный технический университет, Карши, Узбекистан

Аннотация. Введение. В засушливых регионах с высоким уровнем запыленности накопление пыли на поверхности фотоэлектрических модулей ограничивает поступление



солнечного излучения к активному слою и приводит к снижению эффективности выработки электрической энергии. В то же время предотвращение чрезмерного перегрева PV-панелей, а также их регулярная очистка от пыли и других загрязнений осложняются ограниченностью ресурсов пресной воды, что является одной из существенных эксплуатационных проблем.

Методы и материалы. В настоящем исследовании разработана интегрированная система PV/T-MD, основанная на охлаждении PV-модуля наножидкостью Al_2O_3/H_2O , использовании отводимой низкопотенциальной тепловой энергии в процессе мембранной дистилляции для опреснения соленой или минерализованной воды, а также последующем применении полученного дистиллята в адаптивной системе очистки PV-панелей. Трехмерная модель PV/T-модуля с тремя параллельными каналами для наножидкости была разработана и численно исследована в программном комплексе COMSOL Multiphysics на основе метода конечных элементов.

Результаты. Результаты численного моделирования показали, что температура в PV/T-модуле изменялась в диапазоне 297-320 K, а скорость потока наножидкости составляла 0,060-0,103 м/с. Максимальные гидравлические потери давления в параллельных каналах составили около 13,1 Па.

Заключение. Предложенная система PV/T-MD позволяет объединить в едином технологическом контуре охлаждение PV-модуля, повторное использование низкопотенциальной тепловой энергии, получение технически чистого дистиллята из соленой воды и автономную очистку фотоэлектрических панелей от пылевых загрязнений. Разработанная система представляет собой перспективное энерго- и ресурсосберегающее решение для фотоэлектрических станций, эксплуатируемых в жарких, засушливых, пыльных и водodefицитных регионах.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, PV/T-система, мембранная дистилляция, наножидкость, Al_2O_3/H_2O , очистка панелей, дистиллят, COMSOL Multiphysics, теплообмен, энергоэффективность.

UDC: 621.383.51:536.24:628.164.8

MODELING OF THERMAL-HYDRODYNAMIC PROCESSES IN A PV/T MODULE

Toshmamatov Bobir Mansurovich¹ - PhD, Associate Professor,

<https://orcid.org/0000-0001-7051-5307> e-mail: bobur160189@mail.ru

Annayev Akhmed - Independent Researcher

<https://orcid.org/0009-0002-7902-631X> e-mail: axmed.annayev@icloud.com

¹Karshi State Technical University, Karshi, Uzbekistan

Abstract. Introduction. In arid and highly dusty regions, the accumulation of dust on the surface of photovoltaic modules restricts the transmission of solar radiation to the active layer, thereby reducing electrical power generation efficiency. At the same time, preventing excessive overheating of PV panels and ensuring their regular cleaning from dust and other contaminants are complicated by the limited availability of freshwater resources, which represents a significant operational challenge.

Methods and materials. In this study, an integrated PV/T-MD system was developed in which a PV module is cooled using an Al_2O_3/H_2O nanofluid, while the recovered low-grade thermal energy is utilized in a membrane distillation process for desalination of saline or mineralized water. The produced distillate is subsequently used in an adaptive PV panel cleaning system. A three-dimensional model of the PV/T module incorporating three parallel nanofluid channels was developed and numerically simulated in COMSOL Multiphysics using the finite element method.

Results. Numerical simulation showed that the temperature within the PV/T module varied in the range of 297-320 K, while the nanofluid flow velocity ranged from 0.060 to 0.103 m/s. The maximum hydraulic pressure drop in the parallel channels was approximately 13.1 Pa.



Conclusion. The proposed PV/T-MD system enables the integration of PV module cooling, recovery and reuse of low-grade thermal energy, production of technically clean distillate from saline water, and autonomous dust removal from photovoltaic panels within a single technological loop. The developed system represents a promising energy- and resource-efficient solution for photovoltaic power plants operating under hot, arid, dusty, and water-scarce climatic conditions.

