TIO_2 FOTOELEKTR QATLAMI VA BI_2TE_3/SB_2TE_3 TERMOELEKTR MODULLARINI INTEGRATSIYALASH ASOSIDA GIBRID QUYOSH ENERGIYASI O‘ZGARTIRGICHINING TOK, KUCHLANISH VA QUVVAT XARAKTERISTIKALARINI TADQIQ ETISH

Atajonov Muxiddin Odiljonovich
Andijon davlat texnika instituti
Muqobil energiya manbalari kafedrasi dotsenti. Andijon, O‘zbekiston
Email: atajonovmuhiddin80@gmail.com

Annotatsiya: Maqolada TiO_2 asosidagi fotoelektr qatlami va Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 materiallari asosidagi termoelektr modullarini birlashtirish natijasida gibrid quyosh energiyasi o‘zgartirgichining tok, kuchlanish va quvvat tavsiflari tadqiq etildi. Tadqiqotda fotoelektr o‘zgartirish jarayonida quyosh nurlanishining bir qismi bevosita elektr energiyasiga aylanishi, qolgan qismi esa issiqlik ko‘rinishida ajralib chiqishi hisobga olindi. Ushbu ajralib chiqqan issiqlikdan termoelektr moduli orqali qo‘shimcha elektr energiyasi olish imkoniyati nazariy jihatdan asoslandi. Gibrid tizimning chiqish quvvati ishlab chiqilgan $P_{gib} = P_{FE} + \eta_{muj} P_{TE} - P_{yo'q}$ ifodasi asosida baholandi. Natijalar quyosh nurlanishi intensivligi ortishi bilan TiO_2 fotoelektr qatlamida fototok va chiqish quvvati oshishini, kuchlanish esa nisbatan barqaror o‘sish xususiyatiga ega ekanligi aniqlandi. Haroratlar farqi ortishi Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr modulida Zeebek kuchlanishi va termoelektr quvvatning ortishiga olib keladi. Taqqoslagan tahlil gibrid FE–TE tizimda umumiy chiqish quvvati oddiy fotoelektr tizimga nisbatan yuqoriroq bo‘lishi tasdiqlandi. Olingan natijalar TiO_2–Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 asosidagi gibrid quyosh energiyasi o‘zgartirgichlari issiqlik yo‘qotishlaridan samarali foydalanish va energiya o‘zgartirgich samaradorligini oshirish uchun muxum texnologik yechim ekanligi aniqlandi.

Kalit so‘zlar: TiO_2 fotoelektr qatlami, Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr modul, gibrid quyosh energiyasi o‘zgartirgichi, tok-kuchlanish xarakteristikasi, chiqish quvvati, termoelektr effekt, energiya samaradorligi, modellashtirish.

1. KIRISH

So‘nggi yillarda quyosh energiyasidan foydalanish texnologiyalari global energetika tizimida muhim ilmiy-amaliy yo‘nalishlardan biriga aylandi. An’anaviy fotoelektr tizimlarda quyosh nurlanishining faqat ma’lum bir qismi bevosita elektr energiyasiga aylantiriladi, qolgan qismi esa asosan issiqlik ko‘rinishida yo‘qotiladi. Fotoelektr modullarning ish harorati ortishi ularning elektr samaradorligiga salbiy ta’sir ko‘rsatadi, chunki harorat oshishi bilan ochiq zanjir kuchlanishi, quvvat nuqtasi va umumiy o‘zgartirgich samaradorligi pasayishi mumkin (Skoplaki & Palyvos, 2009). Shu sababli fotoelektr tizimlarda hosil bo‘ladigan ortiqcha issiqlikni faqat yo‘qotish sifatida emas, balki qo‘shimcha energiya manbai sifatida qayta ishlatish dolzarb ilmiy masala hisoblanadi. Fotoelektr va termoelektr tizimlar bo‘yicha tadqiqotlarda ham quyosh elementlarida hosil bo‘ladigan issiqlikni ajratib olish va undan foydali energiya sifatida foydalanish umumiy energetik samaradorlikni oshirish imkonini berishi ko‘rsatilgan (Chow, 2010; Zondag, 2008). FTE tizimlari fotoelektr va issiqlik energiyasini bitta qurilmada olishga qaratilgani hamda FE modullar harorati ortganda samaradorlik kamayishi haqidagi ma’lumotlar ilmiy adabiyotlarda keng qayd etilgan. (Wikipedia)

TiO_2 asosidagi fotoelektr qatlamlar quyosh energiyasini yutib, zaryad tashuvchilarni hosil qilish va ularni tashqi zanjirga berish jarayonlarida muhim yarimo‘tkazgich material sifatida qaraladi. Ayniqsa, TiO_2 nanostrukturali qatlamlar dye-sensitized solar cells va boshqa fotoelektrokimyoviy tizimlarda keng qo‘llaniladi, chunki ular yuqori sirt yuzasi, kimyoviy barqarorlik va elektronlarni tashish qobiliyatiga ega (O’Regan & Grätzel, 1991; Grätzel, 2003; Hagfeldt va bosh., 2010). TiO_2 asosidagi fotoanodlarda yorug‘lik yutilishi natijasida elektron-kovak juftliklari hosil bo‘ladi, elektronlar yarimo‘tkazgichning o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tadi va tashqi zanjir orqali

harakatlanadi. Biroq fotoelektr o‘zgartirgich jarayonida optik yutilish, rekombinatsiya, ichki qarshilik va issiqlik yo‘qotishlari mavjud bo‘lib, bu omillar tok, kuchlanish va chiqish quvvatining real qiymatlariga ta’sir qiladi. TiO_2 asosidagi dye-sensitized quyosh elementlarida elektron injeksiyasi, zaryad tashish va rekombinatsiya jarayonlari fotoelektr samaradorlikni belgilovchi asosiy omillar sifatida e’tirof etiladi. (Wikipedia)

Fotoelektr tizimlarda hosil bo‘ladigan ortiqcha issiqlikni termoelektr modul yordamida elektr energiyasiga aylantirish gibrid energiya yig‘ish texnologiyalarining istiqbolli yo‘nalishlaridan biridir. Ma’lumki, termoelektr generatorlar Zeebek effekti asosida ishlaydi, ya’ni issiq va sovuq tomonlar orasida haroratlar farqi hosil bo‘lganda elektr kuchlanish yuzaga keladi. Bi_2Te_3 va Sb_2Te_3 asosidagi materiallar xona haroratiga yaqin va past harorat oralig‘ida samarali ishlovchi klassik termoelektr materiallar guruhiga kiradi (Bell, 2008; Hong va bosh., 2018). Bu materiallarda yuqori Zeebek koeffitsiyenti, nisbatan yaxshi elektr o‘tkazuvchanlik va past issiqlik o‘tkazuvchanlik kombinatsiyasi termoelektr energiya o‘zgartirgichi uchun muhim ahamiyatga ega. Bi_2Te_3 asosidagi qotishmalar xona haroratida ishlovchi klassik termoelektr materiallar sifatida tavsiflanadi, termoelektr materiallarning samaradorligi esa Zeebek koeffitsiyenti, elektr o‘tkazuvchanlik va issiqlik o‘tkazuvchanlik bilan bog‘liq ekani ko‘rsatilgan. (arXiv)

