ISNN 3030-3907

2026/3
VOLUME 2

DEVELOPMENT OF SCIENCE

ILMIY JURNAL



Development of science

Ilmiy jurnal

2026/3 VOLUME 2

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Асадова Раъно Дилмуратовна
Тошкент Давлат техника университети доценти

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

IQLIM OMILLARINING QUYOSH FOTOELEKTRIK MODULLARINING SAMARADORLIGIGA TA'SIRI

Ibragimov Umidjon Hikmatullayevich
QarDTU, Energetika muhandisligi kafedrasi professori, t.f.d (DSc)
Qodirov Jobir Ro'zimamatovich
Bux DU, Geliofizika, qayta tiklanuvchi energiya manbalari va elektronika kafedrasi dotsenti, t.f.f.d.(PhD)
Izomov Shahzod Niyoz o'g'li
Bux DU, Geliofizika, qayta tiklanuvchi energiya manbalari va elektronika kafedrasi doktoranti
Ismoilov Og'abek Farhod o'g'li
Bux DU, Geliofizika, qayta tiklanuvchi energiya manbalari va elektronika kafedrasi magistranti

Annotatsiya. Ushbu tadqiqot ishida quyosh fotoelektrik (PV) modullarining ishlash samaradorligiga atrof-muhit omillarining, xususan chang zarrachalari hamda meteorologik sharoitlarning ta'siri tahlil qilingan. So'nggi yillarda qayta tiklanuvchi energiya manbalariga bo'lgan talabning ortishi natijasida PV texnologiyalari dunyo energetika tizimida muhim o'rin egallamoqda. Biroq PV modullarining samaradorligi tashqi muhit omillariga sezilarli darajada bog'liq bo'lib, ayniqsa qurg'oqchil va yarim qurg'oqchil hududlarda chang bilan ifloslanish muammosi dolzarb hisoblanadi. Tadqiqotlarda chang zarrachalarining PV modullari yuzasida to'planishi quyosh nurlanishining o'tishini kamaytirishi, natijada elektr energiyasi ishlab chiqarish samaradorligini pasaytirishi aniqlangan. Shuningdek, shamol tezligi, havo harorati va nisbiy namlik kabi meteorologik omillar PV modullarining issiqlik rejimi va energiya ishlab chiqarish ko'rsatkichlariga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Tadqiqot natijalari PV tizimlarining samaradorligini oshirish uchun meteorologik omillarni hisobga olish, chang bilan ifloslanishni kamaytirish hamda samarali tozalash strategiyalarini ishlab chiqish zarurligini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: Quyosh fotoelektr modullari, qayta tiklanuvchi energiya, chang zarrachalari, meteorologik omillar, quyosh energiyasi, shamol tezligi, havo harorati, nisbiy namlik, energiya samaradorligi, fotoelektr tizimlari.

Annotation. This study investigates the impact of environmental factors, particularly dust particles and meteorological conditions, on the performance efficiency of photovoltaic (PV) modules. In recent years, the growing demand for renewable energy sources has significantly increased the global deployment of PV technologies. However, the efficiency of PV systems is strongly influenced by environmental conditions, especially in arid and semi-arid regions where dust

ISSN 3030-3907

accumulation on module surfaces becomes a critical issue. Dust deposition on PV panels reduces solar radiation transmission and leads to significant losses in electrical energy production. In addition to dust, meteorological parameters such as wind speed, ambient temperature, and relative humidity play an important role in determining the thermal behavior and operational performance of PV modules. The analysis shows that these environmental factors can significantly affect the output power and long-term reliability of PV systems. The findings highlight the importance of considering environmental conditions, improving cleaning strategies, and optimizing PV system operation to enhance energy production efficiency.

Keywords: Solar photovoltaic modules, renewable energy, dust particles, meteorological factors, solar energy, wind speed, air temperature, relative humidity, energy efficiency, photovoltaic systems.

Аннотация. В данной работе исследуется влияние факторов окружающей среды, в частности пылевых частиц и метеорологических условий, на эффективность работы фотоэлектрических (PV) модулей. В последние годы рост спроса на возобновляемые источники энергии привёл к широкому распространению солнечных фотоэлектрических технологий во всём мире. Однако эффективность PV систем в значительной степени зависит от внешних условий окружающей среды, особенно в засушливых и полузасушливых регионах, где накопление пыли на поверхности модулей становится серьёзной проблемой. Осаждение пыли на поверхности PV модулей снижает пропускание солнечного излучения и приводит к уменьшению выработки электрической энергии. Кроме того, такие метеорологические параметры, как скорость ветра, температура воздуха и относительная влажность, оказывают существенное влияние на тепловой режим и производительность PV модулей. Полученные результаты показывают важность учёта климатических факторов, разработки эффективных методов очистки и оптимизации эксплуатации PV систем.

Ключевые слова: солнечные фотоэлектрические модули, возобновляемая энергия, частицы пыли, метеорологические факторы, солнечная энергия, скорость ветра, температура воздуха, относительная влажность, энергоэффективность, фотоэлектрические системы.

KIRISH.

Jahon miqyosida energiyaga bo‘lgan talab va iste’molning keskin ortib borishi, an’anaviy yoqilg‘ilardan foydalanish natijasida issiqxona gazlarining ko‘payishi hamda an’anaviy yoqilg‘i resurslarining cheklanganligi qayta tiklanuvchi va ekologik xavfsiz energiya manbalarini izlash jarayonini

ISSN 3030-3907

jadallashtirmoqda [1]. Ushbu yo‘nalishda quyosh fotoelektrik modullari (PV) yetakchi o‘rin egallab, barqaror va samarali elektr energiyasi ishlab chiqarishni ta’minlashga qaratilgan asosiy yo‘nalishlardan biriga aylandi [2]. 2010-2019 yillar oralig‘ida PV energiyasini ishlab chiqarish xarajatlarining 82% ga kamayishi ushbu texnologiyaning jahon bo‘yicha jadal tarqalishiga olib keldi [3]. O‘rnatilgan PV quvvati 2000-yildagi 1,3 GVt darajasidan 2019-yil oxiriga kelib 627 GVt ga yetdi [4]. Ushbu o‘sish tendensiyasi 2020-yillarda ham davom etib, 2023-yilda jahon bo‘yicha taxminan 350 GVt yangi PV quvvati ishga tushirildi, bu 2022-yilga nisbatan qariyb 50% o‘sishni anglatadi. Renewables Global Status Report 2025 (Qayta tiklanadigan energiya manbalarining dunyo holati to‘g‘risidagi hisobot 2025) ma’lumotlariga ko‘ra, 2024 yilda PVlarning umumiy o‘rnatilgan quvvati 2,25 TW ga yetdi, bu 2022-yildagi o‘rnatilgan quvvatdan deyarli ikki baravar ko‘p [5]. Bundan tashqari, PV bozorining jadal o‘sishi 2025 yilda ham davom etgan. Global PV sanoatining birinchi yarmida taxminan 380 GW yangi PV quvvati qo‘shilgan, bu esa 2024 yilning mos davriga nisbatan 64% ga yuqoridir [6].

