

**NOSTATSIONAR MUHITDA ISHLASHGA MO‘LJALLANGAN
QUYOSH FOTOTERMoeLEKTRIK MODULLARINING ENERGIYA
SAMARADORLIGINI MATEMATIK MODELLASHTIRISH,
OPTIMALLASHTIRISH VA TIZIM INTEGRATSIYASI TAHLILI**

Mamarasulov Qudratbek Shuxratbek o‘g‘li

Farg‘ona politexnika instituti tayanch doktoranti

e-mail: mamarasulovqudratillo7@gmail.com

Annotatsiya: Ushbu tadqiqotda nostatsionar (vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchan) muhitda qo‘llaniluvchi quyosh fototermoelektrik (PV-TE) gibril modullarining energiya samaradorligi matematik modellashtirish, optimallashtirish va tizim integratsiyasi tahlil qilinadi. Fotovoltaik (PV) va termoelektrik (TE) texnologiyalarning birlashuvi natijasida quyosh energiyasidan to‘liqroq foydalanish imkoni paydo bo‘lib, issiqlik chiqindisini elektr energiyasiga qayta aylantirish orqali umumiy samaradorlikni oshirish maqsad qilingan. Tadqiqotda PV-TE tizimlarining ishlash tamoyillari va ularni tavsiflovchi matematik modellar keltirilib, ularning yordamida nostatsionar sharoitlarda (masalan, quyosh nurlanishining o‘zgarishi) PV-TE modullar issiqlik va elektr balansi tahlil qilinadi. Optimallashtirish bo‘limida PV va TE komponentlarining muvofiqligini ta‘minlash, maksimal quvvat olish uchun parametrlarni tanlash (masalan, termoelektrik modul soni, yuklama qarshiligi, sovutish usuli) masalalari ko‘rib chiqiladi. Integratsiya bo‘limida PV-TE modullarini boshqa energiya manbalari va issiqlik boshqaruv tizimlari (issiqlik almashgichlar, faza o‘tish materiallari va boshqalar) bilan birgalikda ishlatish strategiyalari tahlil qilinadi. Olingan natijalar grafik va diagrammalar yordamida muhokama qilinib, gibril tizimning oddiy PV panellarga nisbatan afzallik va cheklovlari yoritilgan. Tadqiqot yakunida PV-TE modullarining samaradorligini oshirish bo‘yicha xulosalar hamda kelgusida ilmiy izlanishlar uchun takliflar beriladi.

Kalit so‘zlar: Nostatsionar muhit, quyosh fototermoelektrik modullar, PV-TE tizimlar, energiya samaradorligi, matematik modellashtirish, optimallashtirish, termoelektrik generator, integratsiya, issiqlik boshqaruvi, qayta tiklanuvchi energiya

Kirish

Bugungi kunda qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan samarali foydalanish dolzarb masalalardan biridir. Quyosh fotoelektr panellari (PV) keng qo‘llanilib, to‘g‘ridan-to‘g‘ri quyosh nurlanishidan elektr energiyasi hosil qilish imkonini beradi. Biroq, an’anaviy PV panellarda quyosh energiyasining katta qismi (taxminan 60–80%i) issiqlik ko‘rinishida yo‘qotiladi va PV hujayraning qizishi uning elektr samaradorligini pasaytiradi. Shu muammo yechimi sifatida PV panelga ulanadigan