Fotoelektr va termoelektr modullarni integratsiyalash orqali gibrid quyosh energiyasi o‘zgartirgichi ishlab chiqishning ilmiy mohiyati shundan iboratki, TiO_2 fotoelektr qatlamida quyosh nurlanishining bir qismi bevosita elektr energiyasiga aylantiriladi, qolgan qismidan hosil bo‘lgan issiqlik esa Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr modulida qo‘shimcha kuchlanish va tok hosil qilish uchun foydalaniladi. Bunday yondashuvda umumiy chiqish quvvati faqat fotoelektr komponent hisobiga emas, balki termoelektr komponent orqali qayta tiklangan issiqlik energiyasi hisobiga ham shakllanadi (Mukhiddin Atajonov, 2024). Kraemer va bosh. (2011) tomonidan quyosh termoelektr generatorlari bo‘yicha olib borilgan tadqiqotlar yuqori harorat gradienti va issiqlik oqimini boshqarish orqali termoelektr chiqish quvvatini oshirish mumkinligini ko‘rsatgan. Shuningdek, FE–TEG gibrid tizimlarda termoelektr modullarni quyosh panellari bilan birlashtirish ortiqcha issiqlikdan foydalanish va umumiy samaradorlikni oshirishga qaratilgan istiqbolli arxitektura sifatida baholanadi. (Wikipedia)

Mavjud ilmiy tadqiqotlarda fotoelektr tizimlarning haroratga sezgirligi, TiO_2 asosidagi fotoelektr qatlamlarning yorug‘lik yutish va zaryad tashish xususiyatlari, shuningdek, Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr materiallarining issiqlikdan elektr energiyasi olish imkoniyatlari alohida yo‘nalishlar sifatida keng o‘rganilgan (Skoplaki & Palyvos, 2009; O’Regan & Grätzel, 1991; Hagfeldt va bosh., 2010; Bell, 2008; Snyder & Toberer, 2008). Biroq TiO_2 fotoelektr qatlami va Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr modulini yagona gibrid quyosh energiyasi o‘zgartirgichida integratsiyalash, ayniqsa, tok, kuchlanish va quvvat xarakteristikalarining o‘zaro bog‘liqligini kompleks baholash masalasi yetarlicha to‘liq tadqiq etilmagan (Kraemer va bosh., 2008; Kraemer va bosh., 2011; Bjørk & Nielsen, 2015). Shu nuqtayi nazardan, mazkur maqolada TiO_2 fotoelektr qatlami va Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr modullarini integratsiyalash asosida gibrid quyosh energiyasi o‘zgartirgichining elektr chiqish parametrlarini, xususan tok, kuchlanish va quvvat xarakteristikalarini tadqiq etish maqsad qilinadi.

Mazkur tadqiqotning ilmiy ahamiyati shundaki, unda quyosh energiyasining fotoelektr va termoelektr o‘zgartirgich jarayonlari yagona energetik model doirasida qaraladi. Bunda tushayotgan quyosh nurlanishi, TiO_2 qatlamidagi fotoelektr tok va kuchlanish, Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 modulidagi haroratlar farqi, Zeebek kuchlanishi hamda umumiy gibrid chiqish quvvati o‘zaro bog‘liq parametrlar sifatida baholanadi. Amaliy jihatdan esa bunday yondashuv quyosh energiyasi o‘zgartirgichlarida issiqlik yo‘qotishlarini kamaytirish, foydali elektr quvvatini oshirish va gibrid FE–TE tizimlarning konstruktiv samaradorligini asoslash Zondag, (2008); Chow, (2010); Lorenzi va bosh., (2021) tadqiqotlaridan kelib chiqib imkon berishi aniqlandi.

2. TADQIQOTNING NAZARIY ASOSLARI

Mazkur tadqiqotning asosiy maqsadi TiO_2 asosidagi fotoelektr qatlam hamda Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 tarkibli termoelektr modullarni yagona gibrid quyosh energiyasi o‘zgartirgichi sifatida

integratsiyalashning fizik-energetik asoslarini tadqiq etish, shuningdek, ushbu tizimda hosil bo‘ladigan tok, kuchlanish va chiqish quvvati xarakteristikalarining quyosh nurlanishi intensivligi hamda haroratlar farqiga bog‘liq holdagi o‘zgarish qonuniyatlarini aniqlashdan iborat. Tadqiqotda fotoelektr o‘zgartirgich jarayonida hosil bo‘ladigan foydali elektr energiyasi va issiqlik ko‘rinishidagi qoldiq energiyadan termoelektr modul orqali qo‘shimcha elektr energiyasi olish imkoniyati baholanadi hamda gibrid FE–TE tizimining umumiy energiya samaradorligiga ta’siri ilmiy jihatdan asoslanadi (M.O. Atazhonov va bosh., 2025).

Ushbu maqsadga erishish uchun dastlab TiO_2 fotoelektr qatlamida quyosh nurlanishining yutilishi, zaryad tashuvchilar hosil bo‘lishi, ularning ajralishi va tashqi zanjirda elektr tokini shakllantirish jarayonlari tahlil qilinadi. Bunda fotoelektr qatlamning chiqish kuchlanishi, fototok va quvvat hosil qilish mexanizmlari quyosh nurlanishi intensivligi bilan bog‘liq holda ko‘rib chiqiladi.

Keyingi vazifa sifatida Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr modulida Zeebek effekti asosida elektr kuchlanish va tok hosil bo‘lish mexanizmi ilmiy asoslanadi. Bunda issiq va sovuq tomonlar orasidagi haroratlar farqi, termoelektr materiallarning Zeebek koeffitsiyenti, ichki qarshilik va issiqlik oqimi kabi omillarning termoelektr chiqish quvvatiga ta’siri aniqlanadi (A.M. Kasimakhunova, M.O. Atazhonov va bosh., 2025).

Tadqiqotning muhim vazifalaridan biri TiO_2 fotoelektr qatlami va Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr modulini yagona integratsiyalashgan gibrid FE–TE tizim sifatida modellashtirishdan iborat. Bunda fotoelektr qismda bevosita elektr energiyasiga aylantirilgan nurlanish energiyasi hamda termoelektr qismda qayta o‘zlashtiriladigan qoldiq issiqlik energiyasi umumiy energetik balans doirasida baholanadi (M.O. Atajonov. 2024).

Shuningdek, gibrid quyosh energiyasi o‘zgartirgichida tok, kuchlanish va quvvat xarakteristikalarining nurlanish intensivligi, haroratlar farqi va integratsiya samaradorligiga bog‘liq ravishda o‘zgarish dinamikasi tahlil qilinadi. Bu jarayonda fotoelektr quvvat P_{FE}, termoelektr quvvat P_{TE}, mujassamlashganlik samaradorligi η_{muj} va umumiy yo‘qotishlar $P_{yo‘q}$ hisobga olingan holda gibrid tizimning natijaviy chiqish quvvati baholanadi (A.M. Kasimakhunova, M.O. Atazhonov va bosh., 2025).

Yakuniy vazifa sifatida TiO_2–Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 asosidagi gibrid FE–TE tizimning oddiy fotoelektr tizimga nisbatan energetik ustunliklari aniqlanadi. Bunda fotoelektr qatlamda issiqlik ko‘rinishida yo‘qotiladigan energiyadan termoelektr modul orqali qo‘shimcha elektr energiyasi olish imkoniyati, chiqish quvvatining oshishi, energiyadan foydalanish koeffitsiyentining yaxshilanishi va gibrid tizimning amaliy qo‘llash istiqbollari baholanadi.