O‘zbekistonda ham quyosh energiyasi bo‘yicha sezilarli o‘sish kuzatilib, global tendensiyalarga mos ravishda quyosh PV texnologiyalari hukmron energiya strategiyasining muhim qismiga aylanmoqda. Mamlakat hukumati yashil energiya strategiyasini kengaytirish orqali qayta tiklanuvchi manbalarni joriy etish bo‘yicha aniq maqsadlar qo‘ygan. Xususan, 2030-yilgacha qayta tiklanuvchi energiya ulushini mamlakat umumiy energiya balansida 54% ga yetkazish rejalashtirilgan bo‘lib, buning uchun 2030 gacha jami 21 GW qayta tiklanuvchi quvvat qurilishi maqsad qilingan [7]. 2025-yilda O‘zbekiston bo‘ylab faoliyat ko‘rsatayotgan 12 ta quyosh fotoelektr stansiyasi va 5 ta shamol elektr stansiyasining umumiy quvvati taxminan 4,6-4,7 GW ga yetdi. Ushbu texnologiyalar orqali 2025-yilda faqat quyosh va shamol energiyasi hisobidan 9 milliard kVt·soatga yaqin “yashil” elektr energiyasi ishlab chiqarilgan va ushbu qiymat umumiy energiya ishlab chiqarishning 23% ni tashkil etgan [8].

Dunyo va mamlakatimiz miqyosida PV texnologiyalari XXI asrning eng istiqbolli va ishonchli energiya manbalaridan biri sifatida e’tirof etilayotgan bir sharoitda, ushbu tizimlarning uzoq muddatli ishlash samaradorligiga salbiy ta’sir ko‘rsatadigan omillarni aniqlash va bartaraf etishga bo‘lgan ilmiy e’tibor tobora kuchayib bormoqda. Xususan, ekologik sharoitlar PV tizimlarining samaradorligi va ishonchliligiga sezilarli muammolar tug‘dirmoqda [9]. Bunday omillar qatoriga chang [10], shamol tezligi, harorat tebranishlari va havoning namligi kabi meteorologik sharoitlarni kiritish mumkin [11]. Ma’lumki, chang quyosh nurlarining PV elementlarga yetib borishini cheklab, elektr energiyasi ishlab chiqarish hajmini kamaytiradi. Samaradorlikning pasayish darajasi chang

ISSN 3030-3907

zarrachalarning turi, o‘lchami va zichligiga, shuningdek shamol tezligi, havo harorati va namligi kabi meteorologik omillarga bog‘liq bo‘lib, bu omillar chang zarrachalari to‘planishini kuchaytirishi yoki aksincha kamaytirishi mumkin. Chang atmosfera cho‘kindilarining eng keng tarqalgan turlaridan biri bo‘lib, ayniqsa qurg‘oqchil va yarim qurg‘oqchil hududlarda jiddiy muammo tug‘diradi. Bunday hududlarda tez-tez kuzatiladigan chang bo‘ronlari PV tizimlarida energiya ishlab chiqarishdagi yo‘qotishlarni 50% gacha yetkazishi mumkin [10]. Chang zarrachalari shamol tezligi va yo‘nalishining o‘zgarishi, havo namligi, chang bo‘ronlari, modul yuzasining sirt xususiyatlari, o‘rnatilish burchagi, tuproq turi, gravitatsiya hamda atrofdagi o‘simlik qoplami kabi omillar ta’sirida PV modullar yuzasida to‘planadi. Chang PV sirtining optik, issiqlik va elektr xususiyatlariga bevosita ta’sir ko‘rsatadi [12]. Masalan, ayrim tadqiqotlar quyosh nurlanishining 450-500 nm spektral oralig‘ida kunlik samaradorlik yo‘qotishlari 0,6% gacha yetishini ko‘rsatgan [13]. PV yuzalarida changning to‘planishi modul ustida soyalanish hosil qilib, elektr energiyasi ishlab chiqarishni sezilarli darajada kamaytiradi [14]. Masalan, Kazem va Chaichanlarning [15] tadqiqot ishida Ummonning turli hududlarida joylashgan oltita PV massivida tok, kuchlanish va quvvat ko‘rsatkichlari o‘lchangan. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, PV yuzalarida uchraydigan eng xavfli ifloslantiruvchilar elektr stansiyalari mo‘rilaridan chiqadigan yonish mahsulotlari, sanoat korxonalaridagi eritish jarayonlari va avtomobil transportidan kelib chiqadigan zarrachalardir. Bunday ifloslanish energiya ishlab chiqarishni 55% gacha kamaytirishi mumkinligi aniqlangan. Yaqinda o‘tkazilgan boshqa bir tadqiqotda kul, qum va sement changi kabi turli xil chang turlarining PV modullari samaradorligiga ta’siri baholangan. Natijalarga ko‘ra, quruq sharoitda kul eng kuchli salbiy ta’sir ko‘rsatib, samaradorlikni 24,5% gacha pasaytirgan [16]. Gholami va boshqalar [17] Eronning Isfahon shahrida 70 kun davom etgan tajriba asosida changning shisha yuzalarining optik o‘tkazuvchanligiga ta’sirini tadqiq qilgan. Tajriba davomida changning sirt zichligi shimoli-g‘arb tomonga 90° burchak ostida yo‘naltirilgan yuzalarda 4,0599 g/m^2 ni, shimol tomonga 15° qiyalikda joylashtirilgan yuzalarda esa 10,3129 g/m^2 ni tashkil etgan. Natijada shisha yuzalarining yorug‘lik o‘tkazuvchanligi mos ravishda 15% va 24,83% ga kamaygani aniqlangan.

