ВАЗОРАТИ ЭНЕРГЕТИКА ВА ЗАХИРАҲОИ ОБИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН

ДОНИШКАДАИ ЭНЕРГЕТИКИИ ТОҶИКИСТОН

ВДБ: 621.311.243:519.87

Бо ҳуқуқи дастнавис

Давлатзода Абуфазл Нусратулло

МОДЕЛСОЗИИ КОРИ НЕРУГОҲҲОИ БАРҚИ ОФТОБӢ БО ДАРНАЗАРДОШТИ ТАЪСИРИ ОМИЛҲОИ ҲАРОРАТӢ

Д И С С Е Р Т А Т С И Я

барои дарёфти дараҷаи илмии номзади илмҳои техникӣ,
аз рӯйи ихтисоси 2.3. Энергетика ва электротехника (2.3.4. Неругоҳҳои барқӣ ва системаҳои электроэнергетикӣ)

Роҳбари илмӣ:
номзади илмҳои техникӣ, дотсент
Бурҳонзода Илҳом Бурҳон

Кӯшониён – 2026

МУНДАРИҶА

НОМГӮЙИ ИХТИСОРАҲО ВА АЛОМАТҲОИ ШАРТӢ.....4

МУҚАДДИМА.....6

ТАВСИФИ УМУМИИ ТАҲҚИҚОТ.....12

БОБИ 1. ШАРҲИ ТАҲЛИЛИИ УСУЛҲОИ МУОСИРИ МОДЕЛСОЗИИ НЕРУГОҲҲОИ БАРҚИ ОФТОБӢ.....20

1.1. Энергетикаи офтобӣ: ҳолати кунунӣ ва дурнамои рушди он.....20

1.2. Усулҳо ва асосҳои назариявии моделсозии неругоҳҳои барқи офтобӣ.....32

1.2.1. Шарҳи мухтасари бастаҳои барномавӣ барои моделсозии неругоҳҳои барқи офтобӣ.....35

1.3. Баҳисобгирии таъсири омилҳои иқлимӣ ҳангоми моделсозии кори неругоҳҳои барқи офтобӣ.....40

1.4. Баҳисобгирии таъсири ҳарорат ҳангоми моделсозии низомҳои фотоэлектрикӣ.....45

Хулосаҳои боби 1.....49

БОБИ 2. ТАҲҚИҚОТИ НАЗАРИЯВӢ ВА ТАҶРИБАВИИ ТАЪСИРИ ҲАРОРАТ БА САМАРАНОКИИ ЭНЕРГЕТИКИИ МОДУЛҲОИ ФОТОЭЛЕКТРИКӢ.....51

2.1. Хусусиятҳои физикию техникии модулҳои фотоэлектрикӣ.....53

2.2. Вобастагии зариби самаранокии кори модулҳои фотоэлектрикӣ аз ҳарорат.....57

2.3. Таназзули (деградатсия) ҳароратии модулҳои фотоэлектрикӣ ва таъсири он ба хусусиятҳои кории онҳо.....65

2.4. Таҳқиқоти таҷрибавӣ оид ба таъсири ҳарорат ба самаранокии модулҳои фотоэлектрикӣ.....75

Хулосаҳои боби 2.....87

БОБИ 3. МОДЕЛСОЗИИ РЕҶАҲОИ КОРӢ ВА ИНТИХОБИ ТАҶҲИЗОТҲОИ БАРҚИИ НЕРУГОҲИ ФОТОЭЛЕКТРИКӢ ДАР

МУҲИТИ БАРНОМАВИИ PVsyst БО ДАРНАЗАРДОШТИ ОМИЛҲОИ ҲАРОРАТӢ.....89
3.1. Масъалагузорӣ ва принсипҳои умумии моделсозии тақлидӣ.....89
3.2. Методология ва воситаи моделсозии тақлидӣ.....94
3.3. Ташаккули маҷмуи параметрҳои воридотӣ ва маълумоти ибтидоии иқлимӣ.....98
3.4. Алгоритми моделсозӣ ва таҳлили натиҷаҳо.....101
Хулосаҳои боби 3.....109
БОБИ 4. ТАҲҚИҚИ РЕҶАҲОИ КОРИ ДАСТГОҲҲОИ ФОТОЭЛЕКТРИКӢ ДАР АСОСИ МОДЕЛСОЗИИ РАВАНДҲОИ ҲАРОРАТӢ.....111
4.1. Таҳлили талафоти самаранокии дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ дар ҳароратҳои баланд.....111
4.2. Усулҳои коҳиш додани талафоти ҳароратии дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ дар асоси хунуккунии фаъол ва ғайрифаъол.....117
4.3. Методикаи ҳисоб намудани тавсифотҳои энергетикии дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ бо истифода аз муҳофизати гармии модулҳо.....123
4.4. Моделсозии математикии кори дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ бо дарназардошти истифодаи муҳофизати ҳароратии модулҳо (термомуҳофизат) дар муҳити барномавии MATLAB/Simulink.....137
Хулосаҳои боби 4.....148
ХУЛОСАҲО.....150
Тавсияҳо оид ба татбиқи амалии натиҷаҳои таҳқиқот.....152
РӮЙХАТИ АДАБИЁТИ ИСТИФОДАШУДА.....153
ИНТИШОРОТ АЗ РӮЙИ МАВЗУИ ДИССЕРТАТСИЯ.....171
ЗАМИМАҲО.....175

НОМГӮЙИ ИХТИСОРАҲО ВА АЛОМАТҲОИ ШАРТӢ

НБО – неругоҳи барқи обӣ

НБОФ – неругоҳи барқи офтобӣ

НБОХ – неругоҳи барқи обии хурд

МБЭ – манбаъҳои барқароршавандаи энергия

САЛ – системаи автоматикунонидашудаи лоиҳакашӣ

ЗКФ – зариби кори фоиданок

ШСХК “Барқи тоҷик” – Ширкати саҳомии холдингии кушодаи “Барқи тоҷик”

КБЭ – Комиссияи байналмилалии энергетикӣ

ДЭТ – Донишкадаи энергетикии Тоҷикистон

АТИ – асосноккунии техникӣ-иқтисодӣ

РК – расиши кӯтоҳ

NOCT – ҳарорати номиналии кории элементи офтобӣ

STC – шароити стандартии санҷиш

EDGAR – Пойгоҳи додаҳои партовҳо барои таҳқиқоти ҷаҳонӣ (Emissions Database for Global Research)

COP28 – Конфронси 28-уми ҷонибҳои Конвенсияи қолабии Созмони Милали Муттаҳид оид ба тағйирёбии иқлим

NPV – арзиши овардашудаи холис

IRR – меъёри дохилии даромаднокӣ, нишондиҳандаи самаранокии сармоягузорӣ бо фоиз

LCOE – арзиши муқаррарии неруи барқ

БАК – батареяҳои аккумуляторӣ

ДГД – дастгоҳи генератори дизелӣ

PV – панели офтобӣ

Mono–Si – навъи модули монокристаллӣ

Poly–Si – навъи модули поликристаллӣ

a–Si – навъи модули кремнийи аморфӣ

МФЭ – модули фотоэлектрикӣ

ТФЭ – табдилдиҳандаҳои фотоэлектрикӣ

НАФЭ – низоми автономии фотоэлектрикӣ

ДФЭ – дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ

ЭФЭ – элементи фотоэлектрикӣ

НА – низоми автономӣ

ТВА – тавсифоти волтамперӣ

ТВТ – тавсифоти тавоноӣ

АС – ҷараёни тағйирёбанда

DC – ҷараёни доимӣ

(FF – Fill Factor) – зариби пуршавии тавсифоти волтамперӣ

p–PERC – элементҳои фотоэлектрикии кремнии навъи p бо хунуккунии ғайрифаъоли сатҳи қафо

TOPCon – модули такмилёфтаи фотоэлектрикии навъи N бо қабати ултротунуки оксиди кремний дар сатҳи қафо

HJT (Heterojunction Technology**)** – Технологияи гетерогузариш

ITRPV – Харитаи байналмилалии технологии энергетикаи фотоэлектрикӣ

EVA – маводи термопластикии чандир, мустаҳкам ва шафоф

UV–F – флуоресценсияи ултрабунафш

EL – электролюминесценсия

NASA – Идораи миллии аэронавтика ва таҳқиқоти кайҳонии Иёлоти Муттаҳидаи Амрико

NASA-SSE – Метрологияи заминӣ ва энергияи офтобӣ

IAM – тағйирдиҳандаи кунҷи афтиш

GlobHor – радиатсияи уфуқии офтобии глобалӣ

DiffHor – радиатсияи офтобии уфуқии паҳншуда

GlobInc – радиатсияи глобалии ба сатҳи дастгоҳ

PR (Performance Ratio) – зариби истеҳсолнокии низоми фотоэлектрикӣ

SF (Solar Fraction) – ҳиссаи энергияи офтобӣ

SOC (State of Charge) – дараҷаи заряднокии батареяи аккумуляторӣ

PCM (Phase Change Materials) – маводҳои дорои гузариши фазафӣ

МГМ – муҳофизати гармии модул

ТРМ – термомуҳофизат

МУҚАДДИМА

Мубрамии мавзуи таҳқиқот. Имрӯз рушди соҳаи энергетика торафт бештар ба ҷустуҷӯ ва истифодаи манбаъҳои боэътимод ва гуногуни истеҳсоли неруи барқ вобаста мегардад. Дар чунин шароит манбаъҳои барқароршавандаи энергия яке аз самтҳои муҳими рушди энергетика ба ҳисоб рафта, дар байни онҳо энергетикаи офтобии фотоэлектрикӣ мавқеи хос пайдо кардааст. Рушди ин самт, пеш аз ҳама, ба мавҷудияти иқтидори назарраси техникии энергияи офтоб, коҳиш ёфтани арзиши таҷҳизоти фотоэлектрикӣ ва васеъ гардидани доираи истифодаи неругоҳҳои барқи офтобӣ алоқаманд мебошад.

Қисми зиёди афзоиши иқтидорҳои нави энергетикӣ ба соҳаҳои офтобӣ ва бодӣ рост меояд. Ин раванд аз тағйир ёфтани сохтори энергетикаи ҷаҳонӣ ва афзоиши истифодаи манбаъҳои барқароршавандаи энергия шаҳодат медиҳад.

Мувофиқи маълумоти Агентии байналмилалии энергетика (IEA), соли 2025 афзоиши солонаи иқтидори насбшудаи неругоҳҳои барқи офтобии фотоэлектрикӣ барои нахустин бор аз 600 ГВт зиёд гардида, иқтидори умумии насбшудаи онҳо дар ҷаҳон тақрибан ба 2800 ГВт расидааст. Ҳамзамон, энергетикаи офтобии фотоэлектрикӣ зиёда аз чор се ҳиссаи афзоиши иқтидорҳои нави манбаъҳои барқароршавандаи энергияро таъмин намудааст.

Ҳамин тариқ, истеҳсоли неруи барқ тавассути неругоҳҳои барқи офтобии фотоэлектрикӣ дар шароити муосир ҳамчун яке аз самтҳои афзалиятноки рушди энергетика боқӣ мемонад.

Барои Ҷумҳурии Тоҷикистон рушди энергетикаи офтобӣ аҳамияти махсус дошта, ба зарурати минбаъд гуногунсамт намудани сохтори истеҳсоли неруи барқ, баланд бардоштани эътимоднокии барқтаъминкунӣ ва самаранок истифода бурдани иқтидори назарраси радиатсияи офтобӣ вобаста мебошад. Шароити табиӣ-иқлимии ҷумҳурӣ бо давомнокии зиёди давраи тобиши офтоб ва сатҳи баланди радиатсияи офтобӣ тавсиф шуда, дар як сол зиёда аз 300 рӯзи офтобӣ ба қайд гирифта мешавад. Ин омилҳо барои рушди энергетикаи

офтобӣ ва афзоиши иқтидорҳои истеҳсолӣ тавассути сохтмон ва ба истифода додани неругоҳҳои барқи офтобӣ заминаи мусоид фароҳам меоранд.

Мубрамии масъалаи мавриди таҳқиқ дар шароити гузариши Ҷумҳурии Тоҷикистон аз истифодаи алоҳидаи дастгоҳҳои фотоэлектрикии иқтидорашон хурд ба рушди неругоҳҳои барқи офтобии миқёси калон боз ҳам бештар мегардад. Соли 2025 дар ноҳияи Ашти вилояти Суғд ва ноҳияи Ҷайҳуни вилояти Хатлон сохтмони неругоҳҳои барқи офтобӣ бо иқтидори умумии насбшудаи 500 МВт оғоз гардид.

Ҳангоми истифодаи неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ дар шароити иқлими Тоҷикистон таъсири маҷмуи омилҳои иқлимӣ ва истифодабарӣ ба фаъолияти онҳо ба назар мерасад. Аз ҷумла, ба омилҳои асосӣ шиддатнокии радиатсияи офтобӣ, ҳарорати муҳити атроф, тағйирёбии он дар давоми шабонарӯз ва сол, инчунин ғуборолудшавии сатҳи модулҳои фотоэлектрикӣ (МФЭ) дохил мешаванд.

Барои минтақаҳои ҷанубии ҷумҳурӣ ҳамбастагии радиатсияи баланди офтобӣ бо ҳарорати нисбатан баланд ва иқлими хушк хос мебошад. Чунин шароити иқлимӣ метавонад ба нишондиҳандаҳои энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ таъсири назаррас расонад.

Омили ҳароратӣ бевосита ба нишондиҳандаҳои энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ таъсир мерасонад. Ҳангоми баланд шудани ҳарорати модул параметрҳои асосии электрикии он, пеш аз ҳама, шиддат ва иқтидори максималӣ тағйир меёбанд. Дар натиҷа самаранокии воқеии энергетикии модулҳо метавонад аз қиматҳои дар тавсифоти техникии онҳо овардашуда ба таври назаррас фарқ кунад. Ҳамзамон, шиддатнокии баланди радиатсияи офтобӣ, ки ба афзоиши истеҳсоли неруи фотоэлектрикӣ мусоидат мекунад, боиси зиёд шудани гармшавии модулҳо низ мегардад.

Дар шароити иқлими гарм ҳарорати модулҳои фотоэлектрикӣ метавонад аз қимати стандартии 25 °C, ки ҳангоми муайян намудани параметрҳои электрикии онҳо дар шароити стандартии санҷиш (STC) қабул шудааст, ба таври назаррас баландтар гардад. Афзоиши ҳарорати корӣ боиси коҳиш

ёфтани иқтидори истеҳсолии модулҳо мегардад ва вобаста ба шароити истифодабарӣ талафоти иқтидор, ки дар натиҷаи таъсири ҳарорат ба вуҷуд меояд, метавонад ба 15-25 % расад.

Аз ин рӯ, ҳисобҳое, ки танҳо ба шароити стандартии STC асос меёбанд, на ҳамеша имкон медиҳанд, ки ҳаҷми воқеии истеҳсоли неруи барқ аз ҷониби неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ дар шароити иқлими гарм бо дақиқии зарурӣ арзёбӣ карда шавад. Дар шароити воқеии истифодабарӣ ҳарорати модулҳои фотоэлектрикӣ дар давоми шабонарӯз ва сол тағйир ёфта, ин тағйирот ба параметрҳои электрикии модулҳо ва ҳаҷми неруи барқи истеҳсолшаванда таъсири бевосита мерасонад.

Яке аз омилҳои дигари муҳими истифодабарии таҷҳизоти фотоэлектрикӣ дар шароити Ҷумҳурии Тоҷикистон ғуборолудшавии сатҳи модулҳо мебошад. Ҷамъшавии ғубор миқдори радиатсияи офтобиро, ки ба сатҳи модули фотоэлектрикӣ мерасад, коҳиш дода, дар натиҷа метавонад боиси кам шудани истеҳсоли неруи барқ гардад.

Аз ин лиҳоз, барои арзёбии боэътимоди самаранокии энергетикии неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ танҳо ба назар гирифтани иқтидори насбшудаи таҷҳизот, радиатсияи офтобӣ ва параметрҳои меъёрии модулҳои фотоэлектрикӣ кифоя нест. Зарур аст, ки вобастагии миқдории байни параметрҳои иқлимӣ, ҳарорати модулҳо, тағйирёбии хусусиятҳои электрикии онҳо, талафоти энергетикӣ ва истеҳсоли воқеии неруи барқ муайян карда шавад.

Ин масъала ҳангоми лоиҳакашӣ ва истифодабарии неругоҳҳои барқи офтобии иқтидорашон калон аҳамияти бештар пайдо мекунад. Бо афзоиши иқтидори насбшуда ҳатто фарқияти нисбатан хурд байни нишондиҳандаҳои ҳисобӣ ва шароити воқеии истифодабарӣ метавонад ба тафовути назаррас байни истеҳсоли солонаи пешбинишуда ва воқеии неруи барқ оварда расонад. Аз ин рӯ, баланд бардоштани дақиқии ҳисобкунии нишондиҳандаҳои энергетикӣ ҳам дар марҳилаи лоиҳакашӣ ва ҳам дар раванди истифодабарии неругоҳҳои барқи офтобӣ вазифаи муҳими илмӣ ва амалӣ ба ҳисоб меравад.

Дар раванди ҳисобкунӣ, бинобар ин, на танҳо параметрҳои номиналии модулҳои фотоэлектрикӣ, балки тағйироти воқеии ҳарорат ва дигар шароити иқлимӣ низ бояд ба назар гирифта шаванд. Истифодаи моделсозӣ имкон медиҳад, ки таъсири чунин тағйирот ба фаъолияти модулҳои фотоэлектрикӣ ва тамоми неругоҳи барқи офтобӣ арзёбӣ карда шавад. Татбиқи воситаҳои муосири моделсозӣ барои таҳқиқи реҷаҳои гуногуни кори неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ, муайян намудани таъсири ҳарорат ба нишондиҳандаҳои энергетикӣ, арзёбии талафоти энергетикӣ, инчунин таҳлили таъсири ҷойгиркунӣ ва самтгирии модулҳо имконият фароҳам меорад. Чунин равиш барои баланд бардоштани дақиқии ҳисобҳои истеҳсоли интизории неруи барқ заминаи зарурӣ фароҳам месозад.

Барои Ҷумҳурии Тоҷикистон зарурати ҳалли ин масъала ба ҳамбастагии иқтидори баланди офтобӣ бо шароити нисбатан мураккаби истифодабарии таҷҳизоти фотоэлектрикӣ вобаста мебошад. Аз як тараф, сатҳи баланди радиатсияи офтобӣ имкониятҳои назаррасро барои истеҳсоли неруи барқ фароҳам меорад. Аз ҷониби дигар, дар шароити воқеии истифодабарӣ самаранокии модулҳои фотоэлектрикӣ танҳо аз шиддатнокии радиатсияи офтобӣ вобаста нест. Ба кори онҳо ҳарорати баланди муҳити атроф, гармшавии худи модулҳо ва ҷамъшавии ғубор дар сатҳи онҳо низ таъсири назаррас мерасонанд.

Аз ин рӯ, ҳангоми ҳисобкунии кори неругоҳи барқи офтобӣ ба назар гирифтани омилҳои мазкур, пеш аз ҳама тағйирёбии ҳарорат, аҳамияти муҳим дорад, зеро ҳарорат бевосита ба иқтидори истеҳсолии модулҳо ва ҳаҷми воқеии истеҳсоли неруи барқ таъсир мерасонад.

Ҳамзамон муҳимияти таҳқиқоти мазкур ба татбиқи лоиҳаҳои бузурги энергетикаи офтобӣ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон бо иқтидори умумии 500 МВт вобаста мебошад. Дар чунин шароит дақиқии ҳисобҳои энергетикӣ аҳамияти махсус пайдо мекунад, зеро эътимоднокии арзёбии ҳаҷми воқеии истеҳсоли неруи барқ ва самаранокии дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ бевосита ба натиҷаҳои ин ҳисобҳо вобаста аст. Аз ин лиҳоз, такмили усулҳои моделсозии математикӣ

бо дарназардошти таъсири ҳарорат барои рушди энергетикаи офтобии Ҷумҳурии Тоҷикистон дорои аҳамияти ҳам илмӣ ва ҳам амалӣ мебошад. Истифодаи моделҳои мукаммал имкон медиҳад, ки таъсири шароити ҳароратӣ ба фаъолияти таҷҳизоти фотоэлектрикӣ дақиқтар муайян карда шавад.