3. MATERIALLAR VA TADQIQOT METODOLOGIYASI

3.1. TiO_2 fotoelektr qatlamida energiya o‘zgarishi

TiO_2 fotoelektr qatlamida quyosh nurlanishining elektr energiyasiga aylanishi bir nechta o‘zaro bog‘liq fizik jarayonlar orqali amalga oshadi. Bunda birinchi bosqichda quyosh nurlanishi fotoelektr faol qatlam yuzasiga tushadi, ikkinchi bosqichda fotonlar yarimo‘tkazgich material yoki sezgirlashtiruvchi qatlam tomonidan yutiladi, uchinchi bosqichda zaryad tashuvchilar — elektron va kovaklar hosil bo‘ladi, keyingi bosqichda esa ushbu zaryad tashuvchilar ajratilib, tashqi elektr zanjiriga yo‘naltiriladi. TiO_2 materialining fotovoltaik tizimlarda keng qo‘llanilishi uning kimyoviy barqarorligi, nanostrukturalangan holatda yuqori sirt maydoniga ega bo‘lishi va elektronlarni tashish qobiliyati bilan bog‘liq. Ayniqsa, dye-sensitized solar cell turidagi tizimlarda TiO_2 g‘ovak fotoanod sifatida ishlatiladi va fotosensibilizator tomonidan hosil qilingan elektronlarni tashqi zanjirga uzatish vazifasini bajaradi (O’Regan & Grätzel, 1991; Hagfeldt va bosh., 2010). TiO_2 asosidagi dye-sensitized quyosh elementlarida kovak TiO_2 qatlamining fotoanod sifatida ishlatilishi va zaryad ajralish jarayonida muhim rol o‘ynashi adabiyotlarda keng tavsiflangan. (Wikipedia)

Fotoelektr qatlamga tushuvchi quyosh nurlanishining umumiy quvvati quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$P_{kir} = G \times A \qquad (1)$$

bu yerda P_{kir} — TiO_2 fotoelektr qatlamiga tushayotgan quyosh nurlanishi quvvati (W); G — quyosh nurlanishi intensivligi (W/m²); A — fotoelektr faol qatlam yuzasi (m²). Ushbu ifoda gibrid FE–TE tizimning boshlang‘ich energetik kirishini baholashda asosiy parametr hisoblanadi. Chunki keyingi bosqichlarda aynan P_{kir} qiymati fotoelektr quvvat, issiqlik yo‘qotishlari va termoelektr modulga uzatiladigan qoldiq issiqlik energiyasi o‘rtasida taqsimlanadi.

TiO_2 qatlamida foton yutilishi foton energiyasi bilan materialning energetik zonalari orasidagi bog‘liqlikka asoslanadi. Foton energiyasi quyidagicha ifodalanadi:

$$E_{FE} = \mathrm{h}\nu = \frac{\mathrm{hc}}{\lambda} P_{kir} \qquad (2)$$

bu yerda E_{FE} — foton energiyasi; h — Plank doimiysi; ν — yorug‘lik chastotasi; c — yorug‘lik tezligi; λ — to‘lqin uzunligi. Agar foton energiyasi TiO_2 yoki unga bog‘langan sezgirlashtiruvchi qatlamning energetik o‘tish shartlariga mos bo‘lsa, elektronlar yuqori energetik holatga o‘tadi. Sof TiO_2 keng taqiqlangan zona oralig‘iga ega bo‘lgani sababli quyosh spektrining asosan ultrabinafsha qismini samarali yutadi; shuning uchun amaliy fotoelektr tizimlarda TiO_2 ko‘pincha nanostrukturali, sezgirlashtirilgan yoki modifikatsiyalangan qatlam sifatida ishlatiladi. Bunday yondashuv yorug‘lik yutilishini kuchaytirish, elektronlarni yig‘ish samaradorligini oshirish va fotoelektr tokni barqarorlashtirish imkonini beradi (Grätzel, 2003; Hagfeldt va bosh., 2010).

Fotoelektr o‘zgartirgich jarayonida hosil bo‘ladigan foydali elektr quvvat kuchlanish va tok ko‘paytmasi orqali aniqlanadi:

$$P_{FE} = \mathrm{U_{FE}I_{FE}} \qquad (3)$$

bu yerda P_{FE} — TiO_2 fotoelektr qatlamidan olinadigan chiqish quvvati (W), U_{FE} — fotoelektr kuchlanish (V), I_{FE} — fotoelektr tok (A). Mazkur ifoda TiO_2 qatlamining bevosita elektr energiyasiga aylantira oladigan quvvatini baholash uchun ishlatiladi O’Regan & Grätzel, 1991; Grätzel, 2003; Hagfeldt va bosh., 2010). Quyosh nurlanishi intensivligi ortishi bilan fotonlar oqimi ko‘payadi, natijada zaryad tashuvchilar soni ortadi va fotoelektr tok qiymati oshadi. Biroq kuchlanishning ortishi tokka nisbatan cheklangan bo‘ladi, chunki u materialning energetik zonalari, rekombinatsiya jarayonlari, ichki qarshilik va kontakt xossalari bilan belgilanadi (De Soto va bosh., 2006; Skoplaki & Palyvos, 2009).

TiO_2 fotoelektr qatlamining tok-kuchlanish xarakteristikasi yarimo‘tkazgich fotoelementlar uchun qo‘llaniladigan umumiy model asosida quyidagicha ifodalanishi mumkin (Shockley & Queisser, 1961; De Soto va bosh., 2006):

$$I_{FE} = I_{foto} - I_0 \left[exp\left(\frac{q(U_{FE}+I_{FE}R_S)}{n\kappa T} - 1\right)\right] - \frac{U_{FE}+I_{FE}R_S}{R_{sh}} \qquad (4)$$

bu yerda I_{foto} — yorug‘lik ta’sirida hosil bo‘lgan fototok, I_0 — teskari to‘yinish toki, q — elektron zaryadi, n — idealik koeffitsiyenti, k — Boltsman doimiysi, T — qatlam harorati, R_s — ketma-ket qarshilik va R_{sh} — shunt qarshiligi. Ushbu model fotoelektr tizimda tok va kuchlanishning real qiymatlari faqat nurlanish intensivligi bilan emas, balki ichki qarshiliklar va harorat bilan ham bog‘liq ekanligini ko‘rsatadi. Fotoelektr modullarning haroratga sezgirligi va harorat ortishi bilan elektr samaradorlikning pasayishi bir qator tadqiqotlarda asoslangan (Skoplaki & Palyvos, 2009). Shu sababli TiO_2 fotoelektr qatlamida hosil bo‘ladigan issiqlik energiyasini nazorat qilish va undan termoelektr modul orqali foydalanish gibrid tizim samaradorligini oshirishda muhim ahamiyatga ega.