Cho‘l hududlarida changni cho‘kish tezligi juda yuqori bo‘lib, atmosferadagi chang zarrachalari natijasida quyosh energiyasidan foydalanish darajasi taxminan 40% gacha kamayadi [18]. Saudiya Arabistonida olib borilgan tadqiqotlar chang bilan ifloslanish PV tizimlarining samaradorligiga sezilarli salbiy ta’sir ko‘rsatishini, tozalash amalga oshirilmagan holatda olti oy davomida quvvat yo‘qotishlari 50% gacha yetishi mumkinligi keltirilgan [19]. Xuddi shuningdek,

ISSN 3030-3907

Ummon sharoitida o‘tkazilgan tajribalar energiya ishlab chiqarish yo‘qotishlari oyiga 5,6% dan 10,8% gacha oraliqda ekanligi aniqlagan bo‘lib, bunda tozalash davriyligi hal qiluvchi omil ekani qayd etilgan. Bundan tashqari, changning fizik xususiyatlari-zarracha o‘lchami, kimyoviy tarkibi va geografik joylashuvi-samaradorlik pasayishining tezligi va darajasiga bevosita ta’sir ko‘rsatadi. Ayniqsa, mayda zarrachalar quyosh nurlanishini kuchliroq sochilishiga olib kelib, samaradorlikni keskin pasaytiradi [20]. Chen va boshqalar [21] tomonidan o‘tkazilgan tadqiqotda chang zichligi bilan PV modullari samaradorligi o‘rtasida chiziqli bog‘liqlik mavjudligi aniqlanib, sirt zichligi 10 g/m^2 bo‘lgan chang qatlamining PVning maksimal quvvat chiqishini taxminan 34% ga kamaytirishi ko‘rsatilgan. Ushbu natijalar, ayniqsa ochiq va changga moyil hududlarda, changning PV tizimlari ishlashiga kuchli ta’sir ko‘rsatishini yaqqol namoyon etadi.

Khodakaram-Tafti va Yaghoubilar [22] tomonidan PVlarning qiyalik burchagi va ochiq muhitda turish vaqti chang to‘planishiga qanday ta’sir ko‘rsatishi tahlil qilingan. Natijalar kichik qiyalik burchaklari changning ko‘proq yig‘ilishiga sabab bo‘lishini ko‘rsatgan: xususan, dastlabki ikki hafta davomida 0° va 45° burchak ostida o‘rnatilgan panellar o‘rtasida chang miqdori bo‘yicha sezilarli farq kuzatilgan. Biroq vaqt o‘tishi bilan bu farq kamayib, taxminan 30 kundan so‘ng barqarorlashgan. Ushbu natijalar qiyalik burchagini to‘g‘ri tanlash chang bilan ifloslanish darajasini boshqarishda muhim ahamiyatga ega ekanini tasdiqlaydi. Ummon sharoitida bir necha oy davomida olib borilgan tadqiqot PVlarda chang to‘planishining ta’sirini o‘rgangan. Unga ko‘ra, diametri 0,3-1 mkm oralig‘idagi chang zarrachalari nurlanishni eng ko‘p kamaytirgan va sirt zichligi 50 g/m^2 bo‘lgan chang qatlamida quvvat chiqishi 42% ga pasaygan [19]. Shu bois, ayniqsa cho‘l hududlarida samaradorlik yo‘qotishlarini cheklash uchun PVlarni har 1-2 oyda bir marta tozalash tavsiya etiladi, maksimal interval esa 3 oydan oshmasligi lozim. Hachicha va boshqalarning [23] tadqiqotida 5 oydan ortiq davrda chang zichligi 5,44 g/m^2 ga oshganda chang tufayli yuzaga keladigan yo‘qotishlar 12,7% ga ortgani aniqlangan. Tadqiqotlar Birlashgan Arab Amirliklarining Sharja shahrida olib borilgan bo‘lib, unda o‘lchami 1,61-38,40 mkm oralig‘ida bo‘lgan turli shakldagi chang zarrachalari o‘rganilgan. Tadqiqot natijalari chang zichligi bilan normallashtirilgan PV quvvati o‘rtasida chiziqli bog‘liqlik mavjudligini ko‘rsatgan: chang sirt zichligi har 1 g/m^2 ga ortganda quvvat taxminan 1,7% ga kamaygan. Chang zarrachalarining turi va xususiyatlariga bog‘liq holda ularning qisqa tutashuv toki, chiqish quvvati, quyosh nurlanishi va to‘ldirish koeffitsiyenti ga ta’siri Gupta va boshqalarning [24] ishida tahlil qilingan. Ushbu tadqiqotda mualliflar o‘lchami 5 mkm bo‘lgan uglerod zarrachalari 28 g/m^2 sirt zichligida ham qisqa tutashuv tokini sezilarli darajada kamaytirishini ko‘rsatgan, holbuki

ISSN 3030-3907

undan ancha yuqori zichliklarda bo‘lgan 10 mkm sement changi (73 g/m^2), 50 mkm ohaktosh changi (168 g/m^2), 60 mkm ohaktosh changi (240 g/m^2) yoki 80 mkm ohaktosh changi (275 g/m^2) bunday kuchli ta’sir ko‘rsatmagan. Shuningdek, diametri 1 mkm dan kichik bo‘lgan zarrachalar tezroq to‘planadi va sirtni ko‘proq soyalaydi, natijada samaradorlik yanada pasayadi. Bangladeshning Dakka shahrida o‘tkazilgan tadqiqotda to‘rt oy davomida chang to‘planishi qisqa tutashuv tokini 22,31% gacha kamaytirgani va quruq mavsumda maksimal energiya yo‘qotishlari 35% ga yetgani aniqlangan [25].