Ҳамин тариқ, муҳимияти таҳқиқот бо хусусиятҳои истифодабарии неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ дар шароити иқлими Ҷумҳурии Тоҷикистон муайян мегардад. Дар шароити ҳарорати баланд тағйирёбии ҳолати ҳароратии модулҳои фотоэлектрикӣ метавонад ба нишондиҳандаҳои воқеии энергетикии онҳо таъсири назаррас расонад. Истифодаи моделҳои математикии дорои дарназардошти ҳолати ҳароратии модулҳо имкон медиҳад, ки ҳаҷми истеҳсоли неруи барқ бо дақиқии бештар муайян, талафоти энергетикии вобаста ба гармшавии модулҳо ошкор ва ҳангоми интихоби параметрҳои таҷҳизот, лоиҳакашӣ ва истифодабарии минбаъдаи дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ ба ҳисоб гирифта шаванд.

Бо дарназардошти гуфтаҳои боло, таҳқиқи кори неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ дар асоси моделсозии математикӣ ва компютерӣ бо мақсади арзёбии самаранокии энергетикии онҳо ва ба назар гирифтани таъсири омилҳои ҳароратӣ дар шароити иқлими гарм, аз ҷумла шароити Ҷумҳурии Тоҷикистон, масъалаи муҳими илмӣ-техникӣ буда, аҳамияти назарраси амалӣ дорад.

Дараҷаи таҳқиқи мавзуи илмӣ. Масъалаҳои рушди энергетикаи офтобӣ, баланд бардоштани самаранокии энергетикии низомҳои фотоэлектрикӣ ва таъсири омилҳои иқлимӣ ба истеҳсоли неруи барқ дар корҳои олимони ватанӣ ва хориҷӣ мавриди таҳқиқ қарор гирифтаанд. Ба масъалаҳои умумии истифодаи манбаъҳои барқароршавандаи энергия корҳои Д.С. Стребков [15], П.П. Безруких [17], В.В. Елистратов [39] ва дигар муҳаққиқон бахшида шудаанд. Ҷанбаъҳои моделсозии низомҳои фотоэлектрикӣ ва арзёбии самаранокии онҳо дар таҳқиқоти J. Duffie [62], Tze-Zhang Ang [66] ва J.L. Holechek [67] баррасӣ шудаанд.

Масъалаҳои вобастагии ҳарорати модулҳои фотоэлектрикӣ аз радиатсияи офтобӣ, ҳарорати муҳити атроф ва шароити истифодабарӣ дар корҳои H. Thomas [69], Skoplaki [76] ва J.A. Palyvos [94] омӯхта шудаанд. Ҷанбаъҳои моделсозии математикӣ ва пешгӯии истеҳсоли неруи барқ аз неругоҳҳои фотоэлектрикӣ дар таҳқиқоти М.Г. Тягунов [71], С.Г. Обухов [72] ва И.А. Плотников [13] инъикос ёфтаанд. Ҳамзамон, масъалаҳои талафоти энергетикӣ дар натиҷаи ифлосшавии сатҳи модулҳо дар корҳои L. Michel [73], M.L. Adekanbi [75] ва P. Dixit [53] таҳқиқ шудаанд.

Таъсири ҳарорати баланд ба параметрҳои электрикӣ ва самаранокии модулҳои фотоэлектрикӣ, инчунин роҳҳои коҳиш додани талафоти вобаста ба ҳарорат дар таҳқиқоти A. Hasan [98], H.M.S. Bahaidarah [100], И.М. Кирпичникова [30] ва дигарон баррасӣ гардидааст. Самаранокии низомҳои фотоэлектрикӣ дар минтақаҳои дорои иқлими гарм дар корҳои С.Е. Шеклеин [43], В.И. Велкин [44] ва О.В. Григораш [58] низ мавриди омӯзиш қарор гирифтааст.

Таҳлили самтҳои зикргардида нишон медиҳад, ки масъалаи умумии моделсозии низомҳои фотоэлектрикӣ ва таъсири омилҳои иқлимӣ ба фаъолияти онҳо омӯхта шудаанд. Бо вуҷуди ин, арзёбии маҷмуии таъсири ҳарорати кории модулҳо ба нишондиҳандаҳои энергетикии неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ дар шароити иқлимии Ҷумҳурии Тоҷикистон таҳқиқоти иловагиро талаб мекунад. Аз ҷумла, зарурати муқоисаи натиҷаҳои моделсозӣ бо маълумоти таҷрибавӣ ва муайян намудани тағйирёбии нишондиҳандаҳои энергетикӣ боқӣ мемонад.

Вобаста ба ин таҳқиқоти диссертатсионӣ ба омӯзиши масъалаи мазкур тавассути моделсозии математикӣ, таҳқиқоти таҷрибавӣ ва истифодаи барномаҳои компютерӣ равона гардидааст. Мавқеи таҳқиқот дар арзёбии таъсири ҳарорат ба параметрҳои электрикӣ ва энергетикии модулҳо ва асоснок намудани имкониятҳои баланд бардоштани эътимоднокии ҳисобҳои истеҳсоли неруи барқ дар шароити иқлими гарм ифода меёбад. Натиҷаҳои таҳқиқот метавонад барои такмили усулҳои арзёбии самаранокии энергетикии

неругоҳҳои барқи офтобӣ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон аҳамияти илмӣ ва амалӣ дошта бошанд.

Робитаи таҳқиқот бо барномаҳо (лоиҳаҳо) ва мавзуъҳои илмӣ. Таҳқиқоти диссертатсионӣ бо самтҳои афзалиятноки сиёсати давлатии Ҷумҳурии Тоҷикистон дар соҳаи энергетика, рушди манбаъҳои барқароршавандаи энергия ва илмҳои дақиқ алоқаманд буда, ба мақсаду вазифаҳои «Стратегияи миллии рушди Ҷумҳурии Тоҷикистон барои давраи то соли 2030», Қонуни Ҷумҳурии Тоҷикистон «Дар бораи энергетика» аз 19 июли соли 2022, № 1909, «Барномаи рушди манбаъҳои барқароршавандаи энергия барои солҳои 2023-2027», ки бо қарори Ҳукумати Ҷумҳурии Тоҷикистон аз 1 марти соли 2023, № 51 тасдиқ шудааст, инчунин қарори Ҳукумати Ҷумҳурии Тоҷикистон аз 30 июли соли 2020, № 427 «Дар бораи эълон намудани бистсолаи омӯзиш ва рушди илмҳои табиӣ, дақиқ ва риёзӣ» [4] мутобиқ мебошад. Мавзуи диссертатсия, ки ба моделсозии кори неругоҳҳои барқи офтобӣ бо дарназардошти таъсири омилҳои ҳароратӣ ва баланд бардоштани самаранокии истифодаи энергияи офтоб равона шудааст, бевосита ба самтҳои афзалиятноки мазкур алоқаманд буда, барои рушди асосҳои илмӣ-методии истифодаи самараноки энергияи офтоб дар Ҷумҳурии Тоҷикистон аҳамияти илмӣ ва амалӣ дорад.

ТАВСИФИ УМУМИИ ТАҲҚИҚОТ

Мақсади таҳқиқоти диссертатсионӣ аз таҳқиқи таъсири шароити ҳароратӣ ба фаъолияти модулҳои фотоэлектрикӣ ва дар ин замина таҳия намудани моделҳои математикӣ иборат аст, ки барои бо дақиқии бештар муайян намудани нишондиҳандаҳои энергетикӣ ва ҳаҷми истеҳсоли неруи барқ аз ҷониби неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ имкон фароҳам меоранд.

Вазифаҳои таҳқиқот. Барои расидан ба мақсади гузошташуда иҷрои вазифаҳои зерин пешбинӣ шудааст:

1. Таҳлили ҳолати муосир ва усулҳои асосии моделсозии неругоҳҳои барқи офтобӣ, муайян намудани омилҳои таъсиррасон ба самаранокии энергетикии онҳо бо дарназардошти таъсири ҳароратӣ.

2. Таҳқиқи таҷрибавии таъсири ҳарорати муҳити атроф ва ҳарорати кории модулҳои фотоэлектрикӣ ба нишондиҳандаҳои энергетикии онҳо ва муайян намудани вобастагии иқтидори истеҳсолии модулҳо аз ҳарорат.

3. Моделсозӣ ва арзёбии нишондиҳандаҳои энергетикии неругоҳи барқи офтобӣ бо истифода аз маҷмуи барномавии PVsyst дар асоси параметрҳои техникии низом ва шароити иқлими минтақаи таҳқиқот.

4. Таҳияи модели математикии кори дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ бо дарназардошти таъсири омилҳои ҳароратӣ ва татбиқи он дар муҳити MATLAB/Simulink.

5. Арзёбии самаранокии ҳифзи ҳароратӣ, таҳияи методикаи ба ҳисоб гирифтани таъсири ҳарорат ба параметрҳои модулҳои фотоэлектрикӣ ва пешниҳод намудани тавсияҳо барои шароити иқлими гарм, аз ҷумла шароити Ҷумҳурии Тоҷикистон.

Объекти таҳқиқот. Неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ ва модулҳои фотоэлектрикии онҳо дар шароити қиматҳои гуногуни ҳарорати муҳити атроф ва ҳарорати корӣ.

Мавзуи таҳқиқот. Таъсири шароити ҳароратӣ ба тавсифоти электрикӣ ва энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ ва истеҳсоли неруи барқ, инчунин моделҳои математикӣ ва усулҳои ҳисобии арзёбии ин таъсир ва қонуниятҳои муайяншудаи тағйирёбии он.

Асосҳои назариявии таҳқиқот. Асоси методологии таҳқиқотро муқаррароти назарияи табдилёбии фотоэлектрикии радиатсияи офтоб ба неруи барқ, инчунин қонуниятҳои тағйирёбии тавсифоти электрикии модулҳои фотоэлектрикӣ (МФЭ) ҳангоми таъсири ҳарорат ташкил медиҳанд. Барои муайян намудани вобастагиҳои регрессионӣ усули квадратҳои хурдтарин истифода шудааст. Таҳқиқи равандҳои кории неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ ва арзёбии миқдории таъсири ҳарорат тавассути моделсозии имитатсионӣ дар асоси моделҳои математикии таҳияшуда анҷом дода шудааст.

Навгонии илмӣ. Дар таҳқиқоти гузаронидашуда натиҷаҳои нави илмии зерин бори аввал ба даст оварда шудаанд:

1. Қонуниятҳои таъсири ҳарорати муҳити атроф ва ҳарорати кории модулҳои фотоэлектрикӣ ба параметрҳои электрикӣ ва энергетикии онҳо муайян гардида, вобастагии иқтидори истеҳсолии модулҳои фотоэлектрикӣ аз ҳарорати корӣ муқаррар карда шуд.

2. Модели математикии кори модулҳои фотоэлектрикӣ бо дарназардошти таъсири омилҳои ҳароратӣ таҳия гардид, ки имкон медиҳад тағйирёбии параметрҳои электрикӣ ва энергетикии модулҳо вобаста ба ҳарорати корӣ арзёбӣ карда шавад.

3. Вобастагии миқдории ҳарорати кории модулҳои фотоэлектрикӣ аз ҳарорати муҳити атроф муайян карда шуд, ки имкон медиҳад таъсири ҳарорат ҳангоми моделсозии кори онҳо ба ҳисоб гирифта шавад. Вобастагии бадастомада барои такмили модели дастгоҳи фотоэлектрикӣ дар муҳити MATLAB/Simulink истифода гардида, тағйирёбии иқтидори истеҳсолӣ ва истеҳсоли неруи барқ дар шароити гуногуни ҳароратӣ арзёбӣ карда шуд.

4. Равиши ҳисобӣ барои муайян намудани таъсири ҳарорат ба модулҳои фотоэлектрикӣ пешниҳод гардид, ки арзёбии миқдории тағйирёбии параметрҳои электрикӣ ва энергетикии онҳоро таъмин намуда, имкон медиҳад талафоти ҳароратӣ ҳангоми қиматҳои гуногуни ҳарорати корӣ муайян карда шаванд.

5. Модели математикии ҳифзи ҳароратии модулҳои фотоэлектрикӣ таҳия ва самаранокии он дар шароити ҳарорати баланди муҳити атроф арзёбӣ карда шуд. Муайян гардид, ки истифодаи ҳифзи ҳароратӣ имкон медиҳад ҳарорати сатҳи модули фотоэлектрикӣ то 3,53 °C паст карда шуда, таъсири ҳарорати баланд ба нишондиҳандаҳои энергетикии он коҳиш дода шавад.

Нуктаҳои ба ҳимоя пешниҳодшаванда:

1. Вобастагиҳои таҷрибавӣ ва регрессионии ҳарорати кории модулҳои фотоэлектрикӣ аз ҳарорати муҳити атроф барои ду ҳолати истифодабарӣ бо термомуҳофизат ва бе он дар асоси натиҷаҳои таҳқиқоти таҷрибавии саҳроӣ

муайян карда шуда, қонуниятҳои тағйирёбии ҳарорати кории модулҳо вобаста ба ҳарорати муҳити атроф муқаррар гардидаанд. Натиҷаҳои бадастомада барои арзёбии таъсири омилҳои ҳароратӣ ба параметрҳои электрикӣ ва энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ дар шароити иқлимии Ҷумҳурии Тоҷикистон замина фароҳам меоранд.

2. Методикаи ҳисоб ва арзёбии параметрҳои электрикӣ ва энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ бо дарназардошти таъсири омилҳои ҳароратӣ ва истифодаи термомуҳофизат таҳия гардида, модели математикии кори модул дар муҳити MATLAB/Simulink татбиқ карда шудааст. муайян карда шудааст, ки ҳангоми ҳарорати муҳити атрофи 45 ^{o}C истифодаи термомуҳофизат ҳарорати кории модулро аз 62,13 ^{o}C то 58,6 ^{o}C паст намуда, фарқияти 3,53 ^{o}C-ро таъмин менамояд. Ин натиҷа таъсири термомуҳофизатро ба беҳтар шудани шароити ҳароратии кори модули фотоэлектрикӣ нишон медиҳад.

3. Модели тақлидии низоми автономии фотоэлектрикӣ барои шароити иқлимии ноҳияи Кӯшониён дар муҳити барномавии PVsyst таҳия гардида, таъсири параметрҳои иқлимӣ, омилҳои ҳароратӣ ва сарбории электрикӣ ба нишондиҳандаҳои энергетикии низоми арзёбӣ карда шудааст. дар асоси натиҷаҳои моделсозӣ конфигуратсияи техникии низоми фотоэлектрикии автономӣ асоснок гардида, тавозуни энергетикӣ ва ҳиссаи энергияи офтобӣ дар пӯшонидани сарбории энергетикии истеъмолкунандагон муайян карда шудаанд.

Аҳамияти назариявӣ ва амалии таҳқиқот. Аҳамияти назариявии таҳқиқот бо ба даст овардани вобастагиҳои ҳисобӣ муайян мегардад, ки имкон медиҳанд таъсири ҳарорат ҳангоми таҳлили тавсифоти электрикии модулҳои фотоэлектрикӣ ба назар гирифта шавад. Қонуниятҳои муайяншудаи таъсири ҳарорати муҳити атроф ва ҳарорати корӣ ба параметрҳои электрикӣ ва энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ, вобастагиҳои таҷрибавӣ ва регрессионӣ, инчунин методикаи ҳисоб ва арзёбии параметрҳои модулҳо бо дарназардошти таъсири ҳарорат заминаи илмиро барои баланд бардоштани дақиқии моделсозӣ ва арзёбии истеҳсоли неруи барқ аз ҷониби неругоҳҳои

барқи офтобӣ фароҳам меоранд. Модели таҳияшуда дар муҳити MATLAB/Simulink ва натиҷаҳои моделсозӣ дар маҷмуи барномавии PVsyst метавонанд барои таҳқиқи таъсири ҳарорати корӣ ва талафоти ҳароратӣ ба нишондиҳандаҳои электрикӣ ва энергетикии низомҳои фотоэлектрикӣ истифода шаванд.

Аҳамияти амалии таҳқиқот дар имконияти истифодаи натиҷаҳои бадастомада ҳангоми лоиҳакашӣ, ҳисобкунӣ ва арзёбии самаранокии энергетикии неругоҳҳои барқи офтобӣ дар шароити иқлими гарм, аз ҷумла дар Ҷумҳурии Тоҷикистон, ифода меёбад. Методикаи пешниҳодшуда имкон медиҳад, ки параметрҳои электрикӣ ва энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ бо дарназардошти ҳарорати воқеии корӣ ҳисоб карда шуда, таъсири ҳифзи ҳароратӣ ба фаъолияти онҳо арзёбӣ гардад. Моделсозӣ дар маҷмуъҳои барномавии PVsyst ва MATLAB/Simulink метавонад барои интихоби параметрҳои таҷҳизоти асосии неругоҳи барқи офтобӣ, арзёбии истеҳсоли неруи барқ бо дарназардошти сарбории истеъмолкунандагон ва таҳлили талафоти энергетикӣ истифода шавад. Натиҷаҳои таҳқиқот инчунин барои таҳияи тавсияҳои илмӣ-амалӣ оид ба баланд бардоштани самаранокии низомҳои фотоэлектрикӣ дар минтақаҳои дорои ҳарорати баланди муҳити атроф аҳамияти амалӣ доранд.

Дараҷаи эътимоднокии натиҷаҳои диссертатсия. Эътимоднокии натиҷаҳои кори диссертатсионӣ бо истифодаи натиҷаҳои таҳқиқоти таҷрибавии саҳроӣ, коркарди регрессионии маълумоти таҷрибавӣ ва моделсозии математикӣ дар муҳитҳои барномавии PVsyst ва MATLAB/Simulink таъмин карда шудааст. Эътимоднокии натиҷаҳои ҳисобӣ тавассути муқоисаи реҷаҳои кори модулҳои фотоэлектрикӣ бо термомуҳофизат ва бе он, инчунин арзёбии таъсири термомуҳофизат ба параметрҳои электрикӣ ва энергетикии модул санҷида шудааст. Мутобиқати натиҷаҳои таҷрибавӣ, ҳисобӣ ва моделсозӣ, инчунин истифодаи муштараки PVsyst ва MATLAB/Simulink барои арзёбии нишондиҳандаҳои энергетикӣ ва

параметрҳои электрикию ҳароратии низоми фотоэлектрикӣ эътимоднокии натиҷаҳои бадастомадаро тасдиқ менамояд.