TiO_2 fotoelektr qatlamida energiya balansi quyidagi umumlashtirilgan ko‘rinishda ifodalanadi:

$$P_{kir} = P_{FE} + Q_{iss} + P_{opt.yo‘q} + P_{ekr.yo‘q} + P_{el.yo‘q} \qquad (5)$$

bu yerda Q_{iss} — fotoelektr qatlamda issiqlik ko‘rinishida ajraladigan qoldiq energiya; $P_{opt.yo‘q}$ — akslanish, o‘tish va to‘liq yutilmaslik bilan bog‘liq optik yo‘qotishlar; $P_{ekr.yo‘q}$ — elektron-kovak

rekombinatsiyasi bilan bog‘liq yo‘qotishlar; $P_{el.yo'q}$ — kontaktlar va ichki qarshiliklar bilan bog‘liq elektr yo‘qotishlar. Ushbu tenglama shuni ko‘rsatadiki, fotoelektr qatlamga tushayotgan quyosh energiyasining hammasi foydali elektr quvvatiga aylanmaydi. Uning ma’lum qismi optik, rekombinatsion va elektr yo‘qotishlar sifatida kamayadi, muhim qismi esa issiqlik ko‘rinishida ajraladi.

Gibrid FE–TE tizim nuqtayi nazaridan aynan Q_{iss} komponenti alohida ilmiy ahamiyatga ega. An’anaviy fotoelektr tizimda bu issiqlik ko‘pincha foydasiz yo‘qotish sifatida qaraladi. Biroq TiO_2 fotoelektr qatlami Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr moduli bilan integratsiyalashganda, ushbu issiqlik termoelektr o‘zgartirgich uchun manba vazifasini bajarishi mumkin Kraemer va bosh., 2008; Kraemer va bosh., 2011; Bjørk & Nielsen, 2015). Natijada fotoelektr qatlamda birlamchi elektr quvvat P_{FE} hosil bo‘ladi, qoldiq issiqlik esa termoelektr modulda qo‘shimcha quvvat P_{TE} shakllanishiga xizmat qiladi (Bell, 2008; Snyder & Toberer, 2008). Bu yondashuv quyosh energiyasi oqimini kompleks o‘zlashtirishga imkon beradi va gibrid tizimda umumiy chiqish quvvatini oshirish uchun nazariy asos yaratadi (Zondag, 2008; Chow, 2010; Lorenzi va bosh., 2021).

TiO_2 qatlamining fotoelektr samaradorligi quyidagi nisbat orqali baholanishi mumkin:

$$\eta_{FE} = \frac{P_{FE}}{P_{kir}} \times 100\% \qquad (6)$$

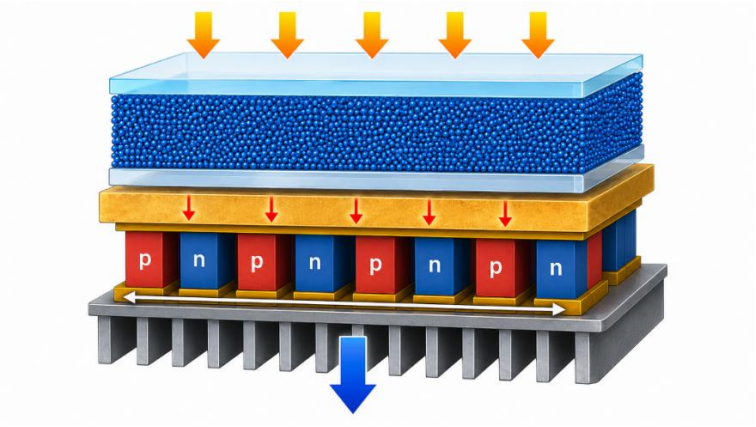
Ushbu ko‘rsatkich TiO_2 qatlamiga tushgan quyosh energiyasining qanchalik qismi bevosita elektr energiyasiga aylanganini ko‘rsatadi (Grätzel, 2003; Hagfeldt va bosh., 2010). Gibrid quyosh energiyasi o‘zgartirgichida esa faqat η_{FE} emas, balki fotoelektr qatlamdan ajraladigan qoldiq issiqlikning termoelektr modul orqali qayta elektr energiyasiga aylantirilish darajasi ham muhim hisoblanadi. Shuning uchun TiO_2 fotoelektr qatlamida energiya o‘zgarishini o‘rganish gibrid tizimning keyingi termoelektr bosqichini asoslash uchun zarur nazariy poydevor vazifasini bajaradi (Kraemer va bosh., 2011; Lorenzi va bosh., 2021).

Shunday qilib, TiO_2 fotoelektr qatlamida energiya o‘zgarishi quyosh nurlanishining yutilishi, zaryad tashuvchilar hosil bo‘lishi, ularning ajratilishi, tashqi zanjirga uzatilishi va qoldiq issiqlikning shakllanishi kabi ketma-ket jarayonlardan iborat (O’Regan & Grätzel, 1991; Grätzel, 2003; Hagfeldt va bosh., 2010). Ushbu jarayonlarning har biri gibrid FE–TE tizimning tok, kuchlanish va quvvat xarakteristikalariga bevosita ta’sir ko‘rsatadi (De Soto va bosh., 2006; Skoplaki & Palyvos, 2009). Mazkur tadqiqotda TiO_2 qatlamidan olinadigan P_{FE} quvvat hamda qoldiq issiqlik Q_{iss} keyingi bosqichda Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr modulining kirish energetik omili sifatida qaraladi (Bell, 2008; Snyder & Toberer, 2008; Poudel va bosh., 2008).

3.2. Tadqiqot metodikasi

Mazkur tadqiqotda TiO_2 fotoelektr qatlami va Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr modulidan tashkil topgan gibrid FE–TE quyosh energiyasi o‘zgartirgichining elektr chiqish parametrlarini baholash uchun nazariy-hisoblash, parametrik modellashtirish va taqqoslama tahlil usullari qo‘llanildi. Metodik yondashuv fotoelektr va termoelektr qismlarni alohida emas, balki yagona mujassamlashgan tizim sifatida tahlil qilishga qaratildi. Bunda tok, kuchlanish va quvvat xarakteristikalari quyosh nurlanishi intensivligi, haroratlar farqi, ichki qarshiliklar va mujassamlashuv samaradorligi bilan bog‘liq holda baholandi. Mazkur yondashuv fotoelektr tizimlarni matematik modellashtirish hamda PV–TEG gibrid tizimlar samaradorligini baholashga oid ilmiy ishlarga tayangan holda shakllantirildi (De Soto va bosh., 2006; Bjørk & Nielsen, 2015).

Tadqiqot obyekti sifatida (1-rasm) TiO_2 fotoelektr qatlami, issiqlik uzatish interfeysi va Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr modulidan iborat gibrid quyosh energiyasi o‘zgartirgichi qabul qilindi. Ushbu tizimda TiO_2 qatlami quyosh nurlanishini bevosita elektr energiyasiga aylantiruvchi asosiy fotoelektr element sifatida qaraldi. Fotoelektr jarayonda hosil bo‘ladigan qoldiq issiqlik esa Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr moduli uchun kirish energetik omili sifatida baholandi. Shu orqali tizimda birlamchi fotoelektr quvvat bilan bir qatorda qo‘shimcha termoelektr quvvat olish imkoniyati tahlil qilindi.