Keywords: photovoltaic module, PV/T system, membrane distillation, nanofluid, Al_2O_3/H_2O , panel cleaning, distillate water, COMSOL Multiphysics, heat transfer, energy efficiency.

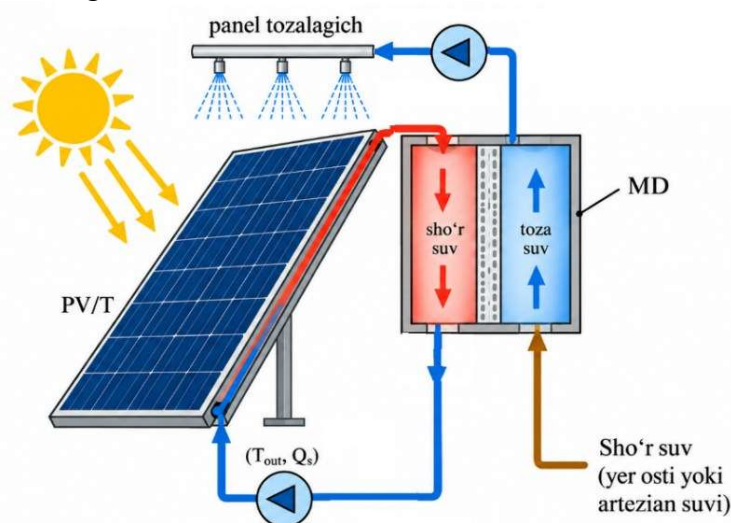
Kirish

Fotoelektr stansiyalar (FES) joylashgan quruq va changlanish darajasi yuqori hududlarda fotoelektrik panel (PV) modullar yuzasida chang qatlamining to'planishi quyosh nurlanish energiyasining faol qatlama yetib borishini cheklab, elektr energiyasi ishlab chiqarish samaradorligini pasaytirishga sabab bo'ladi [1-4]. Bunday issiq va quruq iqlim sharoitlarda PV modullarini muntazam ravishda suv bilan tozalash zarur bo'lib, chuchuk suv resurslarining cheklanganligi tozalash jarayonining barqarorligini ta'minlashda muhim muammolardan biri hisoblanadi. Ayniqsa, cho'l va yarim cho'l hududlarda mavjud yer osti yoki artezian suvlarining mineralizatsiyalanganligi sababli ularni bevosita PV yuzasini yuvishda qo'llash uning optik samaradorligini yanada pasayishga olib keladi [5-6].

Usul va materiallar

Shu sababli PV modullarini chang va turli iflosliklardan tozalash uchun zarur bo'lgan texnik toza suvni bevosita FESning o'zida ishlab chiqarish dolzarb ilmiy-texnik asala hisoblanadi. Mazkur maqsadda membranali distillatsiya (MD) texnologiyasini PV/T tizimi bilan integratsiya qilish istiqbolli ilmiy-amaliy yechimlardan biri hisoblanadi [7]. PV modulni nanosuyuqlik bilan sovitish jarayonida ajratib olingan past potentsialli issiqlik MD qurilmasida yer osti yoki artezian sho'r suvini tuzsizlantirish uchun foydalaniladi. Natijada, hosil qilingan distillyat (texnik toza suv) PV panel yuzasidagi chang va ifloslanishlarni adaptiv rejimda tozalashga uchun foydalaniladi. Bunday integratsiya bir vaqtning o'zida PV modul haroratini pasaytirish, elektr samaradorligini oshirish, past potentsialli issiqlikdan qayta foydalanish va PV yuzasini tozalash uchun mustaqil suv manbaini shakllantirish imkonini beradi. Shu jihatdan PV/T-MD tizimi suv tanqisligi va changlanish muammolari birgalikda kuzatiladigan quruq cho'l hududlar uchun funksional va resurs tejamkor texnologik yechim hisoblanadi.

Tadqiqot ishida mualliflar tomonidan taklif qilinayotgan PV/T-MD tizimining texnologik sxemasi 1-rasmda keltirilgan.



1-rasm. PV/T-MD tizimining texnologik sxemasi.