PVlarning ishlash sharoitiga ta’sir etuvchi eng muhim omillardan biri meteorologik sharoitlar bo‘lib, ular PVlarning ishlash samaradorligini belgilovchi muhim omillardan biridir. Shamol tezligi va yo‘nalishi, tashqi havo harorati va nisbiy namlik PVlarning ham qisqa muddatli, ham uzoq muddatli samaradorligiga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi. Ushbu omillar PVlarga yetib keladigan quyosh nurlanishi miqdorini o‘zgartirishi, shuningdek issiqlik, namlik va mexanik ta’sirlar orqali tizim holatiga ta’sir etishi mumkin. Shu sababli, turli iqlim sharoitlarida PVlarning samaradorligi va xizmat muddatini optimallashtirish uchun meteorologik omillarning ta’sirini chuqur tushunish va ularni kamaytirish bo‘yicha choralar ko‘rish muhim ahamiyatga ega. Shamol tezligi va yo‘nalishi PVlarning ishlashiga harorat rejimi, chang cho‘kishi va nisbiy namlik orqali sezilarli ta’sir ko‘rsatadi. Tehron sharoitida o‘tkazilgan tadqiqotda [26] shamol tezligi 4,5-6,5 m/s oralig‘ida bo‘lganda changning to‘planishi kamayib, PV sirtining tozaligi yaxshilangani va natijada chiqish quvvati 12% gacha oshgani aniqlangan. Biroq shamol tezligi haddan tashqari yuqori bo‘lganda, mayda zarrachalarning qayta cho‘kishi kuchayib, shamol va ifloslanish o‘rtasida murakkab o‘zaro bog‘liqlik mavjudligi aniqlangan. Haroratga ta’siri nuqtayi nazaridan esa, boshqa bir tadqiqot cho‘l hududlarida shamol tezligi 6-13 m/s oralig‘ida bo‘lganda PV harorati 8°C dan ortiq pasayishini ko‘rsatgan. Ushbu sovitish effekti modul samaradorligini sezilarli darajada yaxshilab, shamolning PV ishlashidagi muhim omil ekanini tasdiqlaydi [27]. Shaik va boshqalar [9] ham shamol tezligi 12 m/s bo‘lganda Sloveniyada PV ish haroratining taxminan yarmiga pasayishi, Saudiya Arabistonida esa harorat 10°C ga kamayishini qayd etishgan. Zhe va boshqalar [28] tomonidan o‘tkazilgan tajribalar shuni ko‘rsatdiki, shamol ta’sirisiz holatda PVning o‘rtacha ish harorati 53,7°C ni tashkil etib, u o‘rtacha 42,42 W quvvat ishlab chiqargan. Shamol ta’siriga uchragan holatda esa PVning optimal ish harorati 49,5°C gacha pasayib, o‘rtacha chiqish quvvati 49,47 W ga yetgan. Ya’ni shamol ta’siri ish haroratini taxminan 4,2°C ga kamaytirib, quvvat ishlab chiqarishni 14,25% ga oshirgan. Elminshawy va boshqalar [29] tomonidan o‘tkazilgan tadqiqotlarda havo oqimi tezligining ortishi issiqlik ajralishini kuchaytirib, PV haroratini 8°C gacha pasaytirishi va

ISSN 3030-3907

natijada samaradorlikni sezilarli darajada oshirishi aniqlangan. Ali va boshqalar [30] tomonidan olib borilgan modellashtirish ishlarida shamol tezligi 5-15 m/s oralig‘ida bo‘lganda Sc-Si modullarining o‘rtacha harorati 42% gacha, Pc-Si modullarida esa 43% gacha pasayishini aniqlagan va bu PV tizimlarining ishlash samaradorligini oshirgan. Nguyen va Dolar [31] o‘tkazilgan tadqiqotda shamol tezligi 0,5 dan 6,5 m/s gacha oshirilganda PV hujayralar sirt harorati 84,8°C dan 49,81°C gacha pasaygani aniqlangan, bu esa yuqori shamol tezliklarining kuchli sovitish effektini yaqqol namoyon etgan. So‘nggi tadqiqotlar PV yuzasidan changni olib tashlash uchun zarur bo‘lgan shamol tezligi zarracha o‘lchami va sirt xususiyatlariga kuchli darajada bog‘liq ekanini ko‘rsatadi. Diametri 10 mkm dan kichik bo‘lgan mayda zarrachalarni samarali olib tashlash uchun shamol tezligi 25 m/s dan yuqori bo‘lishi talab etiladi, yirik zarrachalar esa ancha past tezliklarda ham sirt yuzasidan ajralib ketadi [32].

Ma’lumki, PV hujayralarning ish harorati ularning samaradorligi va energiya ishlab chiqarish hajmini belgilovchi eng muhim omillardan biridir. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, PV haroratining har 1°C ga ortishi samaradorlikni taxminan 0,5% ga kamayishiga olib keladi, bu esa issiqlikning ishlashga salbiy ta’sirini yaqqol namoyon etadi. Shu sababli, suv bilan sovitish kabi sovitish mexanizmlaridan foydalanish, ayniqsa yuqori tashqi haroratli hududlarda, elektr ishlab chiqarishni 52,6% gacha oshirishi mumkinligi aniqlangan [33]. Bundan tashqari, shamol tezligi ham PV modullari haroratini boshqarishda muhim rol o‘ynaydi. Tadqiqotlar shamol tezligi 6-15 m/s oralig‘ida bo‘lganda modul haroratining sezilarli pasayishini va natijada issiq iqlim sharoitida samaradorlik 10% gacha oshishini ko‘rsatgan [34]. Haroratning tebranishlari faqat energiyani aylantirish samaradorligiga emas, balki PVlarning ichki mexanik holatiga ham ta’sir qiladi. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, PV hujayralarning ish harorati ularning samaradorligiga bevosita ta’sir ko‘rsatadi: masalan, harorat 30°C dan 64,7°C gacha oshganda modul samaradorligi 15,27% dan 9,80% gacha pasayadi, bu esa haroratni boshqarish PV ishlashini saqlab qolishda hal qiluvchi omil ekanini ko‘rsatadi [35]. Polikristalli kremniy (Pc-Si) asosidagi PVlarning ishlashiga harorat tebranishlari sezilarli darajada ta’sir ko‘rsatadi. Tadqiqotlar PV harorati 25°C dan 65°C gacha oshganda issiqlik effektlari natijasida samaradorlik taxminan 10% ga kamayishini ko‘rsatgan. Bunga qarshi ilg‘or sovitish texnologiyalari, jumladan faza almashuvchi materiallar va issiqlik tarqatuvchi radiatorlardan foydalanish, modul haroratini 11,9°C gacha pasaytirib, samaradorlikni 3,5% ga oshirish imkonini bergan [36]. Xitoyda olib borilgan kuzatuvlar ham shunga o‘xshash natijalarni ko‘rsatgan: yoz mavsumida harorat 14°C dan 27°C gacha oshganda va nisbiy namlik ko‘tarilganda Pc-Si panellarning ishlashi 5% ga pasaygan [37]. Bundan