Мутобиқати диссертатсия ба шиносномаи ихтисоси илмӣ. Диссертатсия ба бандҳои зерини шиносномаи ихтисоси илмии 2.3. Энергетика ва электротехника (2.3.4. Неругоҳҳои барқӣ ва системаҳои электроэнергетикӣ)» мутобиқат мекунад:

Банди 2. «Таҳиясозии асосҳои илмӣ (равишҳо) ҷиҳати таҳқиқоти хусусиятҳои умумӣ, шартҳои фаъолият ва усулҳои ҳисоб, алгоритмҳо ва барномаҳои интихобӣ ва муносибсозии параметрҳо, нишондиҳандаҳои сифат ва реҷаҳои кории системаҳои энергетикӣ, муҷтамаъҳо, дастгоҳҳои энергетикӣ дар асоси сӯзишвориҳои органикӣ, алтернативӣ ва намудҳои энергияи барқароршаванда фаъолияткунанда...» [5] – дар қисми таҳқиқоти таҷрибавии таъсири ҳарорати муҳити атроф ва ҳарорати кории модулҳои фотоэлектрикӣ ба параметрҳои электрикӣ ва энергетикии онҳо, муайян намудани вобастагиҳои ҳароратӣ ва таҳияи методикаи ҳисоб ва арзёбии параметрҳои модулҳои фотоэлектрикӣ бо дарназардошти таъсири ҳарорат ва термомуҳофизат;

Банди 4. «Таҳиясозӣ, таҳқиқот ва такмили технологияҳои мавҷуда ва азхудкунии технологияҳо ва таҷҳизоти нав барои истеҳсоли неруи барқ ва гармӣ, истифодаи сӯзишвориҳои органикӣ ва алтернативӣ, ва намудҳои энергияи барқароршаванда....тақвияти» «эътимоднокӣ ва дарозмуддат кардани муҳлати хизмати элементҳои системаҳои энергетикӣ....» – дар қисми таҳқиқ ва такмили технологияҳои истифодаи энергияи офтобӣ тавассути арзёбии таъсири ҳарорати баланд ба параметрҳои электрикӣ ва энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ, таҳияи термомуҳофизат ва муайян намудани таъсири он ба ҳарорати корӣ ва нишондиҳандаҳои энергетикии модулҳо бо мақсади коҳиш додани талафоти ҳароратӣ ва баланд бардоштани самаранокии энергетикии кори онҳо;

Банди 11. «Моделсозии математикӣ, таҳқиқоти ададӣ ва табиии равандҳои физикию химиявӣ ва кории ҷоришаванда дар системаҳои

энергетикӣ ва дастгоҳҳо, ки бо сӯзишвориҳои органикӣ, алтернативӣ ва манбаъҳои энергияи барқароршаванда кор мекунанд...» – дар қисми таҳияи модели математикии кори модулҳои фотоэлектрикӣ бо дарназардошти таъсири омилҳои ҳароратӣ, моделсозии кори онҳо дар муҳити барномавии MATLAB/Simulink ва моделсозии кори неругоҳи барқи офтобӣ дар муҳити барномавии PVsyst бо дарназардошти шароити иқлимӣ, сарбории электрикии истеъмолкунандагон, истеҳсоли неруи барқ ва талафоти энергетикӣ.

Саҳми шахсии довталаби дараҷаи илмӣ дар муайян намудани мақсад ва вазифаҳои таҳқиқот, гузаронидани таҳқиқоти таҷрибавӣ, ҷамъоварӣ ва коркарди маълумоти саҳроӣ, муайян намудани вобастагиҳои таҷрибавии параметрҳои электрикии модулҳои фотоэлектрикӣ аз ҳарорат, таҳияи модели математикӣ ва методикаи ҳисоб бо дарназардошти таъсири омилҳои ҳароратӣ ифода меёбад. Довталаб дар таҳияи модели термомуҳофизат, моделсозӣ дар муҳитҳои барномавии PVsyst ва MATLAB/Simulink, таҳлил ва муқоисаи натиҷаҳои таҷрибавию ҳисобӣ, инчунин таҳияи хулосаҳо ва тавсияҳои илмӣ-амалӣ бевосита саҳмгузор мебошад.

Тасвиб ва амалисозӣ. Натиҷаҳои асосии таҳқиқоти диссертатсионӣ дар конференсияҳои илмӣ-амалии ҷумҳуриявӣ ва байналмилалӣ мавриди апробатсия қарор гирифтаанд. Қисме аз натиҷаҳои таҳқиқот дар конференсияҳои ба масъалаҳои энергетика, рушди инноватсионӣ ва муҳандисии саноатӣ бахшидашуда, ки солҳои 2023–2026 дар Ҷумҳурии Тоҷикистон ва Федератсияи Россия баргузор гардиданд, пешниҳод ва муҳокима карда шуданд.

Аз ҷумла, натиҷаҳои таҳқиқот дар конференсияҳои байналмилалии «Энергетика: состояние и перспективы развития» (Душанбе, 2023, 2025), «Развитие энергетики Таджикистана в период независимости» (Душанбе, 2025), «Цифровая индустриализация и развитие энергетики глазами ученых и исследователей» (Кӯшониён, 2025), инчунин дар IV конференсияи умумироссиягии ҷавонон бо иштироки байналмилалӣ «Булатовские чтения»

(Томск, 2024) ва конференсияи байналмилалии ICIEAM 2026 (Сочи, 2026) пешниҳод ва мавриди баррасӣ қарор гирифтанд.

Натиҷаҳои таҳқиқот инчунин дар конференсияҳои илмӣ-амалии Донишкадаи энергетикии Тоҷикистон ва Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ мавриди муҳокима қарор гирифтаанд [3].

Интишорот аз рӯйи мавзуи диссертатсия. Натиҷаҳои таҳқиқоти анҷомдодашуда дар 17 нашрияи илмӣ инъикос ёфтаанд. Аз ҷумла, 5 мақола дар нашрияҳои илмии ба феҳристи Комиссияи олии аттестатсионии назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон ва Комиссияи олии аттестатсионии Федератсияи Россия шомилбуда ба нашр расидаанд, 1 нашрия дар маводи конференсияи илмӣ, ки дар пойгоҳҳои байналмилалии библиографии IEEE ва Scopus индексатсия мешавад, инчунин 11 нашрия дар маҷмуаи маводи конференсияҳои байналмилалии илмӣ нашр шудаанд.

Сохтор ва ҳаҷми диссертатсия. Диссертатсия аз муқаддима, чор боб, хулоса, феҳристи адабиёт ва замимаҳо иборат мебошад. Ҳаҷми умумии кор 186 саҳифаи матни чопшударо ташкил медиҳад (аз ҷумла 152 саҳифа матни асосии диссертатсия). Маводи тасвирӣ ва маълумотии диссертатсия бо 43 расм ва 10 ҷадвал пешниҳод гардида, рӯйхати адабиёт 137 номгӯй ва замимаҳо 4 ададро дар бар мегиранд.

БОБИ 1. ШАРҲИ ТАҲЛИЛИИ УСУЛҲОИ МУОСИРИ МОДЕЛСОЗИИ НЕРУГОҲҲОИ БАРҚИ ОФТОБӢ

1.1. Энергетикаи офтобӣ: ҳолати кунунӣ ва дурнамои рушди он

«Энергияи офтоб, ки яке аз манбаъҳои барқароршавандаи энергия ба шумор меравад, энергияи афканишоти офтоб мебошад, ки асосан дар шакли нури офтоб зоҳир мегардад» [1], [16], [41]. Манбаи энергияи офтоб энергияи бузургест, ки дар натиҷаи якҷояшавии ҳастаҳои ҳидроген дар ҳарорати фавқулбаланд дар дохили Офтоб ҳосил мегардад. Офтоб қисми зиёди энергияеро, ки инсон барои фаъолияти худ ба он ниёз дорад, бевосита ё бавосита таъмин мекунад.

Баланд шудани ҳарорати миёнаи Замин ба зиёда аз 1 ^{o}C нисбат ба миёнаи асри XX яке аз зуҳуроти назарраси тағйирёбии муосири иқлим ба ҳисоб меравад. Ин тамоюл асосан ба афзоиши консентратсияи газҳои гулхонаӣ дар атмосфера, пеш аз ҳама гази карбон (CO_2) вобаста мебошад.

Тибқи арзёбиҳои таҳқиқоти байналмилалӣ, аз соли 1970 сар карда, ҳаҷми партовҳои антропогении CO_2 тақрибан 80 % зиёд гардидааст, ки ин таъсири манфиро ба низоми глобалии иқлим ба таври назаррас афзоиш додааст [1], [2]. Дар ин замина, масъалаҳои декарбонизатсияи (карбонзудоӣ) саноат ва бахши энергетика дар сиёсати байналмилалии иқлим мавқеи афзалиятнокро касб намудаанд. Яке аз самтҳои асосӣ ноил шудан ба рушди камкарбон ва гузариши тадриҷӣ ба иқтисодиёте мебошад, ки бо ҳадди ақали партови газҳои гулхонаӣ тавсиф меёбад. Ин ҳадаф дар доираи Созишномаи Париж (Paris Agreement) муқаррар гардидааст [1], [2].

Тибқи маводи таҳлилии Созмони Милали Муттаҳид (United Nations), ки бар асоси маълумоти пойгоҳи ҷаҳонии Пойгоҳи додаҳои партовҳо барои таҳқиқоти ҷаҳонӣ EDGAR (Emissions Database for Global Research) таҳия шудаанд, манбаъҳои асосии партовҳои антропогении газҳои гулхонаӣ равандҳои энергетикӣ дар бахшҳои гуногуни иқтисодиёт, аз ҷумла нақлиёт, истеҳсолоти саноатӣ ва сохтмон, кишоварзӣ, инчунин низомҳои истеҳсоли

неруи барқ ва таъминоти гармӣ мебошанд [3]. Таҳлили сохтори партовҳо нишон медиҳад, ки ҳиссаи аз ҳама зиёди партовҳои CO_2, ки бо истифодаи сӯзишвории истихроҷшаванда алоқаманд, ба бахши электроэнергетика рост меояд ва тақрибан 38 %-и ҳаҷми умумии партовҳои ҷаҳонии CO_2-ро ташкил медиҳад. Саҳми назаррас инчунин ба бахши нақлиёт, тақрибан 21 % рост меояд. Баъдан равандҳои технологие ҷойгир мешаванд, ки бе сӯзондани сӯзишворӣ амалӣ мегарданд (тақрибан 10 %), биноҳо ва хоҷагии коммуналӣ (тақрибан 9 %), инчунин дигар намуди сӯзондани сӯзишворӣ дар саноат, ки ҳиссаи онҳо тақрибан 21 % партовҳои глобалии CO_2-ро ташкил медиҳанд [4].

Ҳамин тариқ, ҳиссаи баланди партовҳое, ки ба бахши энергетика рост меоянд, зарурати татбиқи фаъоли технологияҳои энергетикии камкарбон, баланд бардоштани самаранокии энергетикӣ ва истифодаи васеи манбаъҳои барқароршавандаи энергияро дар сохтори тавозуни ҷаҳонии энергетика муайян менамояд [4].

Энергияи офтоб ҳамчун яке аз навъҳои ояндадор ва амалан тамомнашавандаи манбаъҳои барқароршавандаи энергия арзёбӣ мегардад, ки барои таъмини рушди устувори энергетика дорои иқтидори назаррас мебошад. Дар шароити муосир ҳамчун роҳи ҳалли дарозмуддати як қатор масъалаҳои муҳими энергетикаи ҷаҳон, аз ҷумла вобастагии иқтисодиёти кишварҳо аз воридоти сӯзишвории истихроҷшаванда, бадшавии вазъи экологӣ ва зарурати таъмини рушди устувори иқтисодӣ, мавриди баррасӣ қарор мегирад [5].

«Афзоиши нигаронӣ аз паёмадҳои тағйирёбии глобалии иқлим, инчунин маҳдуд будани захираҳои анъанавии энергетикӣ, зарурати ҷустуҷӯи манбаъҳои алтернативии неруи баркро бештар менамояд. Дар шароити афзоиши доимии талаботи ҷаҳонӣ ба захираҳои энергетикӣ истифодаи технологияҳои табдил додани энергияи офтоб ба неруи барқ аҳамияти махсус касб мекунанд» [27], [83]. Ба шарофати бехатарии экологӣ, самаранокии иқтисодӣ ва иқтидори амалан номаҳдуди худ, энергетикаи офтобӣ ҳамчун яке аз роҳҳои дастрастарин ва қобили густариш барои таъмини неруи барқи биноҳои истиқоматӣ ва объектҳои зерсохторӣ арзёбӣ мегардад.

Дар ин замина, дар бисёр кишварҳои ҷаҳон сиёсати давлатӣ ба ҳавасмандгардонии ҷорӣ намудани системаҳои фотоэлектрикии офтобӣ равона гардидааст. Ин раванд тавассути истифодаи механизмҳои молиявии дастгирӣ, ҷудо намудани субсидияҳо ва татбиқи барномаҳои баланд бардоштани сатҳи огоҳии аҳолӣ амалӣ карда мешавад. Татбиқи чунин тадбирҳо ба истифодаи васеи дастгоҳҳои тақсимшудаи энергетикӣ дар асоси энергияи офтоб ва баланд гардидани сатҳи устувории энергетикӣ мусоидат менамояд [6], [7].

Дар расми 1.1 вазъи кунунӣ ва динамикаи рушди энергетикаи ҷаҳонӣ дар заминаи манбаъҳои барқароршавандаи энергия дар соли 2025, инчунин нишондиҳандаҳои пешбинишаванда то соли 2030 пешниҳод мегардад.



Расми 1.1. – Ҳолат ва динамикаи рушди энергетикаи ҷаҳонии барқароршаванда дар соли 2025 ва нишондиҳандаҳои пешбинишаванда то соли 2030. Манбаъ: IRENA [7].

Дар инфографикаи пешниҳодшуда нишондиҳандаҳои асосии рушди манбаъҳои барқароршавандаи энергия дар миқёси ҷаҳон то соли 2025 ҷамъбаст шудаанд. Таҳлили маводи графикӣ имкон медиҳад, ки якчанд ҷанбаҳои ба ҳам алоқаманд, ки вазъи кунунӣ ва динамикаи рушди ин бахшро тавсиф менамоянд, ҷудо карда шаванд [8].

Пеш аз ҳама, афзоиши назарраси иқтидори насбшудаи манбаъҳои барқароршавандаи энергия ҷалби таваҷҷуҳ менамояд, ки ба тақрибан 5,15 ТВт расидааст. Ҳамзамон, афзоиши солонаи иқтидор рекордӣ буда, тақрибан 692 ГВт-ро ташкил додааст, ки ин аз идома ёфтани суръатёбии гузариши энергетикӣ дар сатҳи ҷаҳонӣ шаҳодат медиҳад.

Дар сохтори энергетикаи ҷаҳон ҳиссаи манбаъҳои барқароршавандаи энергия қариб ба нисфи иқтидори умумии насбшуда расида, 49,4%-ро ташкил медиҳад. Махсусан, рушди босуръати манбаъҳои тағйирёбандаи энергия, пеш аз ҳама генератсияи офтобӣ ва бодӣ, қобили таваҷҷуҳ мебошад. Ҳиссаи онҳо ба 35,3 % расида, баландтарин суръати афзоишро нишон медиҳад. Аз нуқтаи назари ҳадафҳои дарозмуддат, маълумоти пешниҳодшуда ба нишондиҳандаҳои сенарияи маҳдуд намудани болоравии ҳарорати глобалӣ дар сатҳи 1,5 ^{o}C мувофиқат менамояд.

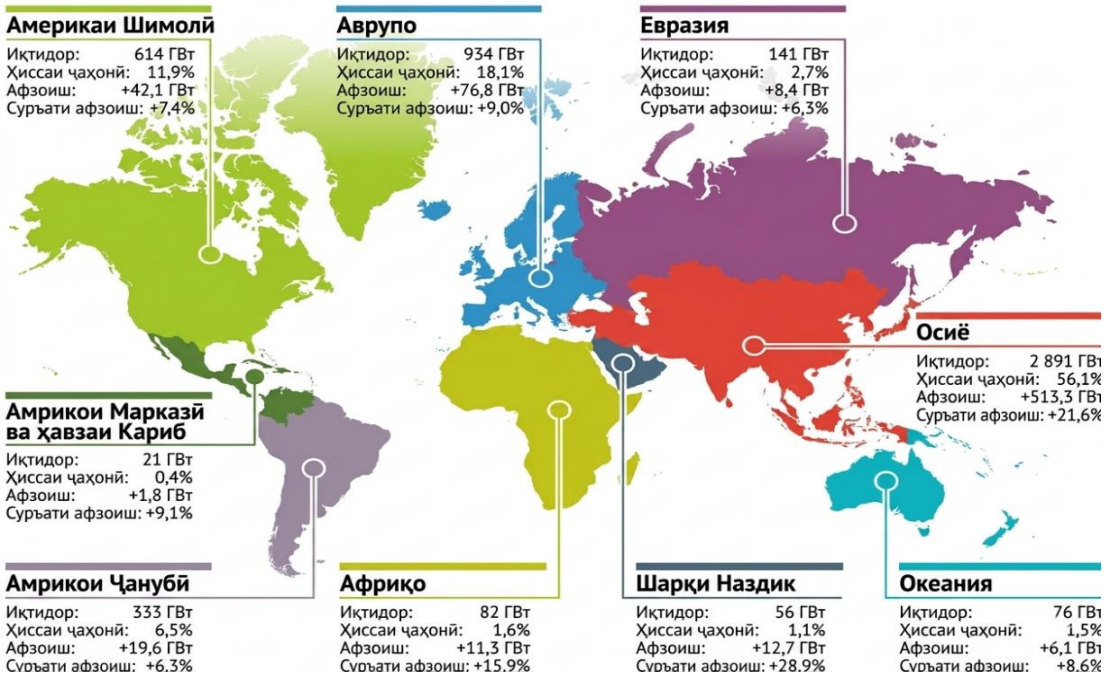
Тибқи ин сенария, то соли 2030 иқтидори умумии манбаъҳои барқароршавандаи энергия бояд тақрибан ба 11,17 ТВт расонида шавад. Аз ин рӯ, дар шароити сатҳи кунунии рушд ҳанӯз ҳам тафовути назаррас, ки тақрибан 6 ТВт арзёбӣ мегардад, боқӣ мемонад. Ин ҳолат зарурати боз ҳам бештар намудани сармоягузорӣ ва рушди технологияи соҳаро таъкид менамояд.

Таҳлили сохтори намудҳои гуногуни тавлиди энергия нишон медиҳад, ки мавқеи пешсаф ба энергетикаи офтобӣ тааллуқ дорад, ки иқтидори насбшудаи он аз 2,3 ТВт зиёд мебошад. Энергетикаи обӣ (гидроэнергетика) ва бодӣ ҳар кадом бо иқтидори тақрибан 1,296 ТВт ва 1,291 ТВт мавқеи наздик ба ҳам дошта, заминаи асосии тавлиди энергияи камкарбонро ташкил медиҳанд. Саҳми дигар намудҳои манбаъҳои барқароршавандаи энергия нисбатан маҳдуд боқӣ мемонад.

Иқтидори биоэнергетика (энергетикаи биогазӣ) тақрибан 154 ГВт, энергетикаи геотермалӣ тақрибан 16 ГВт-ро ташкил медиҳад, дар ҳоле ки энергетикаи баҳрӣ ҳанӯз дар марҳалаи ибтидоии рушд қарор дошта, бо иқтидори насбшудаи начандон зиёд тавсиф мешавад.

Дар маҷмуъ, маълумоти пешниҳодшуда тамоюли устувори афзоиши ҳиссаи манбаъҳои барқароршавандаи энергияро дар тавозуни ҷаҳонии энергетика тасдиқ менамояд. Ҳамзамон, ин маълумот нишон медиҳад, ки барои ноил шудан ба ҳадафҳои эълоншудаи иқлимӣ дар муҳлатҳои муқарраршуда, рушди боз ҳам босуръаттари соҳа зарур мебошад.

Дар расми 1.2 нишондиҳандаҳои глобалии иқтидори насбшудаи манбаъҳои барқароршавандаи энергия аз рӯйи минтақаҳои ҷаҳон оварда шудааст. Дар расми мазкур харитаи муфассали ҷаҳонӣ нишон дода шудааст, ки тақсимоти иқтидорҳои насбшудаи бахши энергетикаро дар минтақаҳои асосии саёра инъикос менамояд.



Расми 1.2. – Сохтори минтақавӣ ва динамикаи иқтидори насбшудаи манбаъҳои барқароршавандаи энергия дар ҷаҳон. Манбаъ: IRENA [7].

Новобаста аз он ки соли 2025 бо баландтарин суръати дар солҳои охир ба истифода додани иқтидорҳои нави манбаъҳои барқароршавандаи энергия тавсиф мешавад, сохтори минтақавии тақсимоти онҳо то ҳол хеле нобаробар боқӣ мемонад. Таҳлил нишон медиҳад, ки байни кишварҳо ва минтақаҳои асосии саёра, аз рӯйи ҳам нишондиҳандаҳои мутлақи афзоиши иқтидор ва ҳам суръати рушди соҳа тафовути назаррас мавҷуд мебошад.