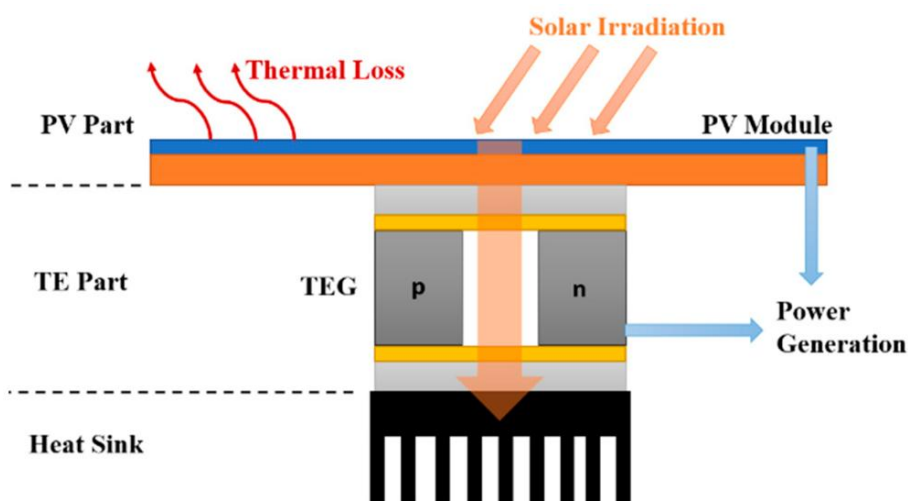
termoelektrik generatorlardan foydalanish taklif etilgan bo'lib, bunday fototermoelektrik gibrid tizimlar (PV-TE) quyosh spektrining to'liqroq qismini elektr energiyasiga aylantirishga xizmat qiladi [1]. PV-TE tizimida PV hujayra yorug'likni yutib elektr hosil qilsa, ortiqcha issiqlik maxsus termoelektrik modullar orqali qo'shimcha elektrga aylantiriladi. Ilmiy manbalarda PV va TE texnologiyalarini birlashtirish natijasida umumiy energiya chiqarish sezilarli oshishi mumkinligi ko'rsatilgan [2]. Masalan, fotoelektrik va termoelektrik qurilmalarning "yo'qotishsiz" gibridlashuvi konsepsiyasi ilk tadqiqotlarda taklif qilingan bo'lib, u PV hujayradan chiqqan issiqlikni bevosita TE modulga uzatish orqali qo'shimcha energiya olinishini namoyish etdi [3].

PV-TE tizimlarining dolzarbligi, ayniqsa, tashqi sharoitlar beqaror bo'lgan hollarda yanada ortadi. Nostatsionar muhit deganda, masalan, quyosh nurlanishi va atrof-muhit harorati vaqt bo'yicha o'zgarib turadigan sharoitlar tushuniladi. Bunday vaziyatda oddiy PV panellarning samaradorligi keskin tebranishi mumkin, chunki quyosh chiqishi, bulutlilik va boshqa omillar ta'sirida PV hujayraning harorati va ishlash nuqtasi doimiy ravishda o'zgaradi. PV-TE gibrid modullar esa bunday dinamik sharoitda ma'lum ustunlikka ega: PV hujayra yorug'lik mavjud paytda elektr ishlab chiqaradi, TE generator esa quyosh pasayganda ham avval saqlangan issiqlik hisobiga bir muddat elektr beradi yoki hech bo'lmaganda PV hujayrani sovitib, uning samaradorligini barqarorroq ushlab turadi [1]. Shunday qilib, PV-TE tizimlari qat'iy statik sharoitlarga emas, balki o'zgaruvchan muhitga ham moslashuvchan yechim sifatida qaralmoqda. Shu bilan birga, PV va TE modullarining bevosita birlashtirilishi bir qator muammolarni keltirib chiqaradi. PV hujayra samaradorligi temperaturaning oshishi bilan kamayadi, TE qurilmaniki esa aksincha, issiq-sovuq tomonlar o'rtasidagi harorat farqi oshishi bilan ortadi. Demak, PV-TE tizimda bitta komponentni (PV ni) sovuqroq saqlash kerak bo'lsa, ikkinchisi (TE) uchun iloji boricha yuqori harorat farqini ta'minlash lozim. Agar termoelektrik modul PV hujayradan ortiqcha issiqlikni yetarli darajada o'zlashtira olmasa yoki u yomon termal kontaktlangan bo'lsa, PV panel issiq ishlashda davom etib, umumiy samaradorlik pasayishi ham mumkin [2]. Masalan, yuqori samarali monokristall kremniy PV hujayra va oddiy vismut-tellurid termoelektrik elementi kombinatsiyasida deyarli qo'shimcha foyda kuzatilmagan, natijada bunday gibrid tizim yakka PV paneldan afzal bo'lmagan [2]. Aksincha, ba'zi past harorat ko'rsatkichli PV turlar (masalan, amorf kremniy) bilan termoelektrik modulni juftlashtirish samaradorlikka biroz ijobiy ta'sir ko'rsatishi mumkinligi aniqlangan [2]. Xuddi shuningdek, PV-TE juftlikni quyosh nurlanishini kuchli konsentratsiya sharoitida sinagan tadqiqotchilar haddan tashqari yuqori issiqlikda PV hujayra unumdorligi keskin tushib ketib, hibrid tizimning umumiy quvvati hatto 20% dan ortiq kamayib ketganini qayd etgan. Shunday qilib, PV va TE komponentlarini oqilona tanlash va ulash masalasi juda muhim. Yuqoridagi muammolarni hal qilish va