ISSN 3030-3907

tashqari, ushbu texnologiyada harorat har 1℃ ga oshganda ochiq zanjir kuchlanishi taxminan 2 mV ga kamayishi, qisqa tutashuv toki esa atigi 0,05% ga oshishi aniqlangan [38]. Haroratning o‘zgarishi PVlarida maksimal quvvat nuqtasini kuzatish (MPPT) jarayoniga ham kuchli ta’sir ko‘rsatadi, chunki harorat oshishi ochiq zanjir kuchlanishi va maksimal quvvat nuqtasidagi kuchlanishning manfiy harorat koeffitsiyenti sababli maksimal quvvatning pasayishiga olib keladi. Shu sababli, harorat sharoitlari o‘zgaruvchan bo‘lgan muhitlarda kuzatish aniqligini oshirish uchun takomillashtirilgan MPPT algoritmlari ishlab chiqilgan bo‘lib, ular quvvat yo‘qotishlarini kamaytiradi va moslashuv tezligini oshiradi [39]. Tadqiqotlar harorat har 1℃ ga oshganda quvvat chiqishi 0,5-0,65% gacha kamayishini ko‘rsatadi. Innovatsion yondashuvlardan biri haroratga asoslangan MPPT algoritmi bo‘lib, u haroratga bog‘liq optimal tok-kuchlanish xarakteristikasidan foydalanib maksimal quvvat nuqtasini an’anaviy algoritmlarga nisbatan barqarorroq va aniqroq kuzatishni ta’minlaydi [40]. Maghami va boshqalar [41] tomonidan turli harorat sharoitlarida PVning maksimal quvvat nuqtasining o‘zgarishi tajriba yo‘li bilan o‘rganilgan. Natijalarga ko‘ra, harorat oshishi bilan PV quvvati dastlab ortib borgan va bu maksimal quvvat nuqtasining siljishi bilan namoyon bo‘lgan hamda holat faqat modulning maksimal ish haroratigacha davom etgan. Haroratning PVlarida elektr energiyasi ishlab chiqarishga ta’siri tok va kuchlanishdagi o‘zgarishlar bilan bevosita bog‘liq. Harorat oshishi bilan PV hujayralarining energetik taqiqlangan zonasi torayadi, natijada ochiq zanjir kuchlanishi kamayadi va teskari to‘yinganlik toki ortadi, bu esa hujayraning umumiy samaradorligini pasaytiradi. Ushbu hodisa Sc-Si va Pc-Si texnologiyalarini o‘z ichiga olgan turli PV tizimlarida kuzatilgan bo‘lib, yuqori harorat sharoitida samaradorlik yo‘qotishlari 10-15% oralig‘ida bo‘lgani aniqlangan [42]. Harorat bilan chang cho‘kishi o‘rtasidagi bog‘liqlik PV tizimlari kontekstida keng o‘rganilgan. Yaqinda o‘tkazilgan tadqiqotlar shuni ko‘rsatdiki, PV yuzasi bilan atrof-muhit o‘rtasidagi haroratlar farqi tufayli yuzaga keladigan termoforez hodisasi submikron o‘lchamdagi chang zarrachalarining sirtga yopishishini kamaytiradi. PV harorati tashqi havo haroratidan bir necha daraja yuqori bo‘lganda termoforetik kuch hosil bo‘lib, panel yuzasiga yaqin hududda changsiz qatlam paydo bo‘ladi. Bu hodisa ayniqsa juda mayda zarrachalar uchun samarali bo‘lib, panelning tozaligini va ishlashini yaxshilaydi [43]. Shu bilan birga, atrof-muhit haroratining yuqori bo‘lishi PVning energiya aylantirish samaradorligini pasaytirsa-da, panel yuzasi bilan tashqi havo o‘rtasidagi sezilarli harorat farqi PV oynasida chang yig‘ilishini kamaytirishga yordam berishi ko‘plab tadqiqotlarda qayd etilgan [44].

ISSN 3030-3907

Namlikning PV chiqish quvvatiga bevosita ta’sirini yagona standart usulda aniqlash murakkab masala hisoblanadi. Masalan, tomchi shaklida kondensatsiya (shudring hosil bo‘lishi) ayrim hollarda PV hujayralarining ishlashini yaxshilashi mumkin, biroq shudring sirt bo‘ylab uzluksiz plyonka holida cho‘ksa, aksincha, samaradorlikni pasaytiradi [45]. Atmosferadagi namlik PV hujayralarining ishlashiga ma’lum darajada ta’sir ko‘rsatadi, ammo bu ta’sir odatda nisbatan kichik bo‘ladi. Biroq issiq va nam iqlim sharoitlarida namlik PV degradatsiyasini sezilarli tezlashtiradi. Tadqiqotlar yuqori namlik va haroratga uzoq muddatli ta’sir elektr ulanishlarida nosozliklar va yoriqlar paydo bo‘lishiga olib kelib, modul samaradorligini vaqt o‘tishi bilan 15% gacha kamaytirishini ko‘rsatgan [46]. Namlik va yog‘ingarchilikning PV energiya ishlab chiqarishga ta’siri keng o‘rganilgan. Masalan, Benin sharoitida o‘tkazilgan tadqiqot nisbiy namlikning (o‘rtacha 80,14%) PV samaradorligiga salbiy ta’sir ko‘rsatishini va namlik bilan energiya ishlab chiqarish o‘rtasida -0,42 korrelyatsiya koeffitsiyenti mavjudligini ko‘rsatgan [47]. Xitoyning shimoli-g‘arbiy qurg‘oqchil hududlarida olib borilgan boshqa tadqiqotlar esa yog‘ingarchilik va namlikning PV ishlashiga sezilarli ta’sir ko‘rsatishini, yuqori yog‘ingarchilik va namlik kuzatiladigan hududlarda energiya ishlab chiqarishning sezilarli o‘zgaruvchanligini ko‘rsatgan [48]. Tripathi va boshqalar [49] tadqiqotida nisbiy namlik 65% dan 98% gacha oshganda PV panel chiqish quvvati 34,22% ga kamaygani aniqlangan bo‘lib, bu asosan quyosh nurlanishining kamayishi va chang zarrachalarining sirtga yopishishi kuchayishi bilan izohlangan. Nisbiy namlikning PV tizimlarida hosil bo‘ladigan tok va kuchlanishga ta’siri sezilarli bo‘lib, tizimning umumiy ishlashiga bevosita ta’sir ko‘rsatadi. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, nisbiy namlik oshishi bilan PV tizimlari ishlab chiqaradigan tok va kuchlanish miqdori kamayishga moyil bo‘ladi. Masalan, tajribaviy ma’lumotlarga ko‘ra, nisbiy namlik 65-75% oralig‘ida bo‘lganda, ayniqsa Pc-Si texnologiyasiga asoslangan PV tizimlarida chiqish toki va samaradorlik sezilarli pasayadi [50]. Namlikning PV hujayralarining asosiy tok-kuchlanish parametrlariga, xususan qisqa tutashuv toki va ochiq zanjir kuchlanishiga ta’siri ham sezilarli bo‘lib, tropik iqlim sharoitlarida yuqori harorat bilan birga kuzatiladigan nam muhit vaqt o‘tishi bilan qisqa tutashuv tokini 7,14% gacha, ochiq zanjir kuchlanishini esa 0,66% gacha kamaytirishi aniqlangan [51].