1-rasm. TiO_2 fotoelektr qatlami va Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr moduli asosidagi mujassamlashgan gibrid FE–TE tizimning konseptual tuzilishi

Hisoblash ishlari uch bosqichda bajarildi. Birinchi bosqichda TiO_2 fotoelektr qatlamining quyosh nurlanishi intensivligiga bog‘liq kuchlanish, tok va quvvat qiymatlari aniqlandi. Ikkinchi bosqichda fotoelektr qatlamdan ajraladigan qoldiq issiqlik asosida Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr modulida haroratlar farqi ta’sirida hosil bo‘ladigan termoelektr kuchlanish, tok va quvvat hisoblandi. Uchinchi bosqichda esa fotoelektr va termoelektr qismlarning chiqish quvvatlari mujassam hoatdagi samaradorligi hamda umumiy yo‘qotishlarni hisobga olgan holda yagona gibrid tizim sifatida baholandi. Bunday tizimlarda natijaviy samaradorlik harorat gradienti, issiqlik uzatish sifati va mujassamlik sharoitlariga bevosita bog‘liq bo‘ladi (Kraemer va bosh., 2011; Lorenzi va bosh., 2021).

Parametrik tahlilda quyosh nurlanishi intensivligi “G” uchun 200, 400, 600, 800 va 1000 W/m² qiymatlari tanlandi. Termoelektr modulda haroratlar farqi ΔT=5 dan 40 K gacha oralig‘ida o‘zgartirildi. Hisoblashlarda fotoelektr qatlam yuzasi, quyosh nurlanishi intensivligi, fotoelektr kuchlanish va tok, Zeebek koeffitsiyenti, termoelektr modulning ichki qarshiligi, tashqi yuklama qarshiligi, issiq va sovuq tomon haroratlari hamda mujassamlashuv samaradorligi asosiy kirish parametrlari sifatida olindi. Chiqish parametrlari sifatida U_{FE}, I_{FE}, P_{FE}, U_{TE}, I_{TE}, P_{TE}, P_{gib} va η_{gib} qiymatlari baholandi.

Gibrid tizimning umumiy foydali chiqish quvvati quyidagi ifoda orqali aniqlandi:

$$P_{gib} = P_{FE} + \eta_{muj} P_{TE} - P_{yo‘q} \qquad (7)$$

bu yerda P_{gib} — gibrid tizimning foydali chiqish quvvati, $P_{yo‘q}$ — optik, issiqlik, elektr va kontakt yo‘qotishlar yig‘indisi. Ushbu ifoda gibrid tizim quvvatini faqat P_{FE} va P_{TE} yig‘indisi sifatida emas, balki real yo‘qotishlar va integratsiya sharoitlarini hisobga olgan holda baholash imkonini beradi.

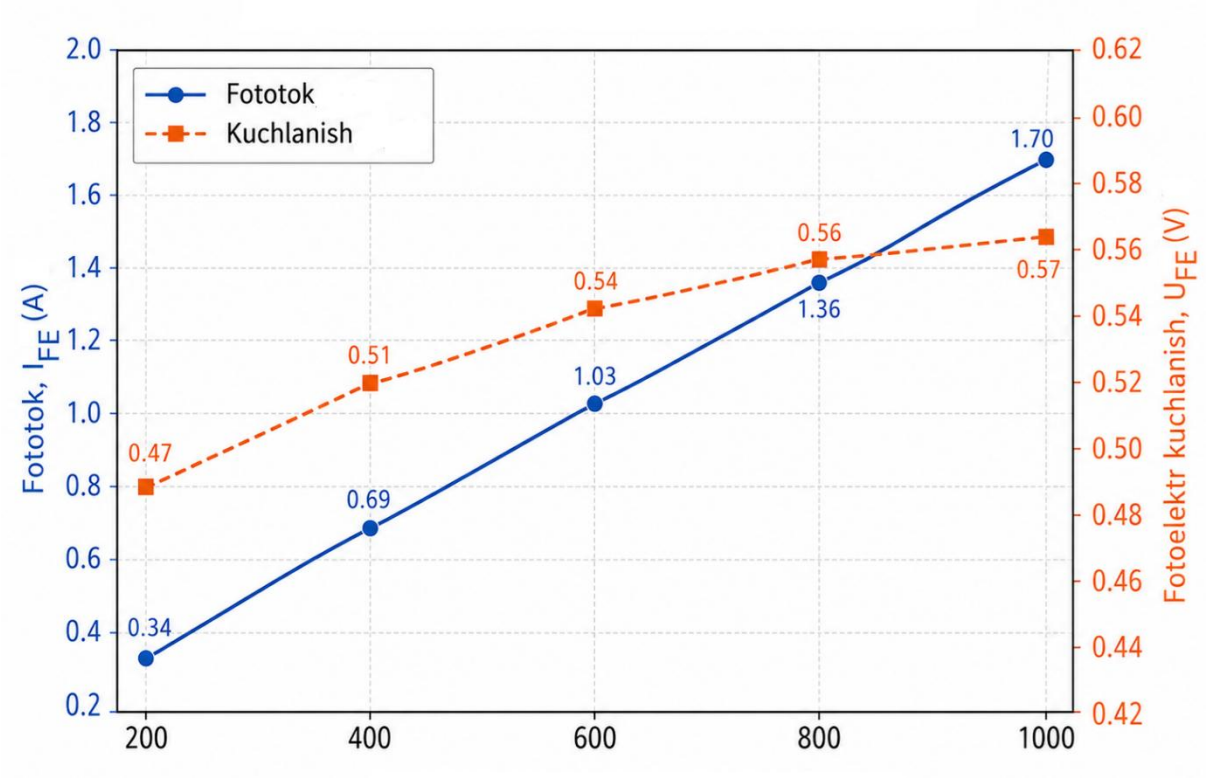
Tizim samaradorligi bir nechta mezon asosida, gibrid tizim quvvatining oddiy fotoelektr tizimga nisbatan ortishi, termoelektr moduldan olinadigan qo‘shimcha quvvatning yo‘qotishlarni qoplash darajasi, ΔT ortganda termoelektr qism ulushining o‘zgarishi hamda nurlanish intensivligi oshganda P_{FE} va P_{gib} qiymatlarining dinamikasi tahlil qilindi. Tadqiqotda materiallarning asosiy elektr va issiqlik xossalari tanlangan ish oralig‘ida nisbatan barqaror deb qabul qilindi, kontakt qarshiliklari va issiqlik yo‘qotishlari esa umumlashtirilgan $P_{yo‘q}$ tarkibiga kiritildi. Yakuniy natijalar fotoelektr, termoelektr va gibrid tizim quvvatlarini o‘zaro taqqoslovchi jadval hamda grafiklar asosida tahlil qilindi.

Ushbu metodika gibrid quyosh energiyasi o‘zgartirgichida energiya oqimlarining qanday taqsimlanishini, fotoelektr va termoelektr modullar o‘rtasidagi funksional bog‘liqlikni hamda mujassamlash natijasida chiqish quvvati va samaradorlik ko‘rsatkichlarida yuzaga keladigan o‘zgarishlarni aniqlashga xizmat qiladi.