Саҳми бештарро дар густариши глобалии иқтидорҳои манбаъҳои барқароршавандаи энергия ба таври анъанавӣ минтақаи Осиё таъмин намудааст, ки ба ҳиссаи он зиёда аз 74 % ҳамаи иқтидорҳои ба истифода додашуда рост меояд. Аз ҷиҳати миқдорӣ, афзоиши иқтидор зиёда аз 513 ГВт-ро ташкил дода, имкон дод, ки нишондиҳандаи умумӣ то 2,89 ТВт расонида шавад, ки ба 56,1 % сатҳи ҷаҳонӣ баробар мебошад. Дар ин раванд нақши муайянкунанда ба Ҷумҳурии Мардумии Чин тааллуқ дорад, ки қисми асосии афзоиши минтақавиро (зиёда аз 440 ГВт) таъмин намудааст. Ин ҳолат мавқеи пешсафии стратегии Чинро дар соҳаи гузариши энергетикӣ тасдиқ менамояд.

Минтақаи Аврупо низ динамикаи устувори мусбат нишон дод. Афзоиши иқтидорҳо тақрибан 76,8 ГВт-ро ташкил дод (тақрибан 9 %). Ба ин афзоиш саҳми назаррасро Олмон гузошт, ки дар он афзоиши иқтидор аз 20 ГВт зиёд гардид. Ин натиҷа татбиқи пайдарпайи сиёсати декарбонизатсияи (карбонзудоӣ) бахши энергетикаро инъикос менамояд. Ҳамзамон, рушди соҳа дар кишварҳои алоҳидаи минтақа хусусияти нобаробар дошт. Аз ҷумла дар Ҷумҳурии Тоҷикистон дар соли 2025 иқтидори умумии насбшудаи манбаъҳои барқароршавандаи энергия ба 5,738 ГВт расид, ки нисбат ба соли 2015 (4,957 ГВт) 15,8 % зиёд мебошад. «То соли 2025 тақрибан 98 %-и истеҳсоли неруи барқ аз ҳисоби неругоҳҳои барқи обӣ амали гардида, кишвар аз рӯйи ҳиссаи истеҳсоли «энергияи сабз» дар минтақаи ҷаҳон ҷойгоҳи шашумро бо нишондиҳандаи фоиз ишғол намуд» [25].

Дар соли 2025 Тоҷикистон татбиқи лоиҳаи нави энергетикаи офтобиро идома дода, сохтмони неругоҳҳои барқи офтобии иқтидори умумии 500 МВт (ду неругоҳ, ҳар кадом 250 МВт) оғоз гардид, ки ба диверсификатсияи бахши энергетикаи кишвар мусоидат мекунад.

Дар Амрикои Шимолӣ афзоиши иқтидорҳои манбаъҳои барқароршавандаи энергия тақрибан 42 ГВт (7,4 %)-ро ташкил дод, ки асосан аз ҳисоби ба истифода додани объектҳои нави энергетикӣ дар Иёлоти Муттаҳидаи Амрико таъмин гардид. Ин ҳолат аз нигоҳ доштани таваҷҷуҳи устувори сармоягузорӣ ба ин соҳа шаҳодат медиҳад.

Ба динамикаи рушди энергетикаи барқароршаванда дар Африқо диққати махсус додан зарур аст, зеро дар соли 2025 дар ин минтақа баландтарин афзоиши иқтидор дар тамоми давраи мушоҳида ба қайд гирифта шуд, ки 11,3 ГВт (15,9 %)-ро ташкил медиҳад. Омилҳои асосии пешбарандаи ин раванд Эфиопия, Ҷумҳурии Африқои Ҷанубӣ ва Миср мебошанд, ки лоиҳаҳои бузурги зерсохториро дар соҳаи энергетика амалӣ менамоянд.

Дар Уқёнусия (Океания) иқтидори насбшуда ба андозаи 6,1 ГВт (8,6 %) афзоиш ёфт, ки асосан аз ҳисоби рушди фаъоли бахши энергетикаи Австралия таъмин гардид. Динамикаи мусбат инчунин дар кишварҳои Амрикои Марказӣ ва ҳавзаи баҳри Кариб мушоҳида мешавад, ки дар он ҷо афзоиши иқтидор 1,8 ГВт (9,1 %)-ро ташкил додааст. Ин нишондиҳанда баландтарин сатҳ аз соли 2016 барои ин минтақаҳо ба ҳисоб меравад.

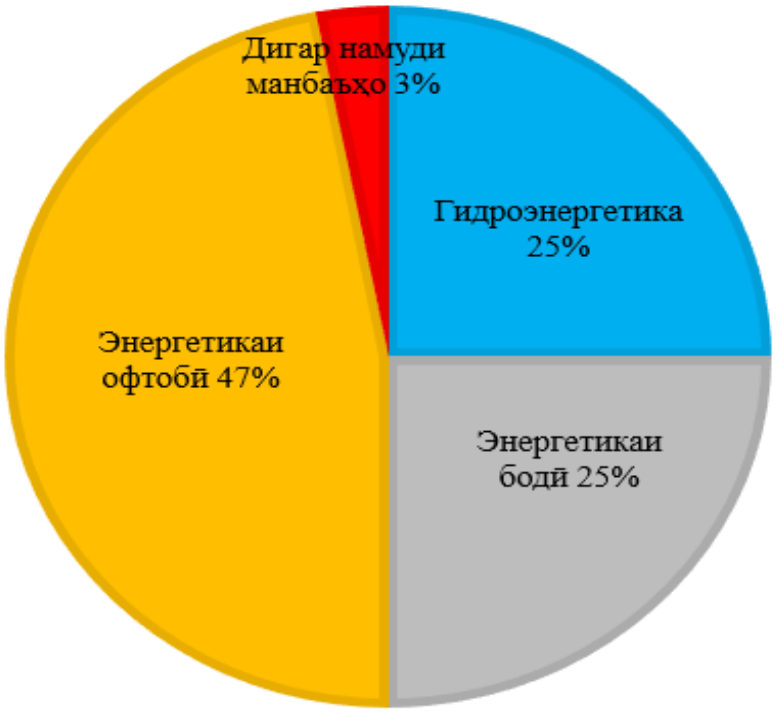
Суръати баландтарини афзоиш дар минтақаи Ховари Миёна дар соли 2025 ба қайд гирифта шуд, ки дар он ҷо зиёдшавии иқтидорҳо ба 12,7 ГВт ё 28,9 % нисбат ба соли 2024 расид. Омили асосии ин афзоиш рушди фаъоли лоиҳаҳо дар Арабистони Саудӣ мебошад, ки ба диверсификатсияи тавозуни энергетикӣ ва коҳиш додани вобастагӣ аз захираҳои анъанавии карбогидрадӣ равона шудаанд.

Ҳамин тавр, новобаста аз тамоюли ҷаҳонии рушди босуръати энергетикаи барқароршаванда, нобаробарии назарраси минтақавӣ боқӣ мемонад. Ин ҳолат бо фарқиятҳои сатҳи рушди иқтисодӣ, фаъолнокии сармоягузорӣ ва сиёсати давлатии энергетикии кишварҳо вобаста мебошад.

Дар расми 1.3 сохтори иқтидори насбшудаи ҷаҳонии манбаъҳои барқароршавандаи энергия аз рӯйи ҳиссаи фоизии навъҳои асосии истеҳсоли неруи барқ нишон дода шудааст, ки имкон медиҳад конфигуратсияи технологии марҳалаи муосири гузариши ҷаҳонии энергетикӣ ба таври ҳамаҷониба арзёбӣ гардад.

То охири соли 2025 иқтидори умумии муқарраршудаи ҷаҳонии манбаъҳои барқароршавандаи энергия дар ҷаҳон ба 5149 ГВт расид, ки баландтарин нишондиҳандаи таърихӣ ба ҳисоб рафта, нисбат ба соли 2024, 692

ГВт ё 15,5 дарсад зиёд мебошад [7]. Дар сохтори иқтидор аз рӯйи навъҳои истеҳсоли неруи барқ мавқеи пешсафро энергетикаи офтобӣ ишғол менамояд, ки иқтидори муқарраршудаи он 2392 ГВт-ро ташкил медиҳад. Дар ифодаи нисбӣ ин нишондиҳанда ба тақрибан 47 дарсади сохтори умумӣ баробар буда, мақоми энергетикаи офтобиро ҳамчун самти аз ҳама васеъмиқёс, босуръат рушдёбанда ва дорои имконияти баланди густариш дар байни манбаъҳои барқароршавандаи энергия тасдиқ менамояд.



Расми 1.3. – Сохтори иқтидори муқарраршудаи ҷаҳонии манбаъҳои барқароршавандаи энергия аз рӯйи навъҳои истеҳсоли неру. Манбаъ: IRENA [7].

Энергетикаи обӣ (гидроэнергетика) ва энергетикаи бодӣ чи гунае, ки дар боло қайд гардид, гурӯҳи дуюми аз ҷиҳати аҳамият муҳимро ташкил дода, ҳам аз рӯйи нишондиҳандаҳои мутлақ ва ҳам нисбӣ мавқеи қариб баробарро ишғол менамоянд. Иқтидори муқарраршудаи онҳо мутаносибан 1296 ГВт ва 1291 ГВт-ро ташкил медиҳад, ки тақрибан ба 25 дарсади сохтори умумӣ барои ҳар яке мувофиқ аст. Чунин таносуб омезиши мутавозини захираҳои анъанавии энергетикаи обӣ ва технологияҳои босуръат рушдёбандаи энергетикаи бодиро дар тавозуни ҷаҳонии энергетикӣ инъикос менамоянд.

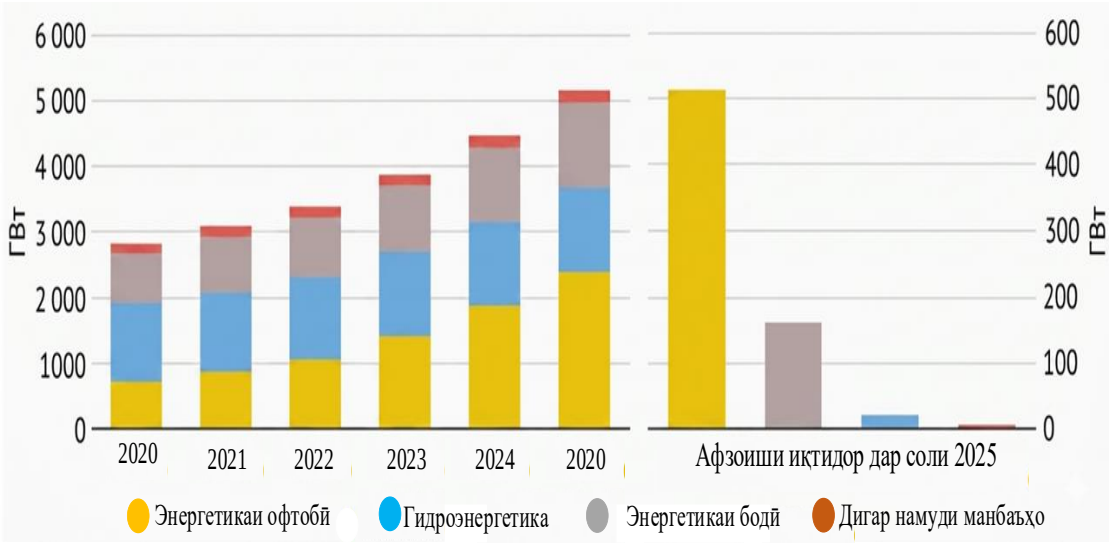
Ҳамин тавр, сохтори пешниҳодшуда дараҷаи баланди тамаркузи иқтидори муқарраршударо дар се бахши асоси энергетикаи офтобӣ, энергетикаи бодӣ ва энергетикаи обӣ нишон медиҳад, ки дар маҷмуъ тақрибан 97 дарсади иқтидори ҷаҳонии манбаъҳои барқароршавандаи энергияро дар бар мегиранд. Дар баробари ин, маҳз истеҳсоли неруи барқи офтобӣ ҳамчун омили асосии рушди соҳа баромад намуда, самти рушди минбаъдаи энергетикаи ҷаҳониро муайян месозад.

Дар расми 1.4 динамикаи афзоиш ва сохтори иқтидори муқарраршудаи ҷаҳонии манбаъҳои барқароршавандаи энергия дар давраи солҳои 2020-2025 нишон дода шудааст. Маводи графикӣ силсилаи вақтии иқтидори умумии муқарраршуда ва тақсимоти афзоиши солонаи иқтидорро аз рӯйи навъҳои технологияҳо дар бар гирифта, имкон медиҳад тағйироти миқдорӣ ва сохторӣ дар энергетикаи ҷаҳонӣ ба таври ҳамаҷониба арзёбӣ карда шаванд. Таҳлили динамика нишон медиҳад, ки тамоюли устувори афзоиш ташаккул ёфтааст. То соли 2025 иқтидори умумии муқарраршудаи манбаъҳои барқароршавандаи энергия аз 5000 ГВт зиёд гардида, суръат гирифтани гузариши ҷаҳонии энергетикӣ ва афзоиши ҳиссаи технологияҳои барқароршавандаро дар истеҳсоли неруи барқ дар ҷаҳон инъикос менамояд.

Аҳамияти махсусро сохтори афзоиши иқтидор дар соли 2025 дорад, ки дар он ҳаҷми умумии иқтидорҳои нави ба истифода додашуда ба 692 ГВт расида, баландтарин нишондиҳанда дар давраи мавриди таҳлил ба ҳисоб меравад. Дар баробари ин, ҳиссаи асосии афзоиши иқтидор ба энергетикаи офтобӣ рост меояд, ки тақрибан 511 ГВт иқтидори навро таъмин намуда, мавқеи онро ҳамчун омили асосии рушди манбаъҳои барқароршавандаи энергия МБЭ пурзур менамояд.

Бартарии истеҳсоли неруи барқи офтобӣ дар сохтори иқтидорҳои нави ба истифода додашуда аз афзоиши нақши низомҳои фотоэлектрикӣ дар ташаккули тавозуни энергетикӣ шаҳодат медиҳад. «Дар мачмуъ, энергетикаи офтобӣ ва энергетикаи бодӣ қисми асосии афзоиши иқтидори манбаъҳои барқароршавандаи энергияро таъмин намуда, аз гузариши энергетикаи ҷаҳонӣ

ба низомҳое, ки ҳиссаи баланди истеҳсоли неруи тағйирёбанда доранд, гувоҳи медиҳад» [27].

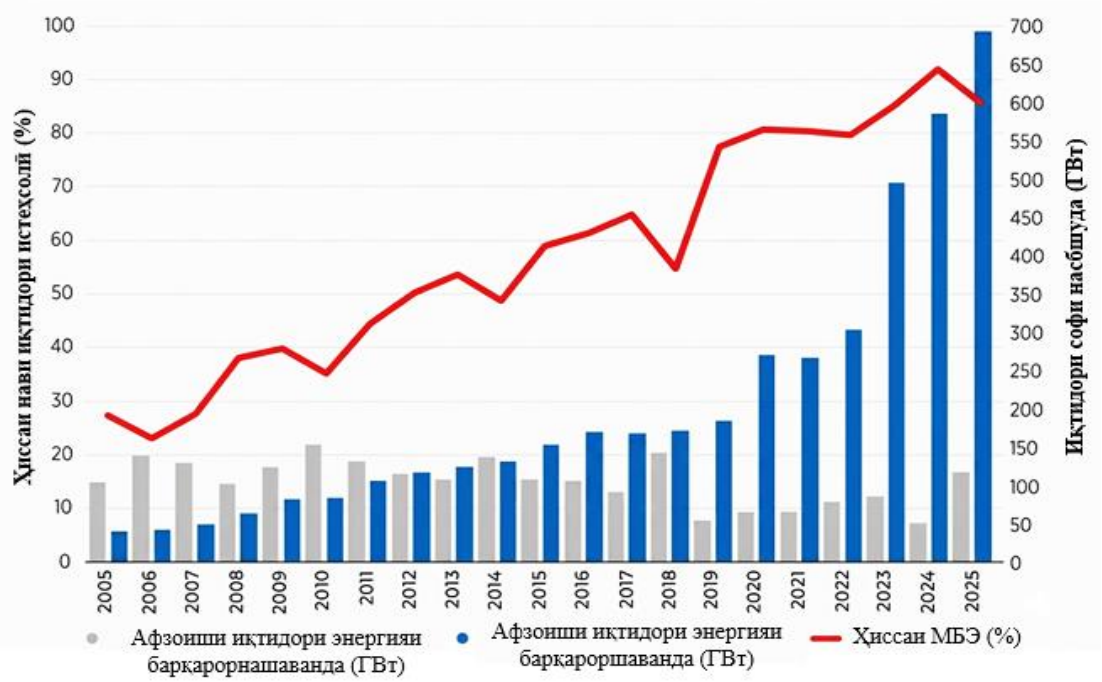


Расми 1.4. – Тағйирёбии иқтидори умумии МБЭ дар ҷаҳон, солҳои 2020-2025. Манбаъ: IRENA [7].

«Аз нуқтаи назари илмӣ, ин раванд барои масъалаҳои моделсозии низомҳои энергетикӣ аҳамияти калидӣ дорад, зеро афзоиши ҳиссаи истеҳсоли неруи барқи офтобӣ ба зиёд шудани ноустувории истеҳсоли неруи барқ оварда расонида, талаботро нисбат ба дақиқии пешгӯии реҷаҳои кори неругоҳҳои фотоэлектрикӣ баланд мебардорад» [8]. Дар чунин шароит истифодаи моделҳои математикии муносиб, ки таъсири омилҳои иқлимӣ ва истифодабариро ба инобат мегиранд, аҳамияти бештар пайдо мекунад. Ба чунин омилҳо, пеш аз ҳама, таъсири ҳарорат, тағйирёбии радиатсияи офтобӣ ва талафоти самаранокии модулҳои фотоэлектрикӣ дохил мешаванд.

«Ҳамин тавр, натиҷаҳои таҳлил нишон медиҳанд, ки рушди манбаъҳои барқароршавандаи энергия танҳо бо афзоиши иқтидорҳои муқарраршуда маҳдуд намегардад, балки бо дигаргунии сохтории низоми энергетикии ҷаҳон низ ҳамроҳ мебошад» [25, 27]. «Дар чунин шароити неруи барқи офтобӣ ба омили асосии рушди соҳа табдил ёфта, зарурати таҳия ва такмили усулҳои моделсозии неругоҳҳои офтобиро бо мақсади баланд бардоштани дақиқии арзёбии реҷаҳои кори онҳо муайян менамояд» [4, 25].

Дар расми 1.5 динамикаи бисёрсолаи ба истифода додани иқтидорҳои нави истеҳсоли неру дар электроэнергетикаи ҷаҳон дар давраи солҳои 2005-2025 нишон дода шудааст, ки имкон медиҳад қонуниятҳои асосии дигаргунии сохтории соҳа муайян гардида, миқёси гузариш ба манбаъҳои барқароршавандаи энергия арзёбӣ карда шавад.



Расми 1.5. – **Динамикаи ба кор даровардани иқтидорҳои нави энергетикӣ дар ҷаҳон аз ҳисоби МБЭ, солҳои 2005-2025. Манбаъ: IRENA [7].**

Таҳлили силсилаи вақтӣ нишон медиҳад, ки аз солҳои 2011-2012 дар рушди соҳа дигаргунии куллии сохторӣ ба вуҷуд омадааст. Маҳз дар ҳамин давра ҳаҷми иқтидорҳои нави ба истифода додашуда дар асоси манбаъҳои барқароршавандаи энергия ба таври устувор аз ҳаҷми иқтидорҳои нави истеҳсоли анъанавӣ зиёд гардид. Минбаъд ин фарқият пайваста афзоиш ёфта, то соли 2025 ба сатҳи назаррас расид. Дар натиҷа, ҳаҷми иқтидорҳои нави манбаъҳои барқароршавандаи энергия нисбат ба иқтидорҳое, ки бо истифода аз сӯзишвории истихроҷшаванда фаъолият менамоянд, чандин маротиба зиёд гардид.

Динамикаи ҳиссаи манбаъҳои барқароршавандаи энергия дар сохтори иқтидорҳои ҳар сол ба истифода додашуда низ ин тамоюлро тасдиқ менамояд.