Taklif qilingan PV/T-MD tizimi quyidagi tartibda ishlaydi: PV/T-MD tizimida quyosh nurlanish energiyasi PV modul yuzasiga tushib, uning bir qismi elektr energiyasiga aylantiriladi,

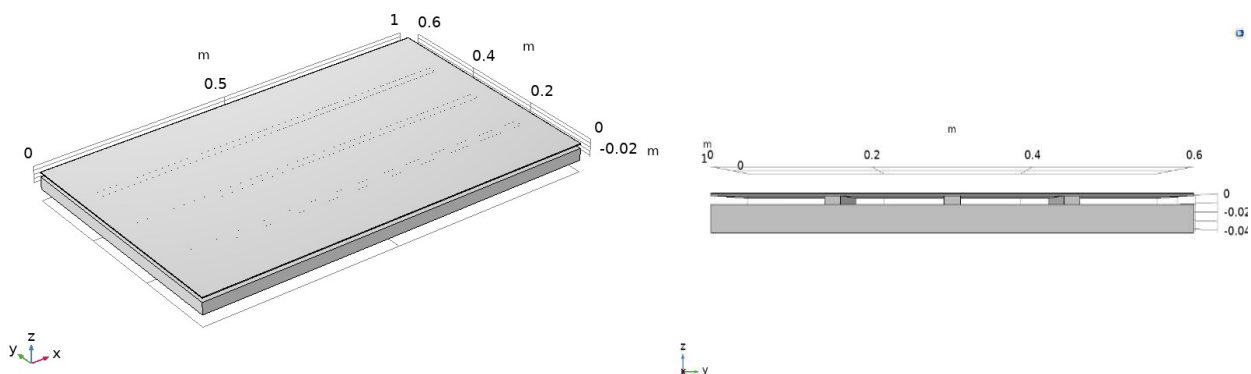


qolgan qismi esa issiqlik energiyasi ko‘rinishida modul haroratining oshishiga sabab bo‘ladi. Ushbu ortiqcha issiqlik PV modulning orqa qismida joylashtirilgan issiqlik yutuvchi kontur orqali harakatlanuvchi issiqlik tashuvchi nanosuyuqlikka uzatiladi. Nanosuyuqlik panelni sovitib, uning ishchi haroratini pasaytiradi va bir vaqtning o‘zida foydali issiqlik tashuvchisi vazifasini bajaradi. Qizigan nanosuyuqlik nasos yordamida membranali distillatsiya (MD) qurilmasining issiqlik almashinuvi konturiga uzatiladi. Bu yerda nanosuyuqlikdan olingan issiqlik yer osti yoki artezian sho‘r suvini qizdirish uchun sarflanadi. Harorat farqi ta‘sirida suv bug‘i gidrofob membrana orqali o‘tadi va sovuq tomonda kondensatsiyalanib, past mineralizatsiyali distillyat suv texnik toza suv) hosil bo‘ladi. Issiqligini bergan nanosuyuqlik sovigan holda yana PV/T moduliga qaytariladi va shu tariqa yopiq aylanish konturi sikl hosil qilinadi. MD tizimida hosil bo‘lgan distillyat adaptiv panel tozalash tizimiga uzatiladi. Tozalash jarayoni panel yuzasining changlanish darajasi, elektr quvvatining kamayishi, sirt harorati va quyosh nurlanishi kabi parametrlar asosida boshqariladi. Belgilangan mezonlardan biri kritik qiymatga yetganda tozalash tizimi ishga tushib, distillyat suv panel yuzasiga purkaladi va chang hamda boshqa ifloslanishlardan tozalanadi.

Taklif qilingan tizimning ish jarayoni PV modulini sovitish + foydali issiqlik olish + membranali distillatsiya orqali distillyat ishlab chiqarish + distillyatdan adaptiv panel tozalashda foydalanish ketma-ketligida amalga oshiriladi. Natijada, PV modulida elektr samaradorligini oshirish, ortiqcha issiqlikni rekuperatsiya qilish, texnik toza suv olish va PV modullarni avtonom tozalash jarayonlarini yagona integrallashgan konturda, ya‘ni, PV/T-MD tizimida birlashtiriladi.