PV-TE gibrud modullaridan kutilgan samara olish uchun ilmiy tadqiqotlarda turli yondashuvlar qo‘llanilmoqda. Jumladan, PV-TE tizimlarni matematik modellashtirish orqali ularning issiqlik va elektr energiya almashinuvi tahlil qilinib, turli sharoitlardagi ishlashini oldindan baholash mumkin. Shuningdek, tizim parametrlarini optimallashtirish, ya‘ni eng maqbul materiallar va o‘lchamlarni tanlash hamda boshqaruv strategiyasini ishlab chiqish zarur. PV-TE modullarini real sharoitda qo‘llash uchun ularni boshqa qurilmalar bilan integratsiya qilish, masalan, samarali sovutish tizimlari yoki issiqlik saqllovchi elementlar bilan birlashtirish talab etiladi. Quyida shu masalalar bo‘yicha ilmiy adabiyotlar tahliliga tayangan holda batafsil yoritma beriladi.

Matematik Modellashtirish va Optimallashtirish

PV-TE gibrud tizimining ishlash tamoyilini tushunish uchun avvalo uning tarkibiy qismlarini va energiya balansini ko‘rib chiqamiz. PV-TE modul asosan ikki qismdan iborat: yuqori qismida odatiy quyosh fotoelektr hujayra (yoki bir necha hujayralar) joylashadi, pastki qismiga esa termoelektrik generator (odatda P-N juftliklar to‘plami ko‘rinishida) o‘rnatiladi. PV va TE qatlamlari bir-biriga termal kontakt orqali bog‘langan bo‘ladi. Quyosh nuri PV qatlamga tushganda, uning bir qismi fotoelektrik effekt yordamida elektr tokiga aylantiriladi, ortib qolgan qismi esa issiqlikka aylanib pastga – termoelektrik modulga uzatiladi. TE modulning pastki sovuq yuzasi qo‘shimcha radiator (masalan, qizigan havoni tarqatish uchun metall radiator yoki suyuqlik aylanuvchi sovutkich) bilan jihozlanadi. 1-rasmda shunday PV-TE gibrud modulning soddalashtirilgan tuzilishi keltirilgan.



Rasm 1. PV-TE gibrud tizimining sxematik ko‘rinishi: fotovoltaik (PV) qism yuqorida, termoelektrik (TE) modul pastda joylashgan va eng quyi qismda issiqlik raditori (heat sink) o‘rnatilgan.