Агар дар миёнаҳои солҳои 2000 ҳиссаи онҳо аз 30 дарсад зиёд набошад, пас дар солҳои 2024-2025 аз он 90 дарсад зиёд гардид. Ин омил нишон медиҳад, ки иқтидорҳои нави истеҳсоли неру амалан ба раванди декарбонизатсия (карбонзудоӣ) ворид шуда, афзалиятҳои сармоягузорӣ дар энергетикаи ҷаҳон ба таври назаррас тағйир ёфтаанд [2].

Ҳамзамон, дар соли 2025 ҳиссаи манбаъҳои барқароршавандаи энергия дар ҳаҷми умумии афзоиши иқтидорҳо нисбат ба соли 2024 каме коҳиш ёфта, аз 92 дарсад то 85,6 дарсад расид. Ин тағйирот ба афзоиши муваққатии ҳаҷми иқтидорҳои нави истеҳсолии анъанавӣ вобаста мебошад.

Бо вуҷуди коҳиш ёфтани нишондиҳандаи ҳиссавӣ, нишондиҳандаҳои мутлақи афзоиши иқтидорҳо динамикаи устувори мусбатро нишон медиҳанд.

Дар соли 2025 ҳаҷми умумии иқтидорҳои нави манбаъҳои барқароршавандаи энергия, ки ба истифода дода шудаанд, тақрибан ба 700 ГВт расид, ки баландтарин нишондиҳандаи таърихӣ ба ҳисоб рафта, аз тамоюли дарозмуддати рушди соҳа ба таври назаррас зиёд мебошад. Дар баробари ин, густариши манбаъҳои барқароршавандаи энергия хусусияти ҷаҳонӣ дорад. Саҳми асосиро Ҷумҳурии Мардумии Чин ва то андозае Иёлоти Муттаҳидаи Амрико таъмин менамоянд, аммо афзоиши иқтидорҳо дар аксарияти кишварҳои ҷаҳон низ ба қайд гирифта мешаванд.

Қобили зикр аст, ки дар баробари рушди босуръати манбаъҳои барқароршавандаи энергия, соли 2025 афзоиши кӯтоҳмуддати ҳаҷми иқтидорҳои нави манбаъҳои барқарорнашавандаи энергия низ мушоҳида гардид. Ҳаҷми чунин иқтидорҳо нисбат ба соли 2024 қариб ду маротиба зиёд шуд. Омилҳои асосии ин раванд Ҷумҳурии Мардумии Чин буд, ки дар он зиёда аз 100 ГВт иқтидорҳои нави истеҳсоли анъанавӣ ба истифода дода шудаанд. Аз ин миқдор тақрибан 81 дарсад ба неругоҳҳои ангиштсангӣ рост меояд.

Бо вуҷуди ин, дар дурнамои дарозмуддат ҳаҷми иқтидорҳои нави истеҳсоли неру дар асоси сӯзишвории истихроҷшаванда тамоюли коҳиш ва устуворшавиро дар сатҳи нисбатан паст нисбат ба даҳсолаҳои пешин нигоҳ медорад. Хусусан суръати рушди манбаъҳои барқароршавандаи энергия дар

давраи солҳои 2023-2025 ба таври назаррас афзоиш ёфта, аз ворид шудани соҳа ба марҳалаи рушди босуръат шаҳодат медиҳад. Дар маҷмуъ, маълумоти пешниҳодшуда тасдиқ менамояд, ки ҷорӣ намудани манбаъҳои барқароршавандаи энергия ҳамоно аз рушди истеҳсоли анъанвии неру пеш гузашта, заминаи ташаккули низоми муосири энергетикиро фароҳам меорад [16].

Ҳамин тариқ, сарфи назар аз баъзе тағйирот дар сохтори афзоиши солонаи иқтидорҳо, самти умумии рушди электроэнергетикаи ҷаҳон бо бартарии манбаъҳои барқароршавандаи энергия муайян карда мешавад.

Ҳамзамон, барои ноил шудан ба ҳадафҳои стратегии иқлимӣ, аз ҷумла зиёд намудани иқтидори умумии муқарраршудаи ҷаҳонии манбаъҳои барқароршавандаи энергия то зиёда аз 11 ТВт то соли 2030 (мувофиқи қарорҳои COP28), суръат бахшидани минбаъда ҷорӣ намудани онҳо ва густариши фаъолияти сармоягузорӣ дар ин бахш зарур мебошад.

Дар чунин шароит, афзоиши босуръати ҳиссаи неругоҳҳои офтобӣ дар тавозуни энергетикӣ зарурати истифодаи усулҳои муосири моделсозии кори онҳоро ба миён меорад, ки имкон медиҳанд тағйирёбии истеҳсоли неру ба инобат гирифта шуда, сатҳи эътимоднокӣ ва самаранокии низомҳои энергетикӣ баланд бардошта шавад [22].

1.2. Усулҳо ва асосҳои назариявии моделсозии неругоҳҳои барқи офтобӣ

«Дар таҳқиқоти [3-4] оварда шудааст, ки дар шароити афзоиши ҳиссаи неругоҳҳои офтобӣ дар сохтори истеҳсоли неруи барқ, истифодаи усулҳои муносиб ва дақиқи моделсозии математикӣ аҳамияти махсус пайдо менамояд» [3]. «Ин усулҳо имкон медиҳанд, ки ҳам хусусияти статистикии радиатсияи офтобӣ ва ҳам таъсири омилҳои истифодабарӣ ба самаранокии низомҳои фотоэлектрикӣ ба инобат гирифта шаванд» [3], [9], [22]. «Равишҳои муосири моделсозии неругоҳҳои офтобӣ ба чанд гурӯҳи асосии усулҳо такя мекунанд,

ки аз рӯйи дараҷаи тавсифот дақиқии моделсозӣ ва самти истифода аз якдигар фарқ менамоянд» [3], [83].

Моделҳои физикию математикӣ ба тавсифи равандҳои табдилёбии энергияи офтоб ба неруи барқ дар асоси муодилаҳое такя мекунанд, ки хусусиятҳои модулҳои фотоэлектрикӣ, вобастагии ҳароратӣ ва параметрҳои муҳити атрофро ба инобат мегиранд. Бартарии асосии ин равиш аз дақиқии баланд ва имконияти таҳлили муфассали кори низом иборат мебошад. Бо вуҷуди ин, истифодаи чунин моделҳо ҳаҷми зиёди маълумоти ибтидоӣ ва захираҳои назарраси ҳисоббарориро талаб мекунад [10-11].

Моделҳои эмпирикӣ ва оморӣ ба коркарди маълумоти таҷрибавӣ ва сохтани вобастагиҳои регрессионӣ байни параметрҳои воридшаванда (радиатсияи офтобӣ ва ҳарорати муҳити атроф) асос меёбанд. Ин моделҳо бо содагии татбиқ ва талаботи нисбатан кам ба захираҳои ҳисоббарорӣ фарқ мекунанд. Аммо дақиқии онҳо то дараҷаи зиёд аз сифат ва намояндагии маълумоти ибтидоӣ вобаста мебошад [37].

«Таҳлили кори илмӣ [4] ва [37] нишон медиҳад, ки моделҳои тақлидӣ имкон медиҳанд, ки фаъолияти неругоҳи офтобӣ бо дарназардошти динамикаи тағйирёбии шароити иқлимӣ ва реҷаҳои бори электрикӣ дар тӯли вақт таҳдид карда шавад». «Ин равиш ҳангоми пешгӯии истеҳсоли неруи барқ ва таҳлили реҷаҳои кори низомҳои энергетикӣ, ки ҳиссаи баланди манбаъҳои барқароршавандаи энергия доранд, васеъ истифода мешавад» [27].

Моделҳои гибридӣ (омехта) маҷмуи усулҳои физикию математикӣ ва омориро дар бар гирифта, имконият медиҳанд, ки дақиқии моделсозӣ тавассути ба инобат гирифтани ҳам қонуниятҳои физикӣ ва ҳам вобастагиҳои таҷрибавӣ баланд бардошта шавад [12]. Чунин моделҳо дар шароити номуайянии параметрҳои иқлимӣ ва маҳдуд будани маълумоти ибтидоӣ аз ҳама ояндадор ба ҳисоб мераванд. Интихоби усули мушаххаси моделсозӣ аз ҳадафи таҳқиқот, дастрасии маълумоти ибтидоӣ ва дараҷаи дақиқии зарурии натиҷаҳо вобаста мебошад. Дар баробари ин, ба инобат гирифтани хусусиятҳои иқлими минтақа, аз ҷумла сатҳи радиатсия, тағйирёбии ҳарорат

ва ифлосшавии сатҳи модулҳои фотоэлектрикӣ, ки ба самаранокии истеҳсоли неруи барқ таъсири назаррас мерасонанд, аҳамияти махсус дорад [13-14]. Бо мақсади баланд бардоштани возеҳияти таҳлили мақоисавии усулҳои моделсозӣ, дар ҷадвали 1.1 тавсифи ҷамъбастии онҳо оварда шудааст.

Ҷадвали 1.1. – Таҳлили муқоисавии усулҳои моделсозии неругоҳҳои фотоэлектрикӣ [3], [83]

Усулҳои моделсозӣ	Бартариятҳо	Маҳдудиятҳо	Доираи татбиқ
Физикию математическӣ	Дақиқии баланд, баҳисобгирии равандҳои физикӣ	Маълумоти муфассал ва захираҳои ҳисобиро талаб мекунад	Тадқиқоти илмӣ, оптимизатсияи параметрҳои неругоҳи офтобӣ
Оморӣ (статистикӣ)	Осонии татбиқ, харочоти пасти ҳисоббарорӣ	Вобастагӣ аз сифати маълумот	Арзёбиҳои фаврӣ ва пешгӯиҳо
Тақлидӣ (имитатсионӣ)	Баҳисобгирии динамикаи вақт	Мушкилии танзими моделҳо	Таҳлили реҷаҳои корӣ, пешгӯии истеҳсоли неру
Гибридӣ (омехта)	Дақиқии баланд, мутобиқшавӣ	Мураккабии татбиқ	Таҳқиқоти муосир, низомҳои зеҳнӣ

«Ҳамин тавр, усулҳои моделсозӣ заминаи назариявиро барои таҳлили самаранокӣ ва эътимоднокии неругоҳҳои офтобӣ фароҳам меоранд» [27].

Истифодаи онҳо имкон медиҳад, ки таъсири омилҳои асосӣ, аз ҷумла шароити иқлимӣ ва хусусиятҳои истифодабарӣ, ба назар гирифта шавад, ки ин барои баланд бардоштани дақиқии пешгӯии истеҳсоли неруи барқ шарти зарурӣ ба ҳисоб меравад [27]. Сохтори иерархии моделсозӣ дар расми 1.6 нишон дода шудааст. Расми 1.6 сохтори иерархии моделсозии неругоҳи барқи офтобиро аз сатҳи алоҳидаи элементҳои фотоэлектрикӣ (ЭФЭ) то сатҳи ҳамгироии (ҳамоҳангӣ, якҷоя) он бо низоми энергетикӣ инъикос менамояд.

«Чунин равиш ба методҳои муосири таҳлили низомӣ мувофиқат намуда, имкон медиҳад таъсири ҳар як сатҳи моделсозӣ ба самаранокии умумии неругоҳ ба назар гирифта шавад» [83].



Расми 1.6. – Сохтори иерархии моделсозии неругоҳи барқи офтобӣ

«Ҳамин тариқ, усулҳои моделсозӣ заминаи назариявиро барои таҳлили самаранокӣ ва эътимоднокии неругоҳҳои барқи офтобӣ фароҳам меоранд» [27]. Истифодаи онҳо имкон медиҳад, ки таъсири омилҳои асосӣ, аз ҷумла шароити иқлимӣ ва хусусиятҳои истифодабарӣ, ба назар гирифта шуда, баланд бардоштани дақиқии пешгӯии истеҳсоли неруи барқ таъмин карда шавад [14].

Дар амал татбиқ шудани усуслҳои баррасишуда бо истифода аз воситаҳои махсуси барномавии моделсозӣ амалӣ карда мешаванд. Таҳлили ин воситаҳои барномавӣ дар зербоби навбатӣ пешниҳод мегарданд.

1.2.1. Шарҳи мухтасари бастаҳои барномавӣ барои моделсозии неругоҳҳои барқи офтобӣ

«Лоиҳакашӣ ва таҳқиқи муосири низомҳои фотоэлектрикӣ истифодаи воситаҳои махсуси барномавиро талаб менамояд, ки моделсозии мувофиқи раванди тавлиди неруи барқ, арзёбии самаранокии энергетикӣ, таҳлили

талафот ва нишондиҳандаҳои иқтисодиро таъмин мекунанд» [41]. «Рушди усулҳои ҳисоббарорӣ боиси пайдоиши доираи васеи бастаҳои барномавӣ гардидааст, ки аз рӯйи таъинот, соҳаи истифода, алгоритмҳои моделсозӣ ва интерфейси корбар аз ҳамдигар фарқ мекунанд» [48].

Воситаҳои барномавии моделсозии неругоҳҳои офтобӣ дар баробари мураккаб гардидани масъалаҳои муҳандисӣ такмил ёфтаанд. «Агар воситаҳои ибтидоӣ асосан бо ҳисобҳои содаи истеҳсоли солонаи неруи барқ маҳдуд мешуданд, пас бастаҳои барномаҳои муосир имкон медиҳанд, ки равандҳои динамикӣ моделсозӣ гардида, таъсири ҳарорат, сояафканӣ, талафоти барқ ва нишондиҳандаҳои иқтисодӣ ба назар гирифта шаванд» [83]. Ин махсусан ҳангоми лоиҳакашии неругоҳҳои бузурги офтобӣ аҳамияти муҳим дорад, зеро ҳатто хатогиҳои хурд дар ҳисобҳо метавонанд ба талафоти зиёди молиявӣ оварда расонанд [16]. Мақсади баррасии мазкур ба низом даровардан ва арзёбии иқтисодии воситаҳои муосири барномавӣ барои моделсозии низомҳои фотоэлектрикӣ, муайян намудани ҷиҳатҳои қавӣ ва заифи онҳо, инчунин пешниҳоди тавсияҳои амалӣ оид ба истифодаи онҳо дар таҳқиқоти илмӣ ва муҳандисӣ мебошад.

Бастаҳои барномаҳои асосӣ, барои моделсозии неругоҳҳои барқи офтобӣ дар зер оварда шудаанд:

PVsyst. Дар байни востаҳои барномавии муҳандисии бештар истифодашаванд барномаи PVsyst-ро махсус қайд кардан зарур аст. Ин воситаи барномавӣ, ҳамчун стандарти соҳавӣ ҳангоми лоиҳакашии низомҳои фотоэлектрикӣ [83] ба ҳисоб рафта, ҳам дар таҳқиқоти илмӣ ва ҳам дар лоиҳакашии саноатӣ васеъ истифода бурда мешавад. Афзалиятҳои асосии он аз дақиқии баланди ҳисобҳо ва мавҷудияти пойгоҳи васеи маълумот оид ба модулҳои офтобӣ ва инверторҳо иборат мебошанд. Моделсозӣ дар барномаи PVsyst ба моделҳои физикӣ асос ёфта, таъсири ҳарорат, радиатсияи офтобӣ ва талафоти неруи барқро ба назар мегирад, ки дар натиҷа имкони ба даст овардани пешгӯиҳои воқеии истеҳсоли неруи барқ фароҳам оварда мешавад [17].

PVSOL. Воситаи дигари муҳандисӣ, барномаи PVSOL мебошад, ки бо имкониятҳои васеи моделсозии сеандоза фарқ мекунад. “Имконияти тасвири визуалии объектҳо ва таҳлили сояафканӣ PVSOL-ро барои лоиҳакашии низомҳои фотоэлектрикии дар боми биноҳо насбшуда ё дар шароити инфрасохтори мураккаб ҷойгиршаванда қулай мегардонад” [49]. Модели сеандоза имкон медиҳад, ки таъсири объектҳои атроф ба истеҳсоли неруи барқ ба назар гирифта шавад, ки ин ҳангоми лоиҳакашии низомҳои фотоэлектрикӣ тақсимшуда аҳамияти махсус дорад [18, 83].

HelioScope. Рушди технологияҳои онлайнӣ боиси пайдоиши воситаҳои насли нав, аз ҷумла HelioScope, гардид. Бартарии платформаҳои онлайнӣ (абрӣ) дар дастрасӣ ва содагии истифодаи онҳо ифода меёбад. Истифодабаранда метавонад тавассути браузери интернетӣ бо барнома кор кунад, ки ин зарурати насби барномаи (нармафзори) мураккабро бартарф менамояд. HelioScope имконияти зуд арзёбӣ намудани параметрҳои энергетикӣ ва визуалӣ намудани лоиҳаҳоро фароҳам меорад, аммо имкониятҳои он дар самти таҳлили техникию иқтисодӣ маҳдуд мебошад [19].

System Advisor Model (SAM). Таҳлили техникию иқтисодӣ марҳалаи муҳими лоиҳакашии неругоҳҳои офтобӣ ба ҳисоб меравад, зеро самаранокии лоиҳа на танҳо аз нишондиҳандаҳои энергетикӣ, балки аз ҷанбаҳои молиявӣ низ вобаста мебошад. Ба ин мақсад барномаи System Advisor Model (SAM) истифода мешавад, ки имкон медиҳад чунин нишондиҳандаҳо, аз қабили арзиши холиси ҷорӣ, муҳлати бозгашти сармоягузорӣ ва меъёри дохилии даромаднокӣ ҳисоб карда шаванд. Ин барнома барои арзёбии ҷолибияти сармоягузории лоиҳаҳо аҳамияти муҳим дорад [20].

HOMER. Низомҳои гибридии (омехтаи) энергетикӣ, ки модулҳои офтобӣ, аккумуляторҳои дизелиро дар бар мегиранд, истифодаи усулҳои махсуси оптимизатсияро талаб менамоянд. Яке аз воситаҳои бештар истифодашаванда барои ҳалли чунин масъалаҳо барномаи HOMER мебошад. «Ин барномаи компютерӣ дар кори илмии [4] овардашуда, имкон медиҳад, ки конфигуратсияҳои гуногуни низомҳои энергетикӣ таҳлил гардида, аз нуқтаи

назари эътимоднокӣ ва самаранокии иқтисодӣ қарорҳои оптималӣ интихоб карда шаванд» [4], [21].

PVGIS. Барои арзёбии пешакии иқтидори (потенсиали) офтобӣ ва таҳлили маълумоти иқлимӣ аз хидмати онлайнии PVGIS низ васеъ истифода бурда мешавад, ки дастрасӣ ба пойгоҳҳои ҷаҳонии маълумот оид ба радиатсияи офтобиро таъмин менамояд. Ҳизмати онлайнӣ (онлайн-сервис) имкон медиҳад, ки истеҳсоли эҳтимолии неруи барқ дар минтақаҳои гуногуни ҷуғрофӣ арзёбӣ карда шавад. Ин имконият махсусан дар марҳалаи таҳлили ибтидоии лоиҳа муфид мебошад [14]. Бо вуҷуди ин, хидмати онлайнии PVGIS барои лоиҳакашии муфассал пешбинӣ нашуда, конфигуратсияҳои мураккаби низомҳои фотоэлектрикиро ба назар намегирад.

pvlib Python. Дар таҳқиқоти илмӣ китобхонаи pvlib барои забони барномасозии Python фаъолона истифода мешавад. Бар хилофи бастаҳои омодаи муҳандисӣ, pvlib ба муҳаққиқ имконияти васеъ ва чандириро барои таҳияи алгоритмҳо ва моделҳои худ фароҳам меорад. Рамзи кушодаи барнома имкон медиҳад, ки китобхона ба масъалаҳои мушаххаси таҳқиқотӣ мутобиқ карда шуда, бо дигар воситаҳои ҳисоббарорӣ ҳамгиро карда шавад [22].

Таҳлили муқоисавии воситаҳои барномавии баррасишуда нишон медиҳад, ки интихоби воситаи моделсозӣ аз ҳадафи таҳқиқот вобаста мебошад. Барои лоиҳакашии муҳандисии системаҳои калони фотоэлектрикӣ истифода барномаи PVsyst мувофиқи мақсад буда, он дақиқӣ ва эътимоднокии баланди ҳисобҳоро таъмин менамояд.