Mazkur tadqiqot ishida nanosuyuqlik bilan sovitiladigan PV/T modulida kechadigan issiqlik almashinuvi va gidrodinamik jarayonlarni tadqiq etish uchun COMSOL Multiphysics dasturining chekli elementlar usuli (FEM - Finite Element Method) asosidagi hisoblash algoritmlari asosida amalga oshirildi. FEM usuli ko‘p qatlamli PV/T modul geometriyasini chekli elementlarga diskretlash orqali qattiq jismlardagi issiqlik o‘tkazuvchanlik, nanosuyuqlik oqimining Navye-Stoks va uzluksizlik tenglamalari hamda energiyaning saqlanish va aylanish tenglamalarini o‘zaro bog‘langan holda yechish imkonini beradi. Tadqiq qilinayotgan PV/T modelida shisha qoplama, kremniy asosidagi PV qatlam, alyuminiy absorber, issiqlik izolyatsiyasi hamda uchta parallel nanosuyuqlik kanali alohida hisoblash domenlari sifatida qabul qilindi. Nanosuyuqlik harakati uchun Laminar Flow, issiqlik almashinuvi uchun Heat Transfer in Solids and Fluids, ularning o‘zaro bog‘lanishi uchun esa Nonisothermal Flow interfeyslaridan bir vaqtda foydalanildi. Hisoblash natijasida PV modul yuzasidagi haroratlar maydoni, nanosuyuqlikning kirish va chiqish haroratlari, oqim tezligi hamda sovitish ta‘sirida modulning issiqlik holati aniqlandi.

COMSOL Multiphysics dasturi yordamida taklif etilgan PVT-MD tizimining PV/T modulida sodir bo‘ladigan issiqlik-gidrodinamik jarayonlarini sonli modellashirish uchun ko‘p qatlamli uch o‘lchamli hisoblash geometriyasi ishlab chiqildi. Model shisha qoplama, kremniy asosidagi PV qatlam, alyuminiy absorber, uchta parallel nanosuyuqlik kanali va issiqlik izolyatsiyasi qatlamlaridan tashkil topgan bo‘lib, PV/T modulining umumiy 3D ko‘rinishi hamda ko‘ndalang kesim yuzasi 2-rasmda hamda asosiy parametrlari 1-jadvalda keltirilgan.



2-rasm. Nanosuyuqlik bilan sovutiladigan PV/T modulining uch o‘lchamli hisoblash geometriyasi va ko‘ndalang kesimi.

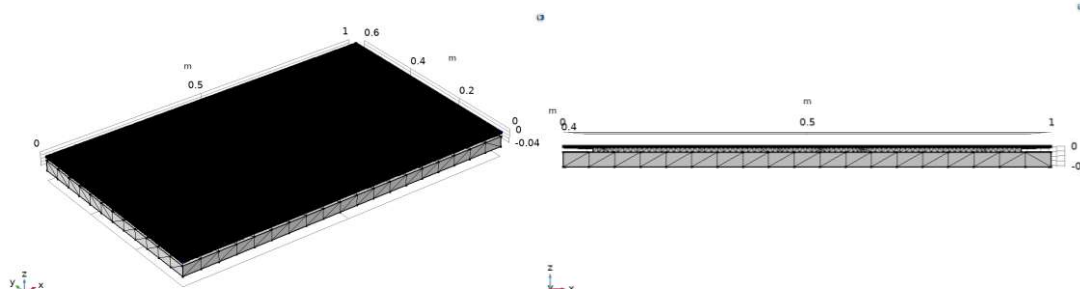


1-jadval.