Xususan mamlakatimizda A.B. Safarov va O.I. Raxmatovlar [52] tomonidan olib borilgan tadqiqotda O‘zbekiston iqlim sharoitida PVlarining samaradorligiga ta’sir etuvchi asosiy omillar-tashqi harorat, quyosh radiatsiyasi va changlanish darajasini tizimli ravishda tahlil qilingan. Tadqiqot natijalari yuqori havo harorati va modul yuzasida chang qatlamining hosil bo‘lishi fotoelektrik konversiya samaradorligini sezilarli darajada pasaytirishini ko‘rsatgan. Shuningdek, ishda PV

ISSN 3030-3907

tizimlarini hududiy iqlim sharoitlariga mos ekspluatatsiya qilish zarurligi ta'kidlanadi. Biroq tadqiqotda uzoq muddatli monitoring natijalari keltirilmagan bo'lib, bu tizimlarning vaqt o'tishi bilan degradatsiyasini baholash imkonini cheklaydi. Bundan tashqari, iqtisodiy samaradorlik, texnik xizmat ko'rsatish xarajatlari va sovutish tizimlarining qoplash muddati chuqur tahlil qilinmagan. I.I. Raxmatov va boshqalar [53] tomonidan O'zbekiston iqlim sharoitida 300 kW quvvatga ega tarmoqqa ulangan PVning ishlash samaradorligi real ekspluatatsiya ma'lumotlari asosida tahlil qilingan. Natijalar tashqi haroratning oshishi modul samaradorligining pasayishiga olib kelishini, yuqori quyosh radiatsiyasi esa bu salbiy ta'sirni qisman kompensatsiya qilishini ko'rsatgan. Shuningdek, changlanish darajasi va atmosfera shaffofligining pasayishi yillik elektr ishlab chiqarish hajmiga sezilarli ta'sir ko'rsatishi aniqlangan. Mualliflar tizim O'zbekiston sharoitida texnik jihatdan barqaror va energetik jihatdan maqbul ekanini tasdiqlagan. Shu bilan birga, uzoq muddatli degradatsiya va ekspluatatsion xarajatlar masalasi yetarli darajada yoritilmagan. Toshov va boshqalar [54] tomonidan olib borilgan tadqiqotda O'zbekiston iqlim sharoitida chang yig'ilishi va yuqori haroratning PVlarining ishlashiga ta'siri sonli modellashtirish asosida baholangan. Natijalar shuni ko'rsatadiki, chang zichligi 10 g/m^2 ga yetganda optik o'tkazuvchanlik 30% gacha kamayadi va maksimal quvvat 130 W dan 50 W gacha qiymatlarga pasayadi. Tadqiqot asosan simulyatsiyaga asoslangan bo'lib, uzoq muddatli real dala tajribalari bilan yetarli darajada tasdiqlanmagan. Mamasaliev va boshqalar [55] tomonidan olib borilgan tadqiqotda O'zbekistonning quruq va yarim quruq iqlim sharoitida changning PV samaradorligiga ta'siri modellashtirish va eksperimental ma'lumotlar asosida baholangan. Tadqiqot natijalariga ko'ra, PV tozalanmagan holatda 3 oy davomida quvvat yo'qotishi 25-40% gacha yetishi mumkinligi aniqlangan. Tadqiqot asosan Toshkent hududi sharoitlari bilan cheklangan bo'lib, O'zbekistonning boshqa mintaqalarida sinovlar o'tkazilmagan. B. Khikmatov va boshqalar [56] Buxoro davlat universiteti hududida o'rnatilgan 1210 kWp quvvatli tarmoqqa ulangan PV tizimi bo'yicha olib borilgan tadqiqotda tizimning real ekspluatatsion sharoitdagi ishlash ko'rsatkichlari IEC 61724 standarti asosida baholangan. Natijalar shuni ko'rsatadiki, yillik o'rtacha Performance Ratio 65,15%, Capacity Utilization Factor esa 11,41% ni tashkil etgan bo'lib, bu O'zbekistonning issiq va quruq iqlim sharoitida yuqori harorat va changlanishning tizim samaradorligiga sezilarli ta'sir ko'rsatishini tasdiqlaydi. Shu bilan birga, modul haroratining 45-47°C gacha ko'tarilishi yoz oylarida termik yo'qotishlarni kuchaytirib, samaradorlikning pasayishiga olib kelgani infraqizil termografiya yordamida. Tadqiqot natijalari faqat bitta ob'yekt misolida olingani sababli hududlararo umumlashtirish imkoniyati cheklangan, changlanish va