4. NATIJALAR VA MUHOKAMA

4.1. Quyosh nurlanishi intensivligining tok va kuchlanishga ta’siri

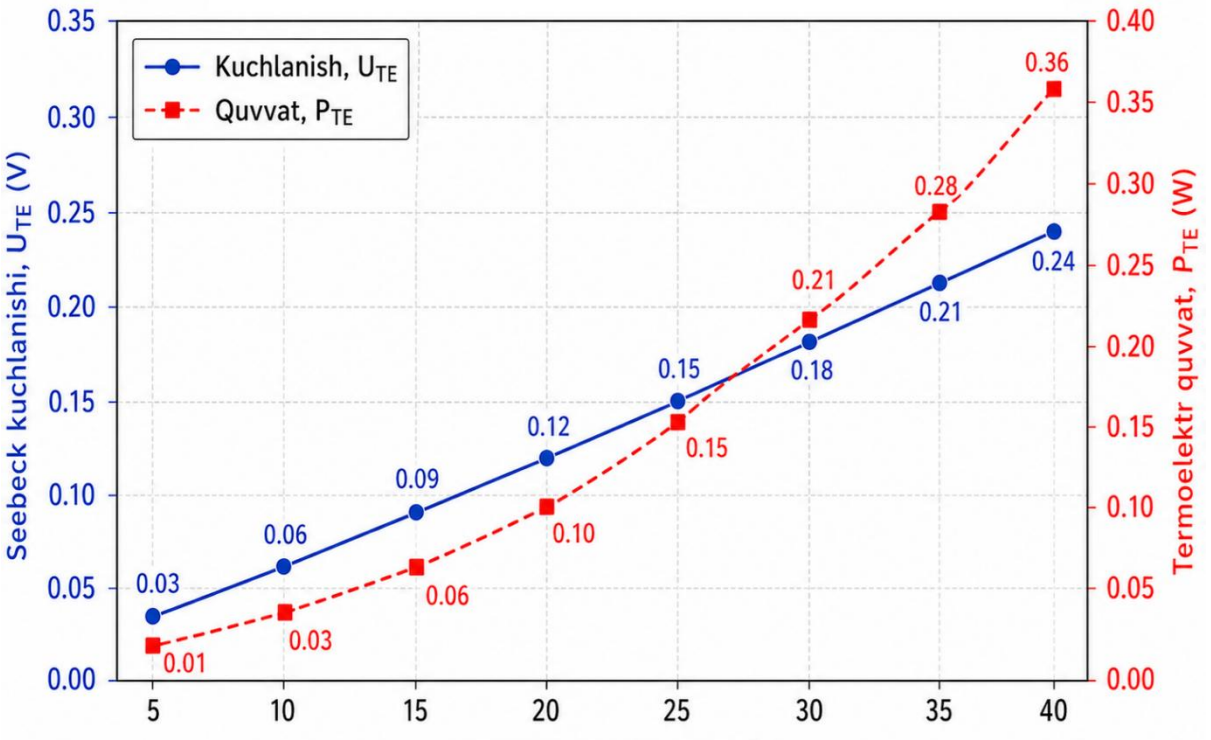
Bu qismda quyosh nurlanishi ortishi bilan TiO_2 fotoelektr qatlamida fototok ortishi, kuchlanish esa ma’lum chegaragacha barqaror o‘sishini ko‘rishimiz mumkin.



2-rasm. Fotoelektr tok va kuchlanishning quyosh nurlanishi intensivligiga bog‘liqligi

4.2. Haroratlar farqining termoelektr kuchlanishga ta’siri

Quyidagi rasmda Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr modulida ΔT ortishi bilan Zeebek kuchlanishi va termoelektr quvvat ortishi keltirilgan.



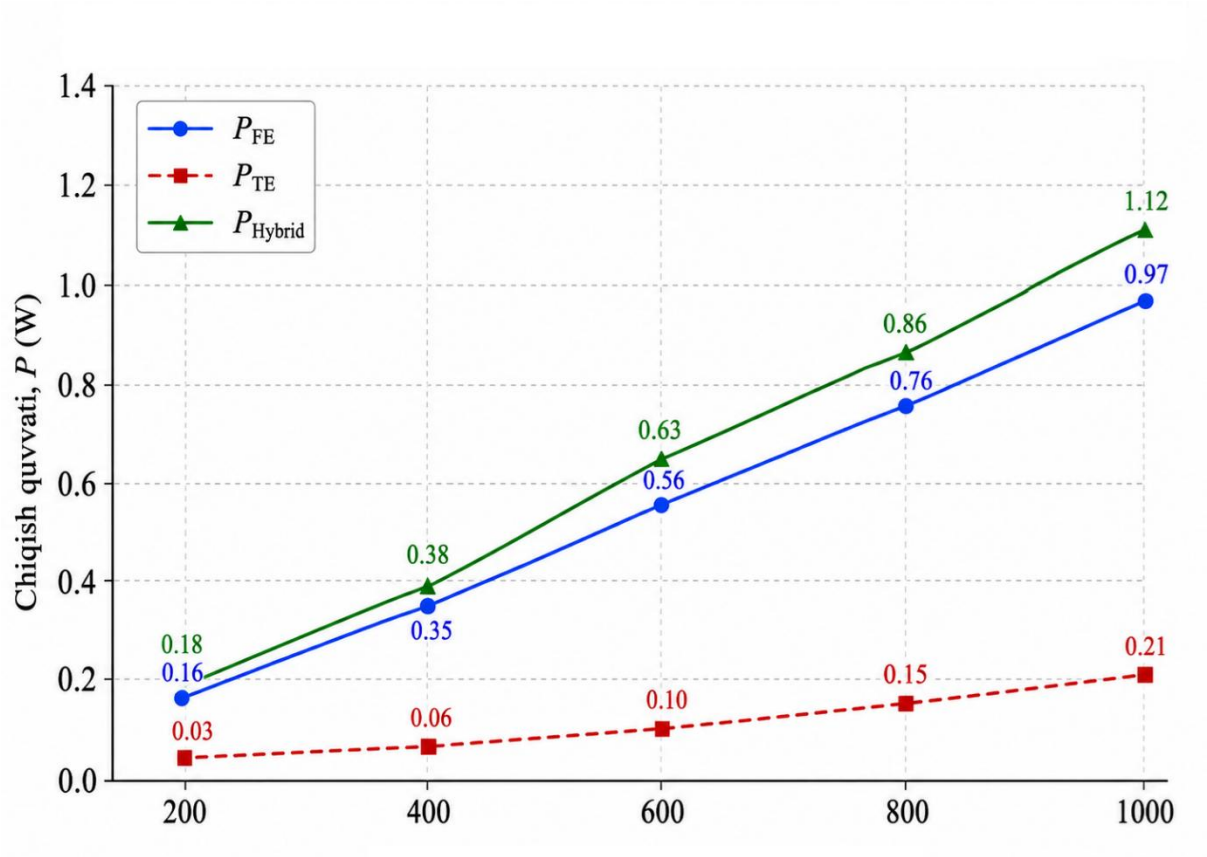
3-rasm. Termoelektr kuchlanish va quvvatning haroratlar farqiga bog‘liqligi

4.3. Gibrid tizim chiqish quvvatining tahlili

Quyidagi jadvalda fotoelektr P_{FE}, termoelektr P_{TE} va gibrid tizim chiqish quvvati P_{gib} qiymatlari taqqoslangan. Natijalardan ko‘rinadiki, quyosh nurlanishi intensivligi ortishi bilan barcha quvvat ko‘rsatkichlari oshadi. P_{FE} asosiy quvvat manbai bo‘lsa, P_{TE} fotoelektr qatlamda hosil bo‘lgan qoldiq issiqlik hisobiga qo‘shimcha quvvat beradi.