PV/T modulining hisoblash modelida qabul qilingan asosiy parametrlar

Parametr nomi	Belgisi	Birligi	Qiymati
PV/T modul uzunligi	L	1.0	m
PV/T modul eni	W	0.6	m
Shisha qoplama qalinligi	δ_g	0.004	m
PV qatlam qalinligi	δ_{PV}	0.0002	m
Alyuminiy absorber qalinligi	δ_{abs}	0.002	m
Nanosuyuqlik kanali balandligi	h_{ch}	0.010	m
Nanosuyuqlik kanali eni	b_{ch}	0.020	m
Bitta kanal uzunligi	L_{ch}	0.90	m
Parallel kanallar soni	n	3	dona
Issiqlik izolyatsiyasi qalinligi	δ_{ins}	0.030	m
Nanosuyuqlik kirish harorati	T_{in}	298.15	K
Har bir kanaldagi kirish tezligi	u_{in}	0.067	m/s
Quyosh nurlanish intensivligi	q_r	800	W/m ²
Tashqi havo harorati	T_{amb}	308.15	K

Hisoblash modelida PV/T modulining umumiy geometrik o'lchamlari 1.0×0.6 m deb qabul qilindi. Absorber ostida joylashtirilgan uchta parallel kanal orqali Al₂O₃/H₂O nanosuyuqligi sovituvchi issiqlik tashuvchi sifatida qo'llaniladi. Kanallarning geometrik va gidrodinamik parametrlari PV modul yuzasida issiqlikni bir tekis olish va fotoelektrik element yuzalarini qizib ketish zonalarini kamaytirish maqsadida qabul qilindi. COMSOL Multiphysics dasturida hisoblash sohasi chekli elementlarga diskretlashtirilib, PV/T modulining ko'p qatlamli tuzilishi va nanosuyuqlik kanallaridagi issiqlik-gidrodinamik jarayonlarni hisoblash uchun 3D hisoblash to'ri shakllantirildi. PV/T modulining hisoblash sohasining chekli elementlar to'ri quyidagi 3-rasmda keltirilgan. Shuningdek, hisoblash sohasini chekli elementlarga diskretizatsiya qilishda qo'llanilgan to'r turi, elementlarning xarakterli o'lchamlari, soni va sifat ko'rsatkichlari 2-jadvalda keltirilgan.



3-rasm. PV/T modulining hisoblash sohasining chekli elementlar to'ri.

2-jadval.

Yonish kamerasi hisoblash sohasini diskretizatsiyalash parametrlari

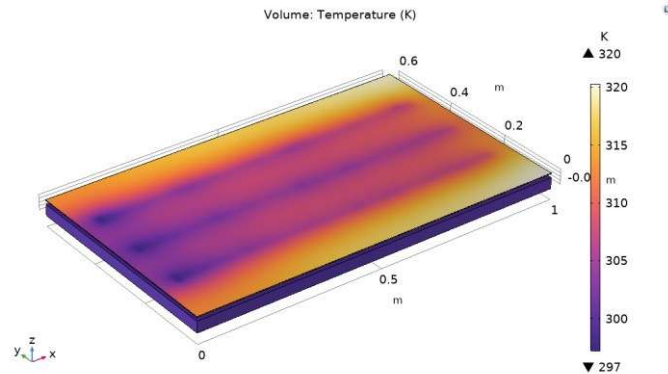
Parametr nomi	Belgilanishi va birligi	Qiymati
To'r tugunlari soni	$N_v, dona$	6 281
Tetraedrik elementlar soni	$N_{tet}, dona$	5 398
Piramidal elementlar soni	$N_{pyr}, dona$	10
Prizmatik elementlar soni	$N_{pr}, dona$	8 068
Umumiy hajmiy elementlar soni	$N_e, dona$	13 476
Minimal element sifati	$q_{min}, -$	0,06908
O'rtacha element sifati	$q_{aver}, -$	0,4681
Element hajmlari nisbati	$V_{min}/V_{max}, -$	0,01051
Hisoblash sohasining mesh hajmi	V_m, mm^3	$5,4 \times 10^{-4}$
Sifat mezon	-	Skewness



2-jadvaldan ko‘rinib turibdiki, PV/T modulining hisoblash sohasi 6 281 ta tugun va 13 476 ta hajmiy elementlar asosida diskretlashtirilgan. To‘r tarkibida tetraedrik, piramidal va prizmatik elementlardan foydalanilgan bo‘lib, o‘rtacha element sifati 0,4681 ni tashkil etdi. COMSOL Multiphysics dasturi yordamida hosil qilingan hisoblash to‘ri PV/T modulidagi issiqlik almashinuvi va nanosuyuqlik oqimi jarayonlarini sonli modellashirish uchun qabul qilindi.