Matematik modellar nafaqat mavjud tizimni tavsiflash, balki ularning optimallashtirish masalalarini ham yechish imkonini beradi. PV-TE tizimida optimallashtirish deganda, odatda quyidagi masalalar tushuniladi: (1) PV va TE qurilmalarini turini va xususiyatlarini mos tanlash (device matching), (2) Issiqlik almashinuvi sharoitlarini optimallashtirish (masalan, sovutish usuli, termal kontakt sifatini oshirish), (3) Ishlash rejimini boshqarish (masalan, elektr yuklamani moslashtirish, maksimal quvvat nuqtasini qidirish va h.k.). Ilmiy tadqiqotlar shuni ko'rsatmoqdaki, PV va TE qurilmaning uyg'un tanlanishi juda muhim: noto'g'ri tanlovda gibridd tizim hattoki yakka PV paneldan yomonroq natija berishi mumkin. Masalan, Bjørk va hammualliflar monokristall kremniy, amorf kremniy, CIGS va CdTe singari PV texnologiyalari uchun Bi_2Te_3 termoelektrik moduli bilan bog'lash imkoniyatini tahlil qilgan va faqat amorf kremniy holda juzziy (<1%) samaradorlik oshishi mumkinligini aniqlashgan [2]. Li va boshqalar esa nazariy model orqali monokristall kremniyni TE bilan bog'lash amalda foydasizligini ko'rsatgan [2]. Yin va Li [2] o'z tadqiqotlarida PV-TE tizimi parametrlari bo'yicha ko'p-maqсадli optimallashtirishni amalga oshirib, eng yuqori birlashtirilgan samaradorlik va yakka PV ga nisbatan maksimal yutug'ni ta'minlovchi optimal nuqtalarni qidirishgan. Ular genetik algoritim yordamida termoelektrik modulning ZT qiymatini, PV hujayra samaradorligi va issiqlik sharoitlarini o'zgartirib, optimal kombinatsiyalarni topishgan. Natijada PV-TE tizimi dizayni uchun muvofiqlik mezoni sifatida minimal zarur ZT qiymatini aniqlashgan – ya'ni ma'lum PV va issiqlik sharoiti ostida gibridd tizimning yakka PV dan ustun bo'lishi uchun TE modulning ZT ko'rsatkichi qanday bo'lishi lozimligi hisoblab chiqilgan [2]. Masalan, yuqori samarali (effektivligi 20% dan ortiq) PV hujayra va yaxshi sovutilgan sharoitda ham, agar nurlanish 30 martadan ortiq kuchaytirilsa (konsentratsiya), $ZT < 1$ bo'lgan oddiy TE moduli bilan hibridlash natijasida umumiy samaradorlik pasayishi mumkinligi ko'rsatilgan. Demak, optimal dizaynda bunday sharoit uchun $ZT > 1.5$ atrofida bo'lgan yangi termoelektrik material talab qilinadi [2]. Bundan tashqari, PV-TE tizimlarida elektr boshqaruvini optimallashtirish ham muhim yo'nalishdir. PV panel odatda o'zining maksimal quvvat nuqtasida (MPP) ishlashi uchun maxsus kuzatuv algoritmlariga (MPPT) ega bo'lsa, gibridd tizimda termoelektrik modul ham qo'shimcha yuklama bilan bog'lanadi. PV va TE modullar bir-biriga elektr jihatdan mustaqil ulangan holda, har biri uchun alohida optimal ish nuqtasini ushlab turish kerak bo'ladi. Ba'zi tadqiqotlarda PV-TE tizimlari uchun bir vaqtning o'zida PV va TE quvvatlarini maksimal qiluvchi boshqaruv uslublari taklif etilgan. Masalan, termoelektrik modulni davriy ravishda ulab-uzib turish orqali PV hujayra haroratini ma'lum darajada pasaytirib, umumiy energiya ishlab chiqarishni ko'paytirish mumkinligi ko'rsatilgan (bunday adaptiv boshqaruv tufayli PV hujayra harorati $\sim 4^\circ\text{C}$ ga pasayib, gibridd tizim samaradorligi 15% dan ortiq oshgani xabar qilingan) [1].