1-jadval. Fotoelektr, termoelektr va gibrid tizim chiqish parametrlarining taqqoslanishi

$G, {}^{W}/_{m^2}$	U_{FE}, V	I_{FE}, A	P_{FE}, W	$\Delta T, K$	U_{TE}, V	I_{TE}, A	P_{TE}, W	P_{gib}, W
200	0.47	0.34	0.16	10	0.06	0.50	0.03	0.18
400	0.51	0.69	0.35	15	0.09	0.67	0.06	0.38
600	0.54	1.03	0.56	20	0.12	0.83	0.10	0.63
800	0.56	1.36	0.76	25	0.15	1.00	0.15	0.86
1000	0.57	1.70	0.97	30	0.18	1.17	0.21	1.12



4-rasm. Fotoelektr va gibrid FE–TE tizim chiqish quvvatining taqqoslanishi

4-rasmda fotoelektr quvvat P_{FE}, termoelektr quvvat P_{TE} va gibrid tizimning umumiy chiqish quvvati P_{gib} ning quyosh nurlanishi intensivligiga bog‘liqligi tasvirlanadi. Grafikda P_{FE} egri chizig‘i nurlanish intensivligi ortishi bilan deyarli chiziqli oshadi. Bu TiO_2 fotoelektr qatlamida fototokning ortishi bilan bevosita bog‘liq.

P_{TE} egri chizig‘i P_{FE} ga nisbatan pastroq qiymatlarda joylashgan bo‘lib, termoelektr modulning tizimga qo‘shimcha quvvat beruvchi yordamchi manba sifatida ishlashini ko‘rsatadi. Biroq P_{TE} qiymatlari ham nurlanish intensivligi va haroratlar farqi ortishi bilan bosqichma-bosqich ko‘payadi.

Grafikdagi eng yuqori egri chiziq P_{gib} ga tegishli bo‘lib, u barcha nuqtalarda P_{FE} dan yuqorida joylashadi. Bu gibrid FE–TE tizimning oddiy fotoelektr tizimga nisbatan yuqoriroq chiqish quvvatiga ega ekanligini ko‘rsatadi. Ayniqsa, yuqori nurlanish intensivligida farq yanada sezilarli bo‘ladi: 1000 W/m² sharoitida gibrid tizim quvvati 1.12 W ga yetib, fotoelektr tizim quvvatidan 0.15 W ga yuqori bo‘ladi.

5. MUHOKAMA

Olingan natijalar TiO_2 fotoelektr qatlami va Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr modulini yagona gibrid FE–TE tizim sifatida qo‘llash quyosh energiyasidan samaraliroq foydalanish imkonini berishini ko‘rsatdi. Nurlanish intensivligi G=200 W/m² dan 1000 W/m² gacha oshganda fotoelektr tok 0,34 A dan 1,70 A gacha, fotoelektr kuchlanish esa 0,47 V dan 0,57 V gacha ortdi. Natijada $P_{FE} = 0{,}16$ dan $0.97\ W$ gacha oshdi. Bu TiO_2 qatlamida fotonlar oqimi ortishi bilan zaryad tashuvchilar soni ko‘payishini va fotoelektr quvvatning oshishini ko‘rsatadi.

Termoelektr qismda haroratlar farqi $\Delta T = 5K$ dan $40K$ gacha oshirilganda U_{TE} qiymati 0,03 V dan 0,24 V gacha, P_{TE} esa 0,01 W dan 0,36 W gacha ortdi. Bu Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 moduli TiO_2 qatlamida hosil bo‘ladigan qoldiq issiqlikdan qo‘shimcha elektr energiyasi olishga xizmat qilishini tasdiqlaydi.

Gibrid tizimda P_{gib} barcha holatlarda P_{FE} dan yuqori bo‘ldi. Masalan, (G=200 W/m² da $P_{FE} = 0{,}16$ W va $P_{gib} = 0{,}18$ W, G=1000 W/m² da esa $P_{FE} = 0{,}97$ W va $P_{gib} = 1.12\ W$ ni tashkil etdi. Demak, FE–TE mujassamlashuvi fotoelektr tizimda issiqlik sifatida yo‘qotiladigan energiyaning bir qismini foydali elektr quvvatiga aylantirish orqali umumiy chiqish quvvatini oshiradi.

Shu bilan birga, gibrid tizim samaradorligi η_{muj}, issiqlik interfeysi sifati, sovitish sharoiti va elektr kontakt qarshiliklariga bog‘liq. Shuning uchun tizim quvvati faqat $P_{FE} + P_{TE}$ yig‘indisi bilan emas, balki, $P_{gib} = P_{FE} + \eta_{muj} P_{TE} - P_{yo‘q}$ ifodasi orqali baholanishi maqsadga muvofiqdir.

Umuman olganda, olingan natijalar TiO_2 fotoelektr qatlami va Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr moduliga asoslangan gibrid quyosh energiyasi o‘zgartirgichi an’anaviy fotoelektr tizimlarga nisbatan yuqoriroq energiya chiqishini ta’minlash imkoniyatiga ega ekanligini ko‘rsatadi. Bunday tizimlarda asosiy ilmiy-texnik masala fotoelektr va termoelektr jarayonlarni faqat mexanik birlashtirish emas, balki ularning issiqlik-elektr bog‘lanishini optimal tashkil etishdan iborat. Shu jihatdan, gibrid FE–TE tizimlar quyosh energiyasidan samarali foydalanish, issiqlik yo‘qotishlarini kamaytirish va umumiy elektr quvvatini oshirishga qaratilgan istiqbolli yo‘nalish sifatida baholanishi mumkin.

6. XULOSA

Olingan natijalar TiO_2 fotoelektr qatlami va Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr modulini mujassamlashishi gibrid quyosh energiyasi o‘zgartirgichining chiqish quvvatini oshirish imkonini berishini ko‘rsatdi. Quyosh nurlanishi intensivligi ortishi bilan TiO_2 qatlamida fototok va fotoelektr quvvat oshadi, kuchlanish esa nisbatan barqaror o‘sish xususiyatiga ega bo‘ladi.

Haroratlar farqi ortishi Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr modulida Zeebek kuchlanishi va termoelektr quvvatning oshishiga olib keladi. Natijada fotoelektr qatlamda issiqlik ko‘rinishida yo‘qotiladigan energiyaning bir qismi qo‘shimcha elektr energiyasiga aylantiriladi. Gibrid tizimda P_{gib} qiymatining P_{FE} ga nisbatan yuqoriroq bo‘lishi FE–TE mujassamlashganining energetik jihatdan samarali ekanligini tasdiqlaydi.

Shu bilan birga, gibrid tizim samaradorligi mujassamlik samaradorligi, issiqlik interfeysi sifati, sovitish sharoitlari va elektr kontakt qarshiliklariga bog‘liq. Demak, TiO_2–Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 asosidagi gibrid FE–TE tizim quyosh energiyasidan samarali foydalanish va chiqish quvvatini oshirish uchun istiqbolli texnologik yechim hisoblanadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

[1]. O’Regan, B., & Grätzel, M. (1991). A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films. Nature, 353, 737–740. https://doi.org/10.1038/353737a0

[2]. Grätzel, M. (2001). Photoelectrochemical cells. Nature, 414, 338–344. https://doi.org/10.1038/35104607

[3]. Grätzel, M. (2003). Dye-sensitized solar cells. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, 4(2), 145–153. https://doi.org/10.1016/S1389-5567(03)00026-1

[4]. Hagfeldt, A., Boschloo, G., Sun, L., Kloo, L., & Pettersson, H. (2010). Dye-sensitized solar cells. Chemical Reviews, 110(11), 6595–6663. https://doi.org/10.1021/cr900356p