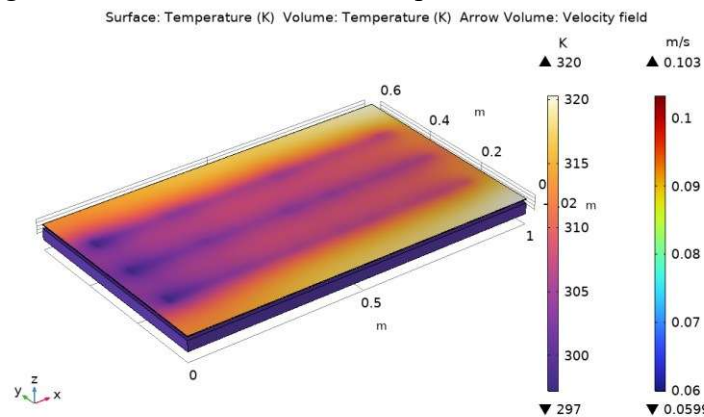
Natijalar

2-rasmda keltirilgan 3D hisoblash modeli asosida PV/T modulida issiqlik almashinuvi va nanosuyuqlik oqimining gidrodinamik xususiyatlari COMSOL Multiphysics dasturi yordamida sonli tahlil qilindi. Hisoblash natijasida PV modul yuzasi va qattiq qatlamlardagi harorat taqsimoti, nanosuyuqlik kanallaridagi bosim o‘zgarishi hamda harorat va tezlik maydonlarining o‘zaro bog‘liq taqsimoti aniqlandi hamda olingan natijalar 4-5-rasmlarda keltirildi.

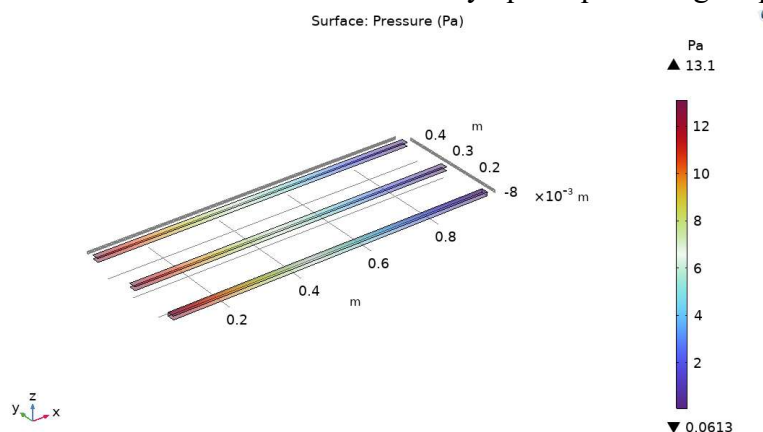


4-rasm. PV/T modulida harorat maydonining uch o‘lchamli taqsimoti.

4-rasmda keltirilgan hisoblash natijalariga ko‘ra, PV/T modulidagi harorat 297-320 K oralig‘ida o‘zgargan. Nanosuyuqlik kanallari yaqinida haroratning pasayishi kuzatilib, bu parallel sovitish kanallarining PV moduli bilan samarali issiqlik almashinuvi sodir bo‘lganligini ko‘rsatadi.



5-rasm. PV/T modulida harorat va nanosuyuqlik oqimi tezligi taqsimoti.



6-rasm. PV/T nanosuyuqlik kanallarida gidravlik bosim yo‘qotilishining taqsimlanishi.



6-rasmda keltirilgan ma'lumotlar kanallar bo'ylab bosim oqim yo'nalishida bosqichma-bosqich kamayib, maksimal bosim farqi taxminan 13,1 Pa ni tashkil etganligini ko'rsatadi. Uchta kanalda bosim taqsimotining tengligi nanosuyuqlik oqimining parallel kanallar bo'yicha nisbatan bir tekis taqsimlanganligini ko'rsatadi.