Агар лоиҳа ба таҳлили геометрияи мураккаби объектҳо алоқаманд бошад, барномаи PV*SOL бартарӣ дошта, имкониятҳои васеи моделсозии сеандозаро пешниҳод менамояд.

Дар ин кори диссертатсионӣ дар боби баъдина барои моделсозии неругоҳи барқи фотоэлектрикии автономӣ бо иқтидори 10 кВт барномаи PVsyst интихоб шуда, ба ҳадафҳои гузошташудаи кор мувофиқ мебошад.

Натиҷаҳои моделсозӣ бо истифодаи барномаи PVsyst дар боби сеюми кори диссертатсионӣ пешниҳод карда мешавад.

Ҷадвали 1.2. – **Таҳлили муқоисавии воситаҳои барномавии моделсозии неругоҳҳои фотоэлектрикӣ**

Барномаҳои комплексӣ манбаъ	**Таъинот ва соҳаи истифодабарӣ**	**Бартариятҳои калидӣ ва алгоритмҳои дар барнома пешбинишуда**	**Махдудиятҳо ва камбудиҳои усули ҳисобкунӣ**
PVGIS [14]	Таҳлили ибтидоии пеш аз сармоягузор, скрининги иқлимӣ	Дастрасии кушодаи вебӣ ба пойгоҳҳои додаҳои тасдиқшудаи моҳворавии метео радиатсия барои ҳар гуна координатаҳо	Танҳо вазифаи арзёбиро иҷро мекунад; воситаҳои пурраи лоиҳакашии неругоҳҳои барқи офтобӣ комилан мавҷуд нестанд
PVsyst [17, 83]	Лоиҳакашии неругоҳҳои барқи офтобии бузурги ба шабака пайвастшуда, аудити тиҷоратии истеҳсоли неруи барқ	Стандарти саноатӣ; баҳисобгирии дақиқи физикаи нимноқилҳо; китобхонаи васеи таҷҳизот	Набудани воситаҳои мукаммали дарунсохтаи моделсозии 3D; арзиши баланди иҷозатномаи истифодабарӣ
PVSOL [18, 83]	Ҳисобкунии неругоҳҳои барқи офтобии тақсимшудаи дар меъмории биноҳо ҳамгирошуда ва болои бом ҷойгиршуда	Муҳаррики пуриқтидори 3D; ҳисобкунии дақиқи динамикаи сояҳо аз унсурҳои биноҳои шаҳрӣ	Талаботи баланд ба ҳисоббарории компютери шахсӣ ҳангоми тасвирсозии саҳнаҳои мураккаб
HelioScope [19]	Лоиҳакашии фаврии эскизӣ; арзёбии экспресии иқтидори майдонҳо	Кросплатформавӣ; кор тавассути интерфейси вебии абрӣ; суръати баланди тасвирсозии топологияи стрингҳо	Содакуниҳои назаррас ҳангоми ҳисобкунии талафоти ғайристандартии омикӣ; модули молиявии маҳдудшуда
(SAM) System Advisor Model [20]	Таҳлили ҳамаҷонибаи техникию иқтисодӣ ва аудити хавфҳои сармоягузорӣ	Ядрои пуриқтидори ҳисоббарорӣ барои моделсозии молиявӣ (NPV, IRR, LCOE);	Остонаи баланди вуруд; воридкунии дастии ҳаҷми зиёди доимиҳои ибтидоии муҳандисиро талаб мекунад
HOMER Pro [21]	Оптимизатсияи сохтори шабакаҳои хурди мустақил ва гибридии барқӣ (Microgrids)	Алгоритмҳои оптимизатсияи бисермеъёрии стохастикии системаи таркибӣ (PV+БАК+ДГД)	Аслан барои лоиҳакашии муфассали нақшавӣ ва сеандозаи неругоҳи барқи офтобӣ пешбинӣ нашудааст

Дар маҷмуъ, рушди воситаҳои барномавии моделсозии неругоҳҳои барқи офтобӣ тамоюли ҳамгироии усулҳои муҳандисӣ, иқтисодӣ ва ҳисоббарориро инъикос менамояд. «Таҳқиқоти муосир дар соҳаи энергетикаи офтобӣ бештар ба истифодаи равиши комплексӣ такя мекунад, ки моделсозии физикӣ, таҳлили додаҳои иқлимӣ ва оптимизатсияи қарорҳои лоиҳавиро дар бар мегирад» [27]. Ин равиш имкон медиҳад, ки дақиқии пешгӯиҳо баланд бардошта, хавфҳо коҳиш дода шуда, самаранокии иқтисодии лоиҳаҳои фотоэлектрикӣ беҳтар карда шавад [15-16].

1.3. Баҳисобгирии таъсири омилҳои иқлимӣ ҳангоми моделсозии кори неругоҳҳои барқи офтобӣ

Муқаррароти умумӣ ва аҳамияти ба назар гирифтани омилҳои иқлимӣ. “Самаранокии фаъолияти неругоҳҳои барқи офтобӣ (НБОФ) ба андозаи зиёд аз шароити иқлими истифода вобаста буда, ин шароит ҳам сатҳи радиатсияи офтобии воридшавандаро ва ҳам низоми ҳароратии модулҳои фотоэлектрикиро муайян менамояд” [27]. Бар хилофи манбаъҳои барқароршавандаи энергия, истеҳсоли неруи барқ аз ҷониби НБОФ хусусияти возеҳи стохастикӣ дошта, аз муҳити беруна сахт вобастагӣ дорад, ки зарурати истифодаи моделҳои мутобиқшавандаро ҳангоми таҳлил ва пешгӯии фаъолияти онҳо ба миён меорад [23], [24].

Ҳангоми моделсозии НБОФ ба таври дуруст ба назар гирифтани омилҳои иқлимӣ аҳамияти калидӣ дорад, зеро маҳз онҳо истеҳсоли воқеии неруи барқ ва сатҳи дуршавии параметрҳои истифодабариро аз қиматҳои номиналӣ муайян менамоянд [32]. Параметрҳои иқлимӣ ҳам тағйирёбии тасодуфӣ ва ҳам тағйирёбии равшани мавсимӣ доранд, ки истифодаи маҷмуи усулҳои детерминистӣ ва эҳтимолиятии моделсозиро талаб мекунад [25].

Ба қатори омилҳои асосии иқлимие, ки ба истеҳсоли неруи барқ таъсир мерасонанд, радиатсияи умумии офтобӣ, ҳарорати муҳити атроф, суръати бод (шамол), абрнокӣ, намнокӣ, инчунин консентратсияи зарраҳои аэрозолӣ дар атмосфера дохил мешаванд. Таъсири маҷмуи онҳо самаранокии энергетикии

низомҳои фотоэлектрикӣ, сатҳи талафот ва дараҷаи дуршавии параметрҳоро аз хусусиятҳои ҳисобӣ муайян менамояд, ки ин ҳангоми лоиҳакашӣ ва истифодаи неругоҳҳои барқи офтобӣ дар шароити хусусиятҳои иқлими минтақавӣ аҳамияти махсус дорад [26-35].

Омилҳои асосии иқлимӣ ва таъсири онҳо ба истеҳсоли неруи барқ аз НБОФ:

– *Радиатсияи офтобӣ.*

Радиатсияи офтобӣ манбаи аввалияи энергетикӣ барои низомҳои фотоэлектрикӣ буда, сатҳи истеҳсоли неруи барқро бевосита муайян менамояд. Тағйирёбии он аз арзи ҷуғрофӣ, мавсимият ва шароити атмосфера вобаста аст [36-37]. Аз ҷиҳати математикӣ зичии иқтидори радиатсияи офтобӣ дар сатҳи панелро метавон чунин ифода кард:

$$G = G_b + G_d + G_r \qquad (1.1)$$

Дар ин ҷо:

– G – инсолятсияи умумии офтобӣ, Вт/м^2;

– G_b – инсолятсияи мустақими офтобӣ, Вт/м^2;

– G_d – инсолятсияи дифузионии офтобӣ, Вт/м^2;

– G_r – ҷузъи инъикосшудаи радиатсияи офтобӣ, Вт/м^2.

– *Тавсифи математикии реҷаи ҳароратӣ.*

Ҳангоми баланд шудани ҳарорати сатҳи модули офтобӣ аз 45 ^{o}C пастшавии босуръати шиддати кори бебор мушоҳида мешавад, ки боиси ҷойивазшавии нуқтаи корӣ ба самти қиматҳои камтари иқтидор мегардад.

Мувофиқи қонуниятҳои физикаи нимноқилҳо, баланд шудани ҳарорат боиси афзоиши ҷараёни торикӣ ва коҳиш ёфтани шиддати кори бебор мегардад.

Ҳангоми баланд шудани ҳарорат, зариби (коэффисент) кори фоиданок (ЗКФ) коҳиш меёбад, ки ин барои минтақаҳои дорои иқлими гарм, аз ҷумла Осиёи Марказӣ, аҳамияти махсусро касб менамояд [38].

– *Суръати бод (шамол), абрнокӣ ва омилҳои атмосферӣ.*

Суръати бод ба таври ғайримустақим таъсир расонида, ҳарорати модулҳоро тавассути хунуккунии конвективӣ коҳиш медиҳад. Дар натиҷа талафоти ҳароратӣ қисман ҷуброн карда мешавад. Абрнокӣ сатҳи радиатсияи мустақимро паст карда, ҳиссаи ҷузъи диффузияро зиёд менамояд. Ифлосшавии ғуборӣ ва аэрозолӣ, ки барои минтақаҳои хушк хос аст, инчунин метавонад самаранокии истеҳсоли неруи баркро ба таври назаррас коҳиш диҳад [26, 39].

«Таҳлили кори илмӣ [4] нишон дод, ки барои шароити шаҳри Бохтар (собиқ Қӯрғонтеппа) ҳангоми моделсозии неругоҳи фотоэлектрикӣ метавон параметрҳои миёнаи мавсимии иқлимиро истифода бурд, ки ба минтақаҳои ҷанубии Ҷумҳурии Тоҷикистон хос мебошанд» [40]:

Ҷадвали 1.3. – Параметрҳои иқлими минтақаи истифодашаванда ҳамчун объекти таҳқиқотӣ [4].

Параметрҳо	Дар фасли зимистон	Дар фасли баҳор	Дар фасли тобистон	Дар фасли тирамоҳ
Радиатсия (кВт·ч/м^2)	2,5-3,2	4,5-5,5	6,5-7,5	3,5-4,5
Ҳарорат (^{o}C)	8-2	12-20	28-38	15-25
Бод шамол (м/с)	1,5-2,5	2,0-3,0	2,5-3,0	1,5-2,5

Тағйирёбии мавсимии истеҳсоли неруи барқи неругоҳҳои фотоэлектрикӣ бо тағйирёбии кунҷи афтиши нурҳои офтоб, давомнокии рӯзи равшан ва реҷаи ҳароратии муҳити атроф алоқаманд мебошад. Дар фасли тобистон ҳангоми баландтарин сатҳи радиатсияи офтобӣ ҳамзамон коҳишёбии ЗКФ-и модулҳои фотоэлектрикӣ дар натиҷаи аз ҳад зиёд гармшавӣ мушоҳида мешавад, дар ҳоле ки дар фасли зимистон истеҳсоли неруи барқ аз сабаби коҳишёбии радиатсияи офтобӣ маҳдуд мегардад. Фаслҳои гузариш бо шароити нисбатан устувори истифодабарӣ тавсиф мешаванд, ки инро натиҷаҳои як қатор таҳқиқот тасдиқ менамоянд [41-45].

– Моделсозии талафот аз ифлосшавӣ ва боришоти атмосферӣ.

«Моделсозии талафоти неругоҳҳои фотоэлектрикӣ, ки дар натиҷаи ифлосшавии сатҳи модулҳои фотоэлектрикӣ ва таъсири боришоти атмосферӣ ба вуҷуд меоянд, яке аз ҷузъҳои муҳими баланд бардоштани дақиқии пешгӯии

истеҳсоли неруи барқ ба ҳисоб меравад» [26]. «Дар шароити воқеии истифодабарӣ, махсусан дар минтақаҳои ҷанубии дорои чангу ғуборолудии баланд ва давраҳои тӯлонии хушксолӣ, ин омилҳо ба самаранокии энергетикии дастгоҳҳои офтобӣ таъсири назаррас мерасонанд» [26], [46-47].

«Дар ҷараёни истифодабарӣ дар сатҳи модулҳои фотоэлектрикӣ тадриҷан ҷамъшавии заррачаҳои ғуборӣ ва аэрозолӣ ба амал меояд, ки боиси коҳиш ёфтани гузарандагии радиатсияи офтобӣ ва кам шудани иқтиодори истеҳсолӣ мегардад» [3], [25]. Барои тавсифи миқдории ин таъсир зариби ифлосшавӣ ҷорӣ карда мешавад, ки коҳиши нисбии иқтидорро инъикос менамояд:

$$P_{eff}(t) = P_0(t) \cdot (1 - L_s(t)) \quad (1.2)$$

Дар ин ҷо:

– $P_{eff}(t)$ – иқтидори воқеии неругоҳи фотоэлектрикӣ бо дарназардошти ифлосшавӣ;

– $P_0(t)$ – иқтидор ҳангоми тоза будани сатҳи модули офтобӣ;

– $L_s(t)$ – талафоти нисбӣ аз ифлосшавӣ.

Динамикаи ҷамъшавии ифлосиҳоро метавон дар шакли вобастагии хаттӣ ифода намуд [49].

$$L_s(t) = k \cdot t \quad (1.3)$$

Дар ин ҷо (k) – коэффисенти суръати ифлосшавӣ (вобаста ба шароити иқлимӣ), (t) – вақти истифодабарӣ бе тоза кардани сатҳи модул мебошад.

Дар моделҳои дақиқтар вобастагии экспоненсиалӣ истифода мешавад, ки сершавии қабати ифлосиҳоро ба назар мегирад [50]:

$$L_s(t) = L_{\max} \cdot (1 - e^{-kt}) \quad (1.4)$$

Ин ҷо L_{max} – сатҳи ниҳоии ифлосшавӣ мебошад.

Боришоти атмосферӣ ба ҳолати сатҳи модулҳо таъсир расонида, тоза шудани қисман ё пурраи онҳоро таъмин мекунад. Ин равандро тавассути коэффисенти барқароршавӣ ба назар гирифтан мумкин аст [45]:

$$L_s(t^+) = L_s(t^-) \cdot (1 - \eta_{rain}) \quad (1.5)$$

Дар ин ҷо:

– $L_s(t^-)$ – сатҳи ифлосшавӣ то боридани боришот;

– $L_s(t^+)$ – сатҳи ифлосшавӣ пас аз тоза шудан;

– η_{rain} – коэффисенти тозакунӣ (0-1), ки аз шиддатнокии боришот вобаста мебошад.

Бо дарназардошти омилҳои зикршуда, модели математикии ниҳоии иқтидори истеҳсолии неругоҳи фотоэлектрикӣ дар шакли зерин ифода карда мешавад:

$$P(t) = P_{nom} \cdot \frac{G(t)}{G_{STC}} \cdot [1 + \gamma(T_c(t) - T_{ref})] \cdot (1 - L_s(t)) \quad (1.6)$$

Дар ин ҷо:

– $P_{ном}$ – иқтидори номиналии неругоҳи фотоэлектрикӣ;

– $G(t)$ – радиатсияи ҷории офтобӣ;

– G_{STC} – радиатсияи офтобӣ дар шароити стандартии санҷишӣ;

– γ – зариби ҳароратии иқтидор;

– $T_c(t)$ – ҳарорати элементи фотоэлектрикӣ;

– T_{reff} – ҳарорати стандартӣ (одатан 25 ºC);

– $L_s(t)$ – сатҳи ифлосшавии ҷорӣ.

Ҳамин тавр, дар доираи моделсозии математикӣ сатҳи ифлосшавӣ ҳамчун функсияи вақт баррасӣ карда мешавад, ки зери таъсири равандҳои ҷамъшавии ифлосиҳо ва ҳолатҳои тозашавии табиӣ тағйир меёбад. Ин имкон медиҳад, ки на танҳо параметрҳои иқлимӣ (радиатсияи офтобӣ ва ҳарорат), балки ҳолати сатҳи модулҳо низ ба назар гирифта шавад, ки он бевосита ба самаранокии табдилдиҳии энергия таъсир мерасонад [51].

Аҳамияти амалии равиши пешниҳодшуда аз баланд бардоштани дақиқии пешгӯии истеҳсоли неруи барқ ва фароҳам овардани имконияти оптимизатсияи чорабиниҳои истифодабарӣ иборат мебошад. Аз ҷумла, дар

асоси вобастагиҳои бадастомада метавон даврияти оқилонаи тоза кардани модулҳои фотоэлектрикиро муайян намуд, ки талавотро ҳадди ақал расонида, самаранокии умумии фаъолияти неругоҳи фотоэлектрикиро баланд мебардорад [52].

Ба моделҳои фаъолияти неругоҳи фотоэлектрикӣ ворид намудани параметрҳое, ки ифлосшавӣ ва ҷуброни қисмии онро аз ҳисоби боришоти атмосферӣ тавсиф менамоянд, шарти зарурии ташаккули пешгӯиҳои мувофиқи энергетикӣ ва баланд бардоштани эътимоднокии истифодаи неругоҳи фотоэлектрикӣ дар шароити мушаххаси иқлимӣ ба ҳисоб меравад [53].

Ҳамин тавр, шароити иқлимӣ маҷмуи параметрҳои бо ҳам алоқамандро ташкил медиҳад, ки иқтидори энергетикии неругоҳи фотоэлектрикиро муайян менамоянд. «Дар байни ин омилҳо ҳарорати муҳити атроф ҷойи махсусро ишғол намуда, ба самаранокии табдил додани энергияи офтоб ба неруи барқ таъсири бештар ва мустақим мерасонад» [83]. Аз ин рӯ, таъсири ҳароратро алоҳида ва муфассалтар баррасӣ намудан мувофиқи мақсади кори диссертатсионӣ пешниҳодшуда мебошад.

1.4. Баҳисобгирии таъсири ҳарорат ҳангоми моделсозии низомҳои фотоэлектрикӣ

«Ҳарорати муҳити атроф яке аз омилҳои асосии иқлимӣ ба ҳисоб меравад, ки самаранокии фаъолияти неругоҳҳои фотоэлектрикро муайян мекунад. Бар хилофи дигар параметрҳои муҳити иқлимӣ, таъсири ҳарорат ба хусусиятҳои электрикии модулҳои фотоэлектрикӣ бевосита таъсир расонида, шиддат, иқтидор ва зариби кори фоиданоки онҳоро фаро мегирад» [26].

Барои ҳисоб намудани талафоти ҳароратӣ дар доираи таҳлили таҷрибавӣ вобастагии қаблан баррасишудаи ислоҳи ҳароратии иқтидор истифода карда шуд [54]. Баланд шудани ҳарорати модулҳои фотоэлектрикӣ боиси коҳиш ёфтани самаранокии энергетикии онҳо мегардад. Ин ҳолат бо равандҳои физикӣ дар сохтори нимноқилӣ, аз ҷумла танг шудани паҳнои минтақаи

манъшуда ва зиёд шудани муқовимати дохилӣ, вобаста аст. Дар натиҷа шиддати кори бебор коҳиш ёфта, дар пайи он иқтидори баромадии неругоҳ низ кам мегардад [55].