Integratsiya

PV-TE modullarini keng miqyosda qo'llash uchun ularni energetik tizimlarga to'g'ri integratsiya qilish zarur. Integratsiya deganda, birinchidan, PV-TE qurilmaning o'zida PV va TE komponentlarini samarali birlashtirish, ikkinchidan, ushbu gibrid modullarni qo'shimcha qurilmalar yoki manbalar bilan birgalikda ishlatish tushuniladi. Birinchi jihatdan qaraganda, PV va TE modullarining integratsiyalashuvi quyosh energiyasidan foydalanishning yangi usulini yaratadi – bunda yorug'likdan elektr olish bilan birga, avval befoyda ketayotgan issiqlik ham qayta ishlanadi. Ilmiy manbalarda PV va TE modullarini birlashtirish natijasida quyosh spektridan foydalanish kengayib, bir xil maydondan olish mumkin bo'lgan umumiy quvvat ortishi va shu bilan birga energiya tizimining qamrab olgan hududi tejalishi ta'kidlanadi [6]. Boshqacha aytganda, PV-TE modul oddiy PV paneliga nisbatan bir o'rinda ko'proq energiya "o'rib olish" imkonini beradi. Bu ayniqsa yer maydoni cheklangan yoki quvvat zichligini oshirish talab etiladigan ilovalar (masalan, binolarning tom qismiga o'rnatish, avtomobil yoki dronlarda qo'llash) uchun ahamiyatlidir.

PV-TE modullarining o'zida integratsiyani takomillashtirish uchun ularni maxsus issiqlik boshqaruv tizimlari bilan birga loyihalash muhim. Maqsad – PV hujayradan chiqayotgan issiqlikni maksimal darajada TE modulga uzatish va TE modulning sovuq tomonini samarali sovitishdir. Tadqiqotchilar turli yondashuvlarni sinab ko'rishgan. Masalan, Maleki va hammualliflar [7] o'z tajribaviy tadqiqotlarida PV-TE tizimiga maxsus issiqlik kollektori integratsiya qilganlar: yupqa plyonkali PV hujayra bilan termoelektrik modul orasiga ko'p qatlamli issiqlik almashuvchi modul joylashtirilib, quyoshdan kelayotgan ortiqcha energiyani avval absorptsiya qiluvchi qatlam yutadi, so'ngra suyuqlik oqimi orqali issiqlikni tarqatadi, va izolyatsiya qatlami yordamida bu issiqlikning tashqi muhitga chiqib ketishi minimallashtiriladi. Natijada PV hujayra ortidan keluvchi issiqlik to'liqroq TE modulgacha yetib borib, gibrid tizimdan maksimal quvvat olish ta'minlanadi. Maleki tadqiqotida, shuningdek, ikkita turli faza o'tish materiali (PCM) ham qo'llanilib, ortiqcha issiqlikni saqlash va kerak paytda (quyosh pasayganda) termoelektrik generator orqali elektrga aylantirish imkoniyati sinovdan o'tkazilgan [7]. Bunday yechim yordamida PV-TE tizimi quyosh nurlanishi notekis bo'lganda yoki qisqa muddat to'silib qolganda ham TE modullar orqali barqaror elektr ishlab chiqarishga erishiladi. Integratsiya qilinayotgan issiqlik saqlagich materiallar PV hujayra haroratining keskin o'zgarishlarini ham pasaytirib, tizimning umumiy ishlashini barqarorlashtiradi [7].

PV-TE modullarni sovitish va termal boshqaruvi masalasida ham integratsiya yechimlari katta rol o'ynaydi. Yuqorida aytib o'tilganidek, passiv ravishda radiator yoki havo oqimi bilan sovitish bir daraja foyda bersa, faol sovitish tizimlari bundanda samaraliroq bo'lishi mumkin. Misol uchun, PV-TE modulining pastki qismiga suvli sovitish konturini birlashtirish orqali termoelektrik modulning sovuq tomoni doimiy past