ISSN 3030-3907

sovitish omillari miqdoriy tajriba orqali alohida baholanmagan hamda iqtisodiy tahlilda sezgirlik hisobga olinmagan. Yuqoridagi tahlillar PV samaradorligining, ayniqsa harorat, changlanish, shamol tezligi va namlik kabi iqlim omillariga yuqori darajada sezgir ekanini ko‘rsatadi. Qurg‘oqchil va issiq hududlarda chang yig‘ilishi va yuqori ish harorati energiya ishlab chiqarishni 30-50% gacha kamaytirishi mumkin. Shu bilan birga, shamolning sovituvchi ta’siri va to‘g‘ri ekspluatatsiya rejimlari ushbu yo‘qotishlarni qisman kompensatsiya qilishi aniqlangan. O‘zbekiston sharoitida olib borilgan tadqiqotlar ham hududiy moslashgan texnik yechimlarga ehtiyoj mavjudligini tasdiqlaydi. Shu bois, PV samaradorligini barqarorlashtirish uchun suv yordamida tozalash va sovitish texnologiyalarini tahlil qilish muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Ключевые слова: солнечные фотоэлектрические модули, возобновляемая энергия, частицы пыли, метеорологические факторы, солнечная энергия, скорость ветра, температура воздуха, относительная влажность, энергоэффективность, фотоэлектрические системы.H. Almukhtar, T.T. Lie, W.a.M. Al-Shohani, T. Anderson, Z. Al-Tameemi. Comprehensive review of dust properties and their influence on photovoltaic systems: electrical, optical, thermal models and experimentation techniques, Energies. (Basel) 16 (8), 2023:3401.
2. H.A. Kazem, M.T. Chaichan, A.H. Al-Waeli, K. Sopian. A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems, J. Clean. Prod. 276, 2020:123187.
3. K.A. Moharram, M.S. Abd-Elhady, H.A. Kandil, H. El-Sherif. Influence of cleaning using water and surfactants on the performance of photovoltaic panels. Energy Convers. Manag. 68, 2013. – p. 266-272.
4. A. Elnozahy, A.K.A. Rahman, A.H.H. Ali, M. Abdel-Salam, S. Ookawara. Performance of a PV module integrated with standalone building in hot arid areas as enhanced by surface cooling and cleaning. Energy Build. 88, 2015. – p. 100-109.
5. Y. Jiang, L. Lu, H. Lu. A novel model to estimate the cleaning frequency for dirty solar photovoltaic (PV) modules in desert environment. Sol. Energy 140, 2016. – p. 236-240.
6. C.D. Love, S.B. Shah, J.L. Grimes, D.W. Willits. Transpired solar collector duct for tempering air in North Carolina turkey brooder barn and swine nursery, Solar Energy 102, 2013. – p. 308-317.
7. M.R. Poole, S.B. Shah, J.L. Grimes, M.D. Boyette, L.F. Stikeleather. Evaluation of a novel, low-cost plastic solar air heater for turkey brooding, Energy Sustain. Dev./Energy Sustain. Dev. 45, 2018. – p. 1-10.

ISSN 3030-3907

8. L. Yu, S.B. Shah, M.T. Knauer, M.D. Boyette, L.F. Stikeleather. Comprehensive evaluation of a landscape fabric based solar air heater in a pig nursery, Energies. (Basel) 14 (21), 2021:7258, https://doi.org/10.3390/en14217258.
9. J. Zorrilla-Casanova, M. Piliougine, J. Carretero, P. Bernaola, P. Carpena, L. MoraLopez, M. Sidrach-de-Cardona. Analysis of dust losses in photovoltaic modules, 2011. – p. 2985-2992.
10. J. Tanesab, D. Parlevliet, J. Whale, T. Urmee. Dust effect and its economic analysis on PV modules deployed in a temperate climate zone. Energy Procedia 100, 2016. – p. 65-68.
11. B.R. Paudyal, S.R. Shakya. Dust accumulation effects on efficiency of solar PV modules for off grid purpose: a case study of Kathmandu. Sol. Energy 135, 2016. – p. 103-110.
12. S.K. Pathak, P.O. Sharma, V. Goel, S. Bhattacharyya, H. Aybar, J.P. Meyer. A detailed review on the performance of photovoltaic/thermal system using various cooling methods, Sustain. Energy Technol. Assessments 51 (2022), https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101844.
13. S. Nizetic, D. Coko, A. Yadav, F. Grubisic-Cabo. Water spray cooling technique applied on a PV panel: the performance response, Energy Convers. Manag. 108, 2016. – p. 287-296.
14. Z. Rostami, M. Rahimi, N. Azimi. Using high-frequency ultrasound waves and nanofluid for increasing the efficiency and cooling performance of a PV module, Energy Convers. Manag. 160, 2018. – p. 141-149.
15. C. Mah, B. Lim, C. Wong, M. Tan, K. Chong, A. Lai. Investigating the performance improvement of a photovoltaic system in a tropical climate using water cooling method, Energy Proc. 159, 2019. – p. 78-83.
16. P. Bevilacqua, R. Bruno, N. Arcuri. Comparing the performances of different cooling strategies to increase photovoltaic modules electric in different meteorological conditions, Energy (2020), https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116950.
17. A. Hadipour, M.R. Zargarabadi, S. Rashidi. An efficient pulsed-spray water cooling system for photovoltaic panels: experimental study and cost analysis, Renew. Energy 164, 2021. – p. 867-875.
18. T. Chea, T. Deethayat, T. Kiatsiriroat, A. Asanakham. Experiment and model of a photovoltaic module with evaporative cooling, Results in Engineering 19, 2023:101290, https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101290.

ISSN 3030-3907

19. Z.N. Soliyeva. O‘zbekiston iqlim sharoitlarida quyosh fotoelektrik modullariga sovutish tizimini joriy etish samaradorligini baholash. Yashil iqtisodiyot va taraqqiyot, Maxsus son, 2024. 281-287-betlar.
20. Ш.Н. Абилфайзиев, С.Ф. Тошпўлатов, Р.Н. Абилфайзиев. Фотоэлектрик батареяларни ҳаво ва сув ёрдамида совутишда энергия самарадорлиги таҳлиллари. Муқобил энергетика. 4 (07), 2022. 41-46-бетлар.
21. M.N. Tursunov, H. Sabirov, R.B. Alikulov, T.Z. Akhtamov, U.R. Kholov, M.M. Eshmatov. Development and testing of various heat collector methods for cooling photovoltaic-thermal batteries. International Journal Of Transport And Technological Machines, 3, 2025.
22. K. Iwabuchi et al. Enhancing grid stability in PV systems: A novel ramp rate control method utilizing PV cooling technology, Appl. Energ. 378, 2025:124737.
23. H. Dirawi et al. Comprehensive performance analysis of a novel closed-loop hydronic cooling of photovoltaic panel with a controlled intermittent flow strategy, Renew. Energ. 239, 2025:122185.
24. Z. Said, F.F. Ahmad. Maximizing solar photovoltaic efficiency with Mist cooled sandwich bifacial panels under extreme hot climate conditions, Energy. Convers. Manag. 335, 2025:119865.
25. M.S. Tahir et al. Thermal management of photovoltaic systems: a comprehensive review of cooling strategies, Sol. Energ. 299, 2025:113811.
26. M. Abdolzadeh, M. Ameri. Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells, Renew. Energ. 34 (1), 2009. – p. 91-96.
27. Y. Zhao et al. Performance analysis of a solar photovoltaic power generation system with spray cooling, Case. Stud. Therm. Eng. 29, 2022:101723.
28. Y. Khan et al. Thermodynamic analysis and experimental investigation of the water spray cooling of photovoltaic solar panels, J. Therm. Anal. Calorim. 148 (12), 2023. – p. 5591-5602.
29. Q. Zhang et al. Modeling of a PV system by a back-mounted spray cooling section for performance improvement, Appl. Energy 332, 2023:120532.
30. H. Chen et al. Performance analysis of a high concentrating photovoltaic/thermal system with a water spray cooling device, in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2019.
31. J. Breitenbach, I.V. Roisman, C. Tropea. From drop impact physics to spray cooling models: a critical review, Exp. Fluids 59 (3), 2018:55.
32. A. Cebo-Rudnicka, Z. Malinowski, A. Buczek. The influence of selected parameters of spray cooling and thermal conductivity on heat transfer coefficient, Int. J. Therm. Sci. 110, 2016. – p. 52-64.