Дар расми 1.7 динамикаи тағйирёбии шиддатнокии радиатсияи офтобӣ ва каҷравии ҳарорати модули фотоэлектрикӣ, ки бо он вобастагии ҳамбастагӣ дорад, дар давоми рӯзи равшан нишон дода шудааст. Таҳлили вобастагиҳои пешниҳодшуда имкон медиҳад, ки як қатор ҷанбаҳои муҳими муайянкунандаи дақиқии моделсозии системаҳо ҷудо карда шаванд:

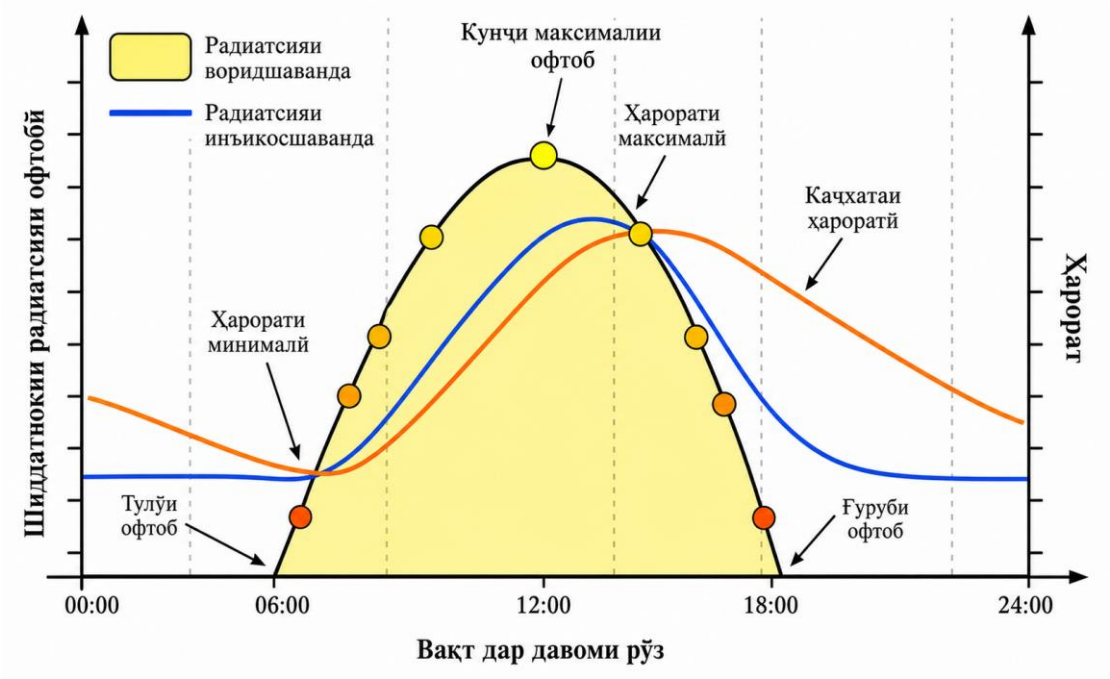
Гистрезеси ҳароратӣ: График таъсири инерсияи ҳароратии системаро ба таври возеҳ нишон медиҳад. Қимати максималии ҳарорати модул на дар лаҳзаи баландтарин сатҳи радиатсияи офтобӣ (нисфирӯзии астраномӣ), балки бо фосилаи муайяни вақт нисбат ба он ба даст меояд. Ин ҷойивазшавии фазавӣ бо ҷамъшавии энергияи дохилӣ дар маводи панел ва суръати ниҳоии хориҷшавии гармӣ ба муҳити атроф вобаста мебошад. Дар доираи таҳқиқоти диссертатсионӣ ин зарурати гузариш аз моделҳои статикӣ ба моделҳои динамикии ҳисобро асоснок менамояд.

Муносибати тавозуни радиатсионӣ ва гармшавӣ: Муқоисаи каҷхатаи радиатсияи воридшаванда ва инъикосшуда нишон медиҳад, ки қисми назарраси энергия барои гармшавии ғайримақсадноки сохтори нимноқилӣ сарф мешавад [25]. Ин боиси танг шудани минтақаи манъшуда ва дар натиҷа коҳиш ёфтани шиддати кори бебор дар соатҳои баландтарини истеҳсоли неруи барқ мегардад.

Давраи шабонарӯзӣ ва қиматҳои экстремалӣ: Дар график нишон дода шудааст, ки ҳарорати минималии модул пеш аз тулӯи офтоб ба қайд гирифта мешавад, баъд аз он афзоиши босуръати сарборii ҳароратӣ мушоҳида мегардад. Барои моделсозӣ ба назар гирифтани он муҳим аст, ки маҳз дар нуқтаи “ҳарорати максималӣ” самаранокии табдилдиҳии энергия, вобаста аз сатҳи баландии радиатсияи офтобӣ, аз ҳама паст хоҳад буд.

Ҳамин тавр, тафсири графикии дар расми 1.7 пешниҳодшуда тасдиқ менамояд, ки ба назар гирифтани таъхири вақтӣ байни қуллаи радиатсияи

офтобӣ ва қуллаи ҳарорат шарти зарурии пешгӯии дурусти истеҳсоли неруи барқи низомҳои фотоэлектрикӣ дар шароити воқеии истифодабарӣ мебошад.



Расми 1.7. – Вобастагии хусусиятҳои радиатсияи офтобӣ ва ҳарорати ҳаво аз вақти шабонарӯзӣ дар шароити вақти маҳалии офтобӣ [3], [45].

Барои ба таври миқдорӣ ба назар гирифтани таъсири ҳарорат дар моделҳои низомҳои фотоэлектрикӣ зариби ҳароратии иқтидор истифода мешавад, ки тағйирёбии нисбии иқтидори истеҳсолиро ҳангоми тағйир ёфтани ҳарорат тавсиф менамояд. Аз ҷиҳати математикӣ ин вобастагиро метавон бо ифодаи зерин пешниҳод намуд [56], [57]:

$$P = P_{ref}\,[1-\gamma(T_c - T_{ref})] \qquad (1.7)$$

Дар ин ҷо:

– P – иқтидори ҷории модули офтобӣ;

– P_{reff} – иқтидори номиналӣ дар шароити стандартии санҷишӣ;

– γ – зариби ҳароратии иқтидор;

– T_c – ҳарорати элементи фотоэлектрикӣ.

Бояд қайд намуд, ки ҳарорати элементи фотоэлектрикӣ (T_c) ба ҳарорати муҳити атроф мувофиқат намекунад. Барои арзёбии он ба таври васеъ модели

эмпирикӣ дар асоси ҳарорати номиналии кории элементи офтобӣ (NOCT) истифода мешавад:

$$T_c = T_a + \frac{G}{800}(NOCT - 20) \qquad (1.8)$$

Дар ин ҷо:

− T_a – ҳарорати муҳити атроф;

− G – зичии радиатсияи офтобӣ, Вт/м^2;

− NOCT – ҳарорати номиналии кории элементи офтобӣ, ки аз ҷониби истеҳсолкунанда муайян карда мешавад.

Ин модел имкон медиҳад, ки таъсири радиатсия ба гармшавии модули офтобӣ ба назар гирифта шавад, аммо он равандҳои динамикии мубодилаи гармиро ба таври пурра инъикос намекунад. Дар моделҳои дақиқтар омилҳои иловагӣ, аз ҷумла зариби мубодилаи конвективии гармӣ, суръати шамол ва инерсияи ҳароратии конструксия ба назар гирифта мешаванд [58].

Равишҳои муосир ба моделсозии низомҳои фотоэлектрикӣ истифодаи тавозуни энергетикии модулро пешбинӣ менамоянд, ки дар доираи он энергияи воридшавандаи офтобӣ, истеҳсоли неруи бақр ва талафоти гармӣ ба назар гирифта мешаванд. «Чунин равиш имкон медиҳад, ки ҳарорати кории элементҳои фотоэлектрикӣ дақиқтар муайян карда шуда, дар натиҷа эътимоднокии пешгӯии истеҳсоли неруи барқ баланд бардошта шавад» [3].

Ба назар гирифтани таъсири ҳароратӣ барои минтақаҳои дорои иқлими гарм, аз қабили Ҷумҳурии Тоҷикистон, аҳамияти махсус пайдо мекунад, зеро дар фасли тобистон ҳарорати модулҳо метавонанд аз 45-55 °C зиёд шавад. Дар чунин шароит талафоти иқтидор нисбат ба шароити стандартӣ метавонад ба 15-25 дарсад расад, ки ҳангоми лоиҳакашӣ ва оптимизатсияи низомҳои кори неругоҳҳои фотоэлектрикӣ онро бояд ба инобат гирифт [59-60].

«Аҳамияти амалии ба инобат гирифтани таъсири ҳарорат дар имкониятҳои зерин ифода меёбанд» [41]:

− баланд бардоштани дақиқии моделсозии истеҳсоли неруи барқ;

− оптимизатсияи интихоби таҷҳизот бо дарназардошти шароити иқлимӣ;

− таҳияи системаҳои самараноки хунуккунӣ ва вентилятсия;

− «такмил додани алгоритмҳои идоракунии низомҳои фотоэлектрикӣ».

Ҳамин тавр, ҳамгиро намудани моделҳои ҳароратӣ ба низоми умумии ҳисобкунии (ДФЭ) дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ шарти зарурии баланд бардоштани самаранокии энергетикӣ ва иқтисодии онҳо, махсусан дар шароити ҳарорати баланди истифодабарӣ, ба шумор меравад.

Хулосаҳои боби 1

Дар боби якум таҳлили ҳамаҷонибаи ҳолати муосир ва усулҳои моделсозии неругоҳҳои фотоэлектрикӣ, инчунин омилҳои ба самаранокии фаъолияти онҳо таъсиркунанда анҷом дода шудааст:

1. «Таҳқиқот нишон медиҳад, ки дар шароити тағйирёбии низоми муосири энергетикӣ, энергетикаи офтобӣ дар байни МБЭ аҳамияти махсус пайдо карда, бо афзоиши босуръати иқтидорҳои нави насбшуда ва имкониятҳои васеи рушди минбаъда фарқ мекунанд». Ҳамзамон, вобастагии баланди истеҳсоли неруи барқ аз омилҳои беруна зарурати истифодаи усулҳои муосири моделсозиро ба миён меорад.

2. Таҳлили равишҳои мавҷуда нишон дод, ки моделсозии низомҳои фотоэлектрикӣ ба истифодаи схемаҳои эквивалентии электрикӣ, моделҳои тақлидӣ ва воситаҳои барномавӣ, аз қабили MATLAB/Simulink, PVsyst, SAM ва pvlib асос меёбад. Интихоби усуси моделсозӣ аз вазифаҳои таҳқиқот ва дақиқии зарурии ҳисобҳо вобаста мебошад.

3. Таъсири маҷмуи ин омилҳо истеҳсоли воқеии неруи барқ ва сатҳи майлкунии онро аз параметрҳои номиналӣ муайян менамояд. Ба омили ҳароратӣ, ки ба самаранокии модулҳои фотоэлектрикӣ таъсири бартаридошта мерасонад, диққати махсус дода шудааст.

4. Нишон дода шуд, ки баланд шудани ҳарорат боиси коҳиш ёфтани шиддати кори бебор ва кам шудани иқтидори истеҳсолӣ, инчунин ҷойивазшавии тавсифоти волтамперӣ мегардад. Муайян карда шуд, ки дар шароити иқлими гарм талафоти иқтидор метавонад ба 15-25 % расад, ки ин

барои рушди соҳаи энергетикаи офтобӣ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон аҳамияти махсусро пайдо мекунад.

5. Ба инобат нагирифтани талафоти ҳароратӣ боиси аз ҳад зиёд арзёбӣ шудани истеҳсоли ҳисобии неруи барқ ва афзоиши хатои пешгӯии истеҳсоли энергетикӣ мегардад. Ҳамин тавр натиҷаҳои боби якум зарурати таҳия ва истифодаи усулҳои такмилёфтаи моделсозии неругоҳҳои фотоэлектрикиро бо дарназардошти омилҳои ҳароратӣ асоснок менамоянд. Ин барои таҳқиқоти минбаъдаи назариявӣ ва таҷрибавӣ, ки дар бобҳои минбаъдаи диссертатсия пешниҳод шудаанд, заминаи асосӣ ба ҳисоб меравад.

БОБИ 2. ТАҲҚИҚОТИ НАЗАРИЯВӢ ВА ТАҶРИБАВИИ ТАЪСИРИ ҲАРОРАТ БА САМАРАНОКИИ ЭНЕРГЕТИКИИ МОДУЛҲОИ ФОТОЭЛЕКТРИКӢ

«Масъалаи таъсири реҷаи ҳароратӣ ба самаранокии (ТФЭ) табдилдиҳандаҳои фотоэлектрикӣ дар айни замон яке аз масъалаҳои калидӣ ҳангоми арёбии истеҳсоли воқеии энергетикии онҳо баррасӣ мегардад» [3].

Бо вуҷуди он ки хусусиятҳои номиналии панелҳои офтобӣ дар шароити стандартии санҷиш (STC) муайян карда мешаванд, истифодабарии амалии онҳо, махсусан дар минтақаҳои дорои сатҳи баланди инсолятсияи (радиатсия) офтобӣ, бо майлкунии назарраси параметрҳои ҳароратӣ аз қиматҳои меъёрӣ ҳамроҳ мебошад.

Дар доираи ин боб таъсири ҳарорат ба модулҳои фотоэлектрикӣ пайдарпай дар се сатҳ таҳқиқ карда мешавад. Дар марҳилаи аввал таъсирҳои фаврии ҳароратӣ баррасӣ мешаванд, ки тағйирёбии хусусиятҳои электрикии модулҳоро дар низоми ҷории корӣ муайян менамоянд. Дар марҳалаи дуюм таъсири ҷамъшавандаи ҳарорати баланд таҳлил карда мешавад, ки боиси таназзули (деградатсия) элементҳои фотоэлектрикӣ ва коҳишёбии самаранокии дарозмуддати онҳо мегардад. Дар марҳалаи ниҳоӣ муқаррароти назариявӣ бо натиҷаҳои таҳқиқоти таҷрибавӣ, ки дар шароити воқеии истифодабарии модулҳои офтобӣ анҷом дода шудаанд, тасдиқ карда мешавад.

Тибқи таҳқиқотҳои муосир, коҳишёбии самаранокии модулҳои фотоэлектрикӣ ҳангоми баланд шудани ҳарорат ба равандҳои физикии дар маводи нимноқилӣ ба амалоянда вобаста мебошад. Аз ҷумла, баланд шудани ҳарорат боиси тангшавии паҳнои минтақаи манъшуда, афзоиши консентратсияи интиқолдиҳандагони ғайриасосии заряд ва зиёдшавии ҷараёнҳои баръакси сершавӣ мегардад. Дар натиҷа, шиддати кори бебор ба таври назаррас коҳиш ёфта, дар айни ҳол ҷараёни расиши кӯтоҳ тағйироти ночиз дорад. Дар маҷмуъ, ин равандҳо боиси коҳишёбии иқтидори истеҳсолии модул мегарданд. Тибқи таҳқиқоти Skoplaki ва Palyvos [94], вобастагии

ҳароратии модулҳои фотоэлектрикӣ дар ҳудуди ҳарорати корӣ қариб хусусияти хаттӣ дорад. Барои панелҳои офтобии кремнийӣ зариби ҳароратии иқтидор, одатан, дар ҳудуди -0,4…-0,5 %/ºС қарор дошта, инро инчунин таҳқиқоти бунёдии Duffie ва Beckman [62] тасдиқ менамоянд. Ҳамин тавр, ҳангоми баланд шудани ҳарорати модулҳо нисбат ба шароити стандартӣ ба андозаи 20-30 ºС, талафоти иқтидор метавонад ба 10-15 дарсад расад, ки ин ҳангоми истифодаи онҳо дар иқлими гарм аз ҷумла хоси минтақаи ҷанубии Ҷумҳурии Тоҷикистон, аҳамияти назаррас дорад.

«Бояд қайд кард, ки ҳарорати воқеии модули офтобӣ на танҳо аз ҳарорати муҳити атроф, балки аз шиддатнокии радиатсияи офтобӣ, суръати бод, хусусиятҳои конструктивии насбкунӣ, инчунин аз шароити мубодилаи гармӣ бо муҳити атроф вобаста мебошад. Дар як қатор таҳқиқот (King ва дигарон [4, 91]) нишон дода шудааст, ки ҳарорати сатҳи модулҳо дар шароити воқеӣ метавонад аз ҳарорати ҳаво 25-35 ºС [3] баландтар бошад, ки ин таъсири манфии омили ҳароратиро ба нишондиҳандаҳои энергетикии онҳо боз ҳам пурзӯр мегардонад». Таҳқиқоти иловагӣ Krauter [97] имконияти коҳиш додани талафоти ҳароратиро тавассути оптимизатсияи қарорҳои конструктивӣ, аз ҷумла ташкили вентилятсияи табиӣ ва истифодаи низомҳои хунуккунӣ, нишон медиҳанд. Ин зарурати ба таври комплексӣ ба назар гирифтани реҷаи ҳароратиро дар марҳалаи лоиҳакашии дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ тасдиқ менамояд [38].

«Ҳамин тавр, таҳлили назариявӣ нишон медиҳад, ки омили ҳароратӣ яке аз параметрҳои муайянкунандае мебошад, ки ба самаранокии панелҳои офтобӣ таъсир мерасонад ва ба инобат нагирифтани он метавонад боиси майлкунии назарраси нишондиҳандаҳои ҳисобӣ ва воқеии истеҳсоли неруи барқ гардад» [8]. «Натиҷаҳои таҳқиқоти таҷрибавии дар кор [4] овардашуда ба арзёбии миқдории таъсири ҳарорат ба хусусиятҳои истеҳсолии модулҳои офтобӣ дар шароити воқеии истифодабарӣ равона шудаанд. Натиҷаҳои мазкур дар идомаи ин боб бо истифода аз маълумоти манбаъҳо [3] ва [34] ба таври муфассал баррасӣ ва таҳлил карда мешаванд».

2.1. Хусусиятҳои физикию техникии модулҳои фотоэлектрикӣ

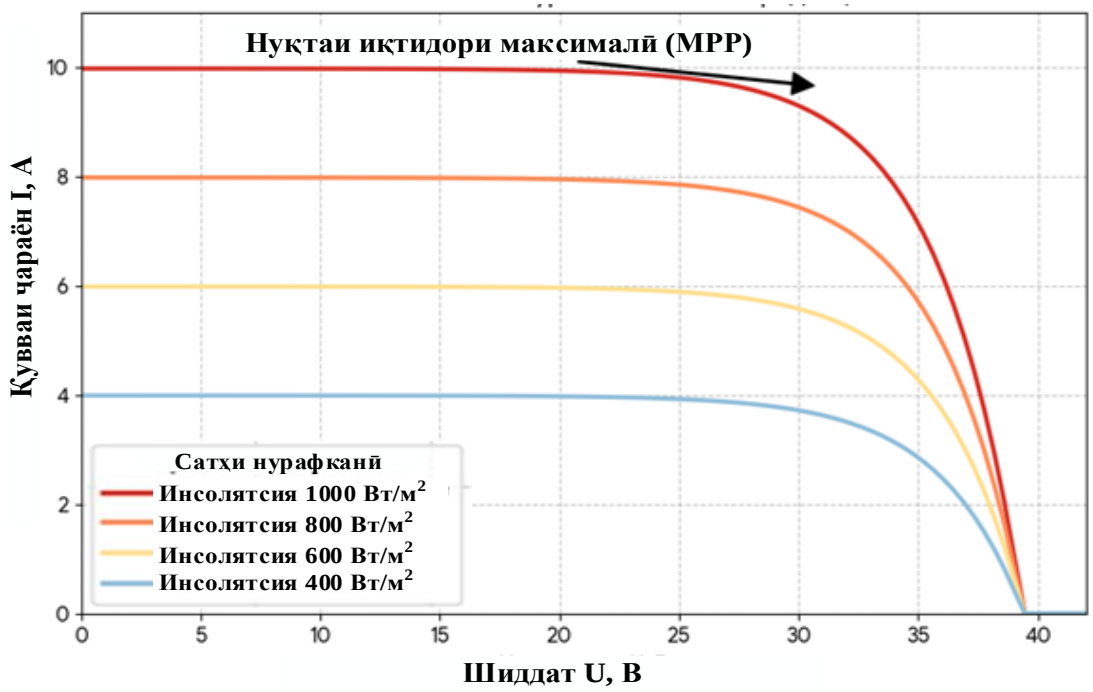
«Тибқи маълумоти дар манбаъ [4] пешниҳодшуда, таҳқиқи самаранокии энергетикии дастгоҳҳои офтобӣ дар шароити иқлими шадидан континенталӣ таҳлили муфассали равандҳои физикиеро талаб менамояд, ки дар табдилдиҳандаҳои фотоэлектрикӣ ба амал меоянд». Модули фотоэлектрикӣ (МФЭ) дастгоҳи мураккаби нимноқилӣ буда, хусусиятҳои истеҳсолии он аз шиддатнокии радиатсияи офтобӣ, таркиби спектриалии рӯшноӣ ва, ки барои минтақаҳои ҷанубӣ аҳамияти бештар дорад, аз реҷаи ҳароратии истифодабарӣ ба таври динамикӣ вобаста мебошанд [65-66].