[5]. Chen, X., & Mao, S. S. (2007). Titanium dioxide nanomaterials: Synthesis, properties, modifications, and applications. Chemical Reviews, 107 (7), 2891–2959. https://doi.org/10.1021/cr0500535

[6]. Fujishima, A., & Honda, K. (1972). Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. Nature, 238, 37–38. https://doi.org/10.1038/238037a0

[7]. Fujishima, A., Zhang, X., & Tryk, D. A. (2008). TiO_2 photocatalysis and related surface phenomena. Surface Science Reports, 63 (12), 515–582. https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2008.10.001

[8]. Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. Solar Energy, 83 (5), 614–624. https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008

[9]. De Soto, W., Klein, S. A., & Beckman, W. A. (2006). Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. Solar Energy, 80 (1), 78–88. https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.06.010

[10]. Shockley, W., & Queisser, H. J. (1961). Detailed balance limit of efficiency of p–n junction solar cells. Journal of Applied Physics, 32 (3), 510–519. https://doi.org/10.1063/1.1736034

[11]. Zondag, H. A. (2008). Flat-plate PV-thermal collectors and systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12 (4), 891–959. https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.12.012

[12]. Chow, T. T. (2010). A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. Applied Energy, 87 (2), 365–379. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.037

[13]. Kraemer, D., Hu, L., Muto, A., Chen, X., & Chen, G. (2008). Photovoltaic-thermoelectric hybrid systems: A general optimization methodology. Applied Physics Letters, 92 (24), 243503. https://doi.org/10.1063/1.2947591

[14]. Atajonov, M.: Development of technology for the development of highly efficient combinations of solar and thermoelectric generators. AIP Conf. Proc. 3045, 020011 (2024). https://doi.org/10.1063/5.0197733

[15]. Kraemer, D., Poudel, B., Feng, H.-P., Caylor, J. C., Yu, B., Yan, X., Ma, Y., Wang, X., Wang, D., Muto, A., McEnaney, K., Chiesa, M., Ren, Z., & Chen, G. (2011). High-performance flat-panel solar thermoelectric generators with high thermal concentration. Nature Materials, 10, 532–538. https://doi.org/10.1038/nmat3013

[16]. Bjørk, R., & Nielsen, K. K. (2015). The performance of a combined solar photovoltaic (PV) and thermoelectric generator (TEG) system. Solar Energy, 120, 187–194. https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.07.035

[17]. Lorenzi, B., Mariani, P., Reale, A., Di Carlo, A., Chen, G., & Narducci, D. (2021). Practical development of efficient thermoelectric-photovoltaic hybrid systems based on wide-gap solar cells. Applied Energy, 300, 117343. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117343

[18]. Bell, L. E. (2008). Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems. Science, 321 (5895), 1457–1461. https://doi.org/10.1126/science.1158899

[19]. Snyder, G. J., & Toberer, E. S. (2008). Complex thermoelectric materials. Nature Materials, 7, 105–114. https://doi.org/10.1038/nmat2090

[20]. Venkatasubramanian, R., Siivola, E., Colpitts, T., & O'Quinn, B. (2001). Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit. Nature, 413, 597–602. https://doi.org/10.1038/35098012

[21]. M. O. Atazhonov, Qudratbek Mamarasulov, L. M. Gimaeva, and R. I. Suleimanov "Mathematical model of a photoelectric thermal electric energy converter under load", Proc. SPIE 13662, Fourth International Conference on Digital Technologies, Optics, and Materials Science (DTIEE 2025), 136620O (5 June 2025); https://doi.org/10.1117/12.3072651.

[22]. Poudel, B., Hao, Q., Ma, Y., Lan, Y., Minnich, A., Yu, B., Yan, X., Wang, D., Muto, A., Vashaee, D., Chen, X., Liu, J., Dresselhaus, M. S., Chen, G., & Ren, Z. (2008). High-thermoelectric performance of nanostructured bismuth antimony telluride bulk alloys. Science, 320 (5876), 634–638. https://doi.org/10.1126/science.1156446

[23]. Kim, S. I., Lee, K. H., Mun, H. A., Kim, H. S., Hwang, S. W., Roh, J. W., Yang, D. J., Shin, W. H., Li, X. S., Lee, Y. H., Snyder, G. J., & Kim, S. W. (2015). Dense dislocation arrays embedded in grain boundaries for high-performance bulk thermoelectrics. Science, 348(6230), 109–114. https://doi.org/10.1126/science.aaa4166

[24]. Hong, M., Chen, Z.-G., & Zou, J. (2018). Fundamental and progress of Bi_2Te_3-based thermoelectric materials. Chinese Physics B, 27 (4), 048403. https://doi.org/10.1088/1674-1056/27/4/048403

[25]. A.M. Kasimakhunova, M.O. Atazhonov, A.A. Gizzatullina, G.I. Garifullina, and L.M. Gimaeva "Investigation of the possibility of creating a film photothermal converter", Proc. SPIE 13662, Fourth International Conference on Digital Technologies, Optics, and Materials Science (DTIEE 2025), 1366212 (5 June 2025); https://doi.org/10.1117/12.3072647.

[26]. Zebarjadi, M., Esfarjani, K., Dresselhaus, M. S., Ren, Z. F., & Chen, G. (2012). Perspectives on thermoelectrics: From fundamentals to device applications. Energy & Environmental Science, 5 (1), 5147–5162. https://doi.org/10.1039/C1EE02497C

[27]. Biswas, K., He, J., Blum, I. D., Wu, C.-I., Hogan, T. P., Seidman, D. N., Dravid, V. P., & Kanatzidis, M. G. (2012). High-performance bulk thermoelectrics with all-scale hierarchical architectures. Nature, 489, 414–418. https://doi.org/10.1038/nature11439

[28]. Dresselhaus, M. S., Chen, G., Tang, M. Y., Yang, R., Lee, H., Wang, D., Ren, Z., Fleurial, J.-P., & Gogna, P. (2007). New directions for low-dimensional thermoelectric materials. Advanced Materials, 19(8), 1043–1053. https://doi.org/10.1002/adma.200600527

[29]. DiSalvo, F. J. (1999). Thermoelectric cooling and power generation. Science, 285(5428), 703–706. https://doi.org/10.1126/science.285.5428.703

[30]. Minnich, A. J., Dresselhaus, M. S., Ren, Z. F., & Chen, G. (2009). Bulk nanostructured thermoelectric materials: Current research and future prospects. Energy & Environmental Science, 2 (5), 466–479. https://doi.org/10.1039/B822664B

[31]. Vineis, C. J., Shakouri, A., Majumdar, A., & Kanatzidis, M. G. (2010). Nanostructured thermoelectrics: Big efficiency gains from small features. Advanced Materials, 22 (36), 3970–3980. https://doi.org/10.1002/adma.201000839

[32]. Pei, Y., Shi, X., LaLonde, A., Wang, H., Chen, L., & Snyder, G. J. (2011). Convergence of electronic bands for high performance bulk thermoelectrics. Nature, 473, 66–69. https://doi.org/10.1038/nature09996

[33]. Zhao, L.-D., Lo, S.-H., Zhang, Y., Sun, H., Tan, G., Uher, C., Wolverton, C., Dravid, V. P., & Kanatzidis, M. G. (2014). Ultralow thermal conductivity and high thermoelectric figure of merit in SnSe crystals. Nature, 508, 373–377. https://doi.org/10.1038/nature13184