Xulosa

Tadqiqot ishida PV modullarni quruq va changlanish darajasi yuqori hududlarda samarali ishlatishga qaratilgan, nanosuyuqlik bilan sovitiladigan PV/T-MD tizimining texnologik sxema ishlab chiqildi. Taklif etilgan PV/T-MD tizimining PV modulidan konvektiv issiqlik almashinuvi hisobiga olinadigan ortiqcha issiqlik $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$ nanosuyuqligi yordamida olib chiqilib, modulning ish haroratini pasaytirish va issiqlik energiyasidan keying MD-texnologik bosqichida foydalanish imkoniyati yaratildi. Uchta parallel kanalga ega PV/T modulning 3D modeli COMSOL Multiphysics dasturida FEM asosida ishlab chiqilib, issiqlik va gidrodinamik jarayonlar sonli tahlil qilindi. Hisoblash natijalarida PV modul harorati 297-320 K oralig'ida, nanosuyuqlik oqim tezligi 0,060-0,103 m/s oralig'ida bo'lib, parallel kanallarda maksimal gidravlik bosim farqi 13,1 Pa ni tashkil qildi. PV/T konturida olingan past potentsialli issiqlikni membranali distillatsiya jarayonida sho'r yoki mineralizatsiyalangan suvni tuzsizlantirishga yo'naltirish orqali hosil bo'lgan distillyatdan esa PV panellarni changdan adaptiv tozalash tizimida foydalanish taklif etildi. Ishlab chiqilgan PV/T-MD tizimi bir vaqtning o'zida PV modulini sovitish, elektr samaradorligini oshirish, foydali issiqlikdan qayta foydalanish va panel tozalash uchun avtonom texnik toza suv manbaini shakllantirish imkonini beruvchi istiqbolli texnologik yechim ekanligini ko'rsatadi.

Foydalanilgan adabiyotlar

- [1]. Abdel-Aziz M.M., ElBahloul A.A. Innovations in improving photovoltaic efficiency: a review of performance enhancement techniques // *Energy Conversion and Management*. - 2025. - Vol. 327. - Art. 119589.
- [2]. Tembhare S.P., Barai D.P., Bhanvase B.A. Performance evaluation of nanofluids in solar thermal and solar photovoltaic systems: a comprehensive review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. - 2022. - Vol. 153. - Art. 111738.
- [3]. Togun H., Basem A.A.H., Kadhum A.M., Abed A.M., Biswas N., Rashid F.L., Tawaq H.M., Ali A.H., Mohammed H.I., Mandal D.K. Advancing photovoltaic thermal (PV/T) systems: innovative cooling technique, thermal management, and future prospects // *Solar Energy*. - 2025. - Vol. 291. - Art. 113402.
- [4]. Xiao Y., Huang P., Wei G., Cui L., Xu C., Du X. State-of-the-art review on performance enhancement of photovoltaic/thermal system integrated with phase change materials // *Journal of Energy Storage*. - 2022. - Vol. 56. - Art. 106073.
- [5]. Alao K.I., Gilani S.I.U.H., Sopian K., Alao T.O., Aslam Z. A comprehensive review of radiative cooling technologies and their integration with photovoltaic (PV) systems: challenges, opportunities, and future directions // *Solar Energy*. - 2025. - Vol. 292. - Art. 113445.
- [6]. Shaalan Z.A., Hussein A.M., Abdullah M.Z. Numerical-experimental study to improve photovoltaic panel cooling by using hybrid $\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ nanofluids // *Case Studies in Thermal Engineering*. - 2025. - Vol. 70. - Art. 106053.
- [7]. Wang N., Chu S., Cheng C., Zhang H., Chen H., Gao D. Performance research and multi-objective optimization of concentrating photovoltaic/thermal coupled air source heat pump heating system // *Energy*. - 2024. - Vol. 296. - Art. 131008.