haroratda ushlab turiladi. Buning natijasida TE modulda katta harorat farqi saqlanib, uning elektr ishlab chiqarish ko'rsatkichi oshadi. Bulat va boshqalar [6] PV-TE tizimlarini samarali sovutish strategiyalari haqida maxsus tadqiqot o'tkazib, suyuq sovutgichli (sirkulyatsiyali) tizimlar TE modullar orqali olinadigan quvvatni sezilarli oshirishini ko'rsatganlar. Ularning ta'kidlashicha, bunday aktiv integratsiya natijasida PV hujayralarning issiqlikdan ko'riladigan zarari ham kamayadi, chunki ortiqcha issiqlik sovutgichga uzatiladi va shu orqali PV-TE tizimning umumiy foydasi yanada ortadi [6]. Shu bois amaliy qurilmalarda PV-TE panellarini kichik nasosli suv aylanish tizimi yoki issiqlik quvurlari (heat pipes) bilan integratsiya qilish bo'yicha ishlanmalar mavjud.

Xulosa

Nostatsionar sharoitlar uchun mo'ljallangan PV-TE gibril modullar – bu quyosh energiyasidan yanada samarali foydalanish uchun istiqbolli yo'nalish. Matematik modellashtirish va optimallashtirish usullari yordamida bunday tizimlarning ishlashini oldindan baholash va eng yaxshi parametrlarni aniqlash mumkin. Integratsiyalashgan yechimlar (sovitish, issiqlik saqlash va hokazo) orqali PV-TE modullar real sharoitlarda yuqori natijalar bermoqda. Ilmiy natijalar bunday modullar 1,2–1,3 barobar ko'proq elektr energiyasi ishlab chiqarishi mumkinligini ko'rsatmoqda, bu esa kelajakda quyosh energetikasini rivojlantirishda muhim rol o'ynashi mumkin. Kelgusida termoelektrik materiallar samaradorligining oshishi, yangi arzon sovutish texnologiyalarining joriy etilishi va tizim arxitekturasi takomillashuvi PV-TE modullarni amaliy energetikada keng qo'llashga zamin yaratadi. Bu esa o'z navbatida qayta tiklanuvchi energiyaning umumiy salohiyatini oshirib, barqaror va ishonchli energiya ta'minoti maqsadlariga xizmat qiladi.

Adabiyotlar:

1. Tyagi, K., Gahtori, B., Kumar, S., & Dhakate, S. R. (2023). Advances in solar thermoelectric and photovoltaic–thermoelectric hybrid systems for power generation. *Solar Energy*, 254, 195–212. DOI: 10.1016/j.solener.2023.02.053
2. Yin, E., & Li, Q. (2021). Device performance matching and optimization of photovoltaic-thermoelectric hybrid system. *Energy Conversion and Management: X*, 12, 100115. DOI: 10.1016/j.ecmx.2021.100115
3. Park, K.-T., Shin, S.-M., Tazebay, A. S., et al. (2013). Lossless hybridization between photovoltaic and thermoelectric devices. *Scientific Reports*, 3, 2123. DOI: 10.1038/srep02123
4. Wu, Y.-Y., Wu, S.-Y., & Xiao, L. (2015). Performance analysis of photovoltaic–thermoelectric hybrid system with and without glass cover. *Energy Conversion and Management*, 93, 151–159. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.01.033
5. Nazri, N. S., Fudholi, A., Solomin, E., et al. (2023). Analytical and

experimental study of hybrid photovoltaic–thermal–thermoelectric systems in sustainable energy generation. *Case Studies in Thermal Engineering*, 51, 103522. DOI: 10.1016/j.csite.2023.103522

6. Bulat, S., Büyükbıçakcı, E., & Erkovan, M. (2024). Efficiency enhancement in photovoltaic–thermoelectric hybrid systems through cooling strategies. *Energies*, 17(2), 430. DOI: 10.3390/en17020430

7. Maleki, Y., Pourfayaz, F., & Mehrpooya, M. (2022). Experimental study of a novel hybrid photovoltaic/thermal and thermoelectric generators system with dual phase change materials. *Renewable Energy*, 201, 202–215. DOI: 10.1016/j.renene.2022.11.086