ISSN 3030-3907

33. R.H. Chen, L.C. Chow, J.E. Navedo. Optimal spray characteristics in water spray cooling, Int. J. Heat. Mass. Transf. 47 (23), 2004. – p. 5095-5099.
34. G.E. Soriano, T. Zhang, J.L. Alvarado. Study of the effects of single and multiple periodic droplet impingements on liquid film heat transfer, Int. J. Heat. Mass. Transf. 77, 2014. – p. 449-463.
35. H. Chen et al. Experimental study on optimal spray parameters of piezoelectric atomizer based spray cooling, Int. J. Heat. Mass. Transf. 103, 2016. – p. 57-65.
36. W. Luboń, G. Pełka, M. Janowski, L. Pająk, M. Stefaniuk, J. Kotyza, P. Reczek. Assessing the Impact of Water Cooling on PV Modules Efficiency, Energies, 13(10), 2020:2414. https://doi.org/10.3390/en13102414.
37. K. Sornek, W. Goryl, R. Figaj, G. Dabrowska, J. Brezden. Development and Tests of the Water Cooling System Dedicated to Photovoltaic Panels. Energies, 15, 2022:5884.
38. M.M. Armendáriz-Ontiveros, G.E. Dévora-Isiordia, J. Rodríguez-López, R.G. Sánchez-Duarte, J. Álvarez-Sánchez, Y. Villegas-Peralta, M.d.R. Martínez-Macias. Effect of Temperature on Energy Consumption and Polarization in Reverse Osmosis Desalination Using a Spray-Cooled Photovoltaic System. Energies, 15, 2022:7787.
39. N.Q. Nguyen, H.I. Beloev, H.B. Nguyen, V.L. Nguyen. Experimental Comparison of Water-Based Cooling Methods for PV Modules in Tropical Conditions. Energies, 18, 2025:5054.
40. M. Nateqi, M. Rajabi Zargarabadi, R. Rafee. Experimental investigations of spray flow rate and angle in enhancing the performance of PV panels by steady and pulsating water spray system. SN Appl. Sci. 3, 130, 2021. https://doi.org/10.1007/s42452-021-04169-4.
41. I. Navaei, M. Rajabi Zargarabadi, S. Rashidi. The effects of water spray characteristics on the performance of a photovoltaic panel. J Therm. Anal. Calorim. 149, 2024. – p. 14373-14387.
42. U.S. EPA Wastewater Technology Fact Sheet Screening and Grit Removal. In: United States Environ. Prot. Agency. 2003. http://www3.epa.gov/npdes/pubs/final_sgrit_removal.pdf.
43. S.L. Prabu, T.N.K. Suriyaprakash, J.A. Kumar. Wastewater treatment technologies: A review. Pharma times 43, 2011. – p. 9-13.
44. F. Deluise, L.K. Wang, S-Y. Chang, Y-T. Hung. Screening and Comminution. In: Wang LK, Hung Y-T, Shammas NK (eds) Physicochemical Treatment Processes. Humana Press, Totowa, 2005. – p. 1-19.

ISSN 3030-3907

45. S.F. Ahmed, M. Mofijur, S. Nuzhat et al. Recent developments in physical, biological, chemical, and hybrid treatment techniques for removing emerging contaminants from wastewater. J Hazard Mater, 416, 2021:125912.
46. M. Jover-Smet, J. Martín-Pascual, A. Trapote. Model of Suspended Solids Removal in the Primary Sedimentation Tanks for the Treatment of Urban Wastewater. Water 9, 2017:448.
47. A. Ferdowsi, M. Valikhan-Anaraki, S. Farzin, S-F. Mousavi. A new combination approach for optimal design of sedimentation tanks based on hydrodynamic simulation model and machine learning algorithms. Phys Chem Earth Parts A/B/C 127, 2022:103201.
48. F. de Dardel, T.V. Arden. Ion Exchangers. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley. 2008.
49. J.K. Fink. Phenol/Formaldehyde Resins. React Polym Fundam Appl. 2013. – p. 155-177.
50. M. Samer. Biological and chemical wastewater treatment processes. In: Wastewater Treatment Engineering. InTech. https://doi.org/10.5772/61250.
51. E.M. Ijanu, M.A. Kamaruddin, F.A. Norashiddin. Coffee processing wastewater treatment: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. Appl Water Sci 10, 2020:11. https://doi.org/10.1007/s13201-019-1091-9.
52. M.D. Khan, A. Singh, M.Z. Khan et al. Current perspectives, recent advancements, and efficiencies of various dye-containing wastewater treatment technologies. J Water Process Eng 53, 2023:103579.
53. D. Breite, M. Went, A. Prager et al. Charge Separating Microfiltration Membrane with pH-Dependent Selectivity. Polymers (Basel) 11, 2019. https://doi.org/10.3390/POLYM11010003.
54. B. Keskin, M.E. Ersahin, H. Ozgun, I. Koyuncu. Pilot and full-scale applications of membrane processes for textile wastewater treatment: A critical review. J Water Process Eng 42, 2021:102172.
55. E.O. Ezugbe, S. Rathilal. Membrane technologies in wastewater treatment: A review. Membranes (Basel) 10, 2020. https://doi.org/10.3390/membranes10050089.
56. A.H. Behroozi, M.R. Ataabadi. Improvement in microfiltration process of oily wastewater: A comprehensive review over two decades. J Environ Chem Eng 9, 2021:104981.

ISSN 3030-3907