Қонуниятҳои асосии физикии кори модулҳои фотоэлектрикӣ. Дар асоси фаъолияти ҳар як модули кремниӣ тавсифоти волтамперӣ (ТВА) қарор дошта, дар маҷмуъ қобилияти низоми фотоэлектрикиро барои истеҳсоли иқтидори электрикӣ ҳангоми борҳои барқии гуногун инъикос менамояд.

Аз нуқтаи назари физикӣ, кори модул бо ду параметри ниҳоӣ тавсиф мешавад: ҷараёни расиши кӯтоҳ (I_{sc}), ки ба миқдори фотонҳои фурӯбурдашуда мутаносиби мустақим мебошад, ва шиддати кори бебор (U_{oc}), ки бо паҳнои минтақаи манъшудаи нимноқил муайян карда мешавад [67].

Аммо самаранокии воқеии табдилдиҳии энергия на танҳо бо шиддати кори бебор ва ҷараёни расиши кӯтоҳ, балки бо зариби пуршавии тавсифои волтамперӣ (Fill Factor, FF) низ муайян карда мешавад, ки шакли тавсифоти волтамперӣ ва қобилияти модули фотоэлектрикиро барои таъмин намудани иқтидори баланди истеҳсолӣ дар нуқтаи корӣ тавсиф менамояд.

«Дар расми 2.1 дар зер, графики маҷмуи каҷхатаҳое нишон дода шудааст, ки вобастагии асосии физикиро инъикос менамоянд: ҳангоми тағйир додани сатҳи инсолятсия (радиатсия) аз 400 то 1000 Вт/м^2 ҷараёни расиши кӯтоҳи модули офтобӣ қариб ба таври хаттӣ тағйир меёбад, дар ҳоле ки шиддат нисбатан устувор боқӣ мемонад» [48]. Ин далелро таъкид менамояд, ки панели офтобӣ аз рӯйи табиати худ манбаи ҷараён буда, фаъолияти он бевосита аз шаффофияти атмосфера ва кунҷи афтиши нурҳои офтобӣ вобастагӣ дорад [68].



Расми 2.1. – Вобастагии тавсифоти волтамперии модули фотоэлектрикӣ аз сатҳи инсолятсияи офтобӣ

Хусусиятҳои техникии модули офтобии таҳқиқотшавандаи Aleo S19 HE 300W. Барои гузаронидани қисми таҷрибавии таҳқиқот модули монокристаллии истеҳчоли Олмон SOLARMODUL Aleo S19 HE 300W интихоб карда шуд. Интихоби мазкур бо сатҳи баланди технологияи истеҳсол ва устувории параметрҳои он асоснок карда мешавад. Мувофиқи маълумоти шиносномаи техникии намунаи мазкур, ки дар ҷадвали 2.1 оварда шудааст, модул дар шароити стандартӣ (STC) дорои хусусиятҳои зерин мебошад [69]:

– *Нишондиҳандаҳои электрикӣ:* иқтидори максималӣ (P_{max}) 300 Вт буда, ЗКФ-и он 16,7 %-ро ташкил медиҳад. Дар нуқтаи иқтидори максималӣ, шиддати кории он ба (U_{mp}) 31,2 В ва қувваи ҷарён ба (I_{mp}) 9,63 А баробар мебошад. Қиматҳои ниҳоӣ мутаносибан U_{oc} = 39,4 В ва I_{sc} = 9,97 А-ро ташкил медиҳанд.

– *Ҳассосияти ҳароратӣ:* зариби ҳароратӣ аз рӯйи ҷараён (*Ki*) +0,05 %/K ва аз рӯйи шиддат (*Ku*) -0,29 %/K-ро ташкил медиҳад. Ин маънои онро дорад, ки ҳангоми гармшавӣ ҷараён ба андозаи ночиз зиёд мешавад, аммо коҳишёбии умумии шиддат боиси камшавии назарраси иқтидори ниҳоии истеҳсолӣ мегардад [34].

– *Захираи конструктивӣ ва гармихориҷкунӣ:* модул дорои андозаҳои 1660 х 990 х 50 мм ва массаи 20 кг мебошад. Дар ин ҷо ғафсии профил 50 мм аҳамияти махсус дорад. Дар шароити мубодилаи сусти ҳаво, ки барои ноҳияҳои ҳамвори вилояти Хатлон хос мебошад, чунин баландии чорчӯба фосилаи васеи вентилятсиониро байни сатҳи пушти модул ва сатҳи насб таъмин менамояд.

Ин ба пурзӯр шудани конвенсияи табиӣ ва самараноктар хориҷ шудани гармӣ аз сатҳи пушти модул мусоидат намуда, имкон медиҳад, ки ҳарорати кории он коҳиш ёбад ва дар натиҷа талафоти ҳароратии иқтидор нисбат ба модулҳои дар профилҳои бориктар (30-35 мм) насбшуда кам карда шавад.

«Хусусиятҳои минтақавии ноҳияи Кӯшониён, вилояти Хатлон. Дар шароити ҷанубии Тоҷикистон хусусиятҳои электрикии шиносномавии модулҳои фотоэлектрикӣ, ки дар шароити стандартии санҷиш (STC) оварда шудаанд, метавонанд аз нишондиҳандаҳои воқеии истифодабарӣ ба таври назаррас фарқ кунанд, тибқи манбаи» [4]. «Ноҳияи Кӯшониён бо ҳарорати баланди тобистона ва радиатсия шиддати офтобӣ тавсиф мешавад, ки дар натиҷаи он ҳарорати сатҳи модули фотоэлектрикӣ дар баъзе ҳолатҳо метавонад ба 70-75 °C расад» [27].

«Баланд шудани ҳарорат боиси коҳишёбии шиддати элементҳои фотоэлектрикӣ ва дар натиҷа кам гаштани иқтидори истеҳсолии модул мегардад. Аз ин рӯ, ҳангоми истифодабарии низомҳои фотоэлектрикӣ дар шароити ҳарорати баланд таъмин кардани кори он дар наздикии нуқтаи иқтидори максималӣ (MPP) аҳамияти махсус пайдо мекунад» [8].

«Илова бар ин, ғуборолудии баланди ҳаво дар минтақа ба ҷамъшавии таҳшинҳои ғуборӣ дар сатҳи шишаи муҳофизатии модул мусоидат намуда, гузароиши равшании онро коҳиш медиҳад ва мутаносибан миқдори радиатсияи офтобии ба элементҳои фотоэлектрикӣ воридшавандаро кам мекунад» [3].

Таҳлили муқоисавии хусусиятҳои модули таҳқиқшаванда дар ҷадвали 2.1 дар шароити истифодабарии воқеӣ ва стандартӣ STC оварда шудааст.

Ҷадвали 2.1. – Таҳлили муқоисавии хусусиятҳои модули Aleo S19 HE 300W дар шароити стандартии санҷиш (STC) ва шароити воқеии истифодабарӣ

Параметрҳои модул	Ишоратҳои ҳуруфӣ	шароити стандартии санҷиш (STC) (25 °C)	Шароитҳои ҳисобӣ барои н. Кӯшониён (ҳарорати элементҳо 35 °C)	Шароитҳои ҳисобӣ барои н. Кӯшониён (ҳарорати элементҳо 55 °C)	Майлкунӣ ҳангоми 55 °C, %
Иқтидори максималӣ	P_{max}	300 Вт	288,0 Вт	264,0 Вт	–12,0%
Шиддат дар нуқтаи иқтидори максималӣ	U_{mp}	31,2 В	30,3 В	28,5 В	–8,7%
Ҷараён дар нуқтаи иқтидори максималӣ	I_{mp}	9,63 А	9,68 А	9,77 А	+1,5%
Шиддати кори бебор	U_{oc}	39,4 В	38,3 В	36,0 В	–8,6%
ЗКФ-и модул	η	16,7 %	16,0 %	14,7 %	–12,0%

Ҳисобкуниҳо дар асоси зариби ҳароратии шиддат ва иқтидор, мутаносибан (Ku = -0,22%/К) ва (Kp = -0,40%/К), анҷом дода шудааст.

Ҳисобҳои овардашуда нишон медиҳанд, ки ҳангоми баланд шудани ҳарорати элементи офтобӣ аз 25 то 55 °С иқтидори истеҳсолии модул тақрибан 12 % коҳиш меёбад [32]. Барои модули дорои иқтидори 300 Вт ин ба коҳишёбии иқтидор тақрибан ба андозаи 36 Вт мувофиқат мекунад. Ҳамзамон, ҷараёни расиши кӯтоҳ вобастагии ҳароратии мусбати начандон зиёд дорад, аммо афзоиши он коҳишёбии назарраси шиддатро, ки дар натиҷа баланд шудани ҳарорати элементҳои офтобӣ ба вуҷуд меояд, ҷуброн карда наметавонад. Ҳамин тариқ, ҳисоб таъсири назарраси омили ҳароратиро ба нишондиҳандаҳои энергетикии модули фотоэлектрикӣ дар шароити истифодабарии вилояти Хатлон тасдиқ менамояд. Ҳангоми 55 °С баланд шудани ҳарорати элементҳо, талафоти ҳисобии ҳароратии иқтидор метавонад нисбат ба шароити стандартии санҷиш (STC) тақрибан ба 12 % расад. Натиҷаи ба дастомада санҷиши таҷрибавиро тақозо менамояд, ки дар бобҳои минбаъда гузаронида мешавад.

Бояд қайд намуд, ки тавсифоти овардашудаи модулҳои фотоэлектрикӣ асосан дар шароити стандартӣ ё квазистатсионии озмоиш муайян карда мешаванд. Дар шароити воқеии истифодабарӣ параметрҳои электрикии модулҳои фотоэлектрикӣ зери таъсири ҳарорат, сатҳи радиатсияи офтобӣ ва инерсияи ҳароратии конструксияи пайваста тағйир меёбанд. Бинобар ин, таҳлили минбаъда ба таҳқиқи таъсирҳои динамикии ҳароратӣ ва таъсири онҳо ба тавсифоти электрикии истеҳсолии модулҳои фотоэлектрикӣ бахшида шудааст [32].

2.2. Вобастагии зариби самаранокии кори модулҳои фотоэлектрикӣ аз ҳарорат

Таҳаввулоти (эволютсия) моделҳои математикии вобастагии ЗКФ аз ҳарорат. Дар адабиёти илмӣ доираи васеи равишҳо барои муайян кардани самаранокии модулҳои фотоэлектрикӣ (n_c) вобаста ба ҳарорати кории онҳо (T_c) пешниҳод шудааст. Дар таҳқиқоти баррасии S. Dubey ва дигарон [70] ду самти асосии рушди моделҳои математикии вобастагии зариби самаранокӣ ҷудо карда шудаанд: вобастагии ҳароратӣ, ки ба истифодаи зариби доимии ҳароратӣ асос меёбад, ва коррелятсияҳои ғайрихаттӣ (логарифмӣ), ки хусусияти мураккабтари тағйирёбии параметрҳои электрикии модулҳои фотоэлектрикиро вобаста ба ҳарорат ба инобат мегирад.

Модели хаттии Эванс-Флоршутс. Аз нигоҳи таърихӣ, яке аз аввалин ва дар ҳисобҳои муҳандисӣ бештар истифодашаванда модели пешниҳодшудаи Evans ва Florschuetz [71] ба ҳисоб меравад. Муаллифон муқаррар карданд, ки дар ҳудуди ҳароратии корӣ то 100 °C коҳиши ЗКФ-и электрикии модулҳои офтобӣ метавонад бо дақиқии барои ҳисобҳои муҳандисӣ уофӣ тавассути вобастагии амалан хаттӣ аз ҳарорати корӣ тавсиф карда шавад.

Чунин равиш доимӣ будани зариби ҳароратии ЗКФ-ро пешбини намуда, имкон медиҳад, ки бузургии талафоти ҳароратӣ ба таври нисбатан содда арзёбӣ карда шавад. Бартарии асосии ин модел содагӣ ва возеҳии он мебошад,

дар сурате ки маҳдудияти он ба эҳтимоли коҳиш ёфтани дақиқӣ ҳангоми ҳарорати баланд ва васеъ намудани ҳудуди ҳисобӣ алоқаманд аст.

$$n_c = n_{ref}[1-\beta_{ref}(T_c - T_{ref})] \qquad (2.1)$$

Дар ин ҷо параметри калидӣ (β_{ref}) – зариби ҳароратӣ мебошад, ки аз ҷиҳати физикӣ суръати тағйирёбии хусусиятҳои нимноқилро таҳти таъсири ҳарорат ифода мекунад. Мувофиқи маълумоти [110-113], барои кремнийӣ монокристаллӣ қимати ин нишондиҳанда дар сатҳи -0,26 то -0,35 %/°C устувор шудааст. Аҳамияти ин модел пеш аз ҳама ба содагии он вобаста мебошад, чун ки барои татбиқи он танҳо донистани маълумоти шиносномавии модули фотоэлектрикӣ кифоя аст.

Модели логарифмӣ бо дарназардошти инсолятсияи (радиатсия) офтобӣ. Рушди минбаъдаи моделҳои математикӣ [72] нишон дод, ки ЗКФ-и модулҳои фотоэлектрикӣ на танҳо аз ҳарорати кории он, балки аз шиддатнокии шуоъҳои афтидаи офтобӣ ($I_{(t)}$) низ вобаста мебошад. “Ин ба он вобаста аст, ки тағйирёбии сатҳи инсолятсия ба параметрҳои электрикии табдилдиҳандаҳои фотоэлектрикӣ таъсир расонида, дар натиҷа ба самаранокии энергетикии он таъсири манфӣ мерасонад” [8]. Аз ин рӯ, вобастагии васеъшудаи логарифмӣ пешниҳод гардид, ки дар он ҳамзамон омили ҳароратӣ ва шиддатнокии шуоъҳои офтобӣ ба назар гирифта мешаванд:

$$n_c = n_{ref}[1-\beta_{ref}(T_c - T_{ref}) + \gamma \log_{10} I(t)] \qquad (2.2)$$

Зариби (γ) барои ба назар гирифтани он ворид карда мешавад, ки ҳангоми паст будани сатҳи равшаннокӣ муқовимати дохилии элементи фотоэлектрикӣ нақши дигаргунаро оғоз мекунад. Барои модулҳои кремнийӣ қимати (γ) одатан баробар ба 0,12 қабул карда мешавад. Аммо дар амалияи муосир ин зариб аксар вақт сарфи назар карда мешавад, зеро таъсири ҳароратӣ (T_C) нисбат ба таъсири тағйирёбии спектр ҳангоми инсолятсияи станддартӣ ба маротиба бештар мебошад.

Таҳлили муқоисавии самаранокии намудҳои гуногуни фотоэлементҳо. Дар асоси низоммандсозии маълумоти дар кори [110-113] пешниҳодшуда,

фарқиятҳои назаррас дар устувории ҳароратии технологияҳои фотоэлектрикӣ муайян карда мешавад, ки ба хусусиятҳои маводи нимноқилии истифодашаванда вобаста мебошад. Дар ҷадвали зер (ҷадвали 2.2) зарибҳои умумии ҳароратӣ оварда шудаанд, ки онҳоро барои арзёбии муқоисавии талафоти иқтидори модулҳои фотоэлектрикӣ дар шароити гуногуни иқлимӣ истифода бурдан мумким аст.

Ҷадвали 2.2. – Параметрҳои муқоисавии вобастагии ҳароратии модулҳои фотоэлектрикӣ (тибқи маълумоти [110-113])

Навъи модули фотоэлектрикӣ	**ЗКФ-и базавии модули саноатӣ, (η_{ref}), %**	**Зариби ҳароратӣ (β_{ref}), %/°C**	**Вазъи академии технология ва қобили татбиқи он**
Монокристаллӣ (Mono-Si)	21,5-24,5	-0,26 то -0,35	Технологияи бартаридоштаи бозор (>95% истеҳсоли ҷаҳонӣ)
Поликристаллӣ (Poly-Si)	16-18	-0,38 то -0,43	Технологияи кӯҳнашуда. Аз сабаби иқтидори хоси паст ва зариби баланди ҳароратӣ он камтар истифода мешавад
Кремнийи аморфӣ (a-Si)	7,0-11,0	-0,20 то -0,26	Истифодаи маҳдуд. Дорои зариби ҳароратии хело хуб (паст) мебошад, аммо аз сабаби ЗКФ-и паст, барои лоиҳаҳои бузургмиқёс аз ҷиҳати тиҷоратӣ камсамар мебошад
Системаҳои гибридии фотоэлектрикӣ-ҳароратӣ (PVT)	19,0-23,0 (фотоэлектрикӣ), 50,0-60,0 (ҳароратӣ)	Аз навъи элементи фотоэлектрикӣ вобаста аст	Ҳалли самаранок. Бо шарофати хориҷ намудани пайвасти гармӣ тавассути моеъ (гармибаранда), элементҳои фотоэлектрикӣ хунук карда шуда, ҳатто дар шароити иқлими гарм самаранокии худро барқарор мекунанд

Дар марҳалаи муосири рушди саноати фотоэлектрикӣ (солҳои 2025-2026) гузариши технологӣ аз сохторҳои кремнии навъӣ (p-PERC) ба сохторҳои самаранокиашон баланди навъи n (TOPCon, HJT) ба амал омадааст. Тибқи ҳисоботи таҳлилии Fraunhofer ISE ва харитаи роҳи ITRPV, ЗКФ-и модулҳои саноатии Mono-Si, ки ба таври силсилавӣ истеҳсол мешаванд, дар айни замон

дар ҳудуди 21,5-24,5 % қарор дорад, дар ҳоле ки намунаҳои лаборотории элементҳои кремнӣ ба ҳадди ЗКФ-и то 26,8 % мерасанд [113].

Чи гунае ки аз маълумоти пешниҳодшуда дида мешавад, технологияи қабати тунук дар асоси кремнийи аморфӣ (a-Si) нисбат ба технологияҳои анъанавии кристалӣ бо зариби ҳароратии иқтидор, ки тақрибан 3 маротиба камтар аст, тавсиф мешавад. Аз ин рӯ, ҳангоми баланд шудани ҳарорати корӣ таъсири омили ҳароратӣ ба иқтидори истеҳсолии чунин модулҳо хеле сусттар зоҳир мегардад. Ин имкон медиҳад, ки технологияи (a-Si) ҳамчун технологияи ояндадори истифода дар минтақаҳои дорои ҳарорати баланди корӣ баррасӣ карда шавад, ки дар онҳо ҳарорати кории модулҳои фотоэлектрикӣ метавонад ба таври устувор аз 60 °C зиёд бошад.

Методолияи NOCT ҳамчун стандарти арзёбӣ дар шароити воқеии истифода. Яке аз масъалаҳои асосӣ ҳангоми лоиҳакашии низомҳои фотоэлектрикӣ фарқияти байни натиҷаҳои озмоишҳои лабораторӣ дар шароити стандартӣ (STC) ва шароити воқеии истифода мебошад.

Дар таҳқиқоти [73] мувофиқи мақсад будани истифодаи параметрҳои NOCT (ҳарорати номиналии кории элементи офтобӣ) асоснок карда шудааст, ки он имкон медиҳад, реҷаи ҳароратии модули фотоэлектрикӣ ба шароити воқеии истифодаи он наздиктар арзёбӣ карда шавад.

Шароити муайян кардани NOCT аз шароити стандартии санҷиш STC ба таври куллӣ фарқ намуда, параметрҳои зеринро дар бар мегирад:

− **шиддати инсолятсияи (радиатсия) офтобӣ**: 800 Вт/м^2 ба ҷойи 1000 Вт/м^2, ки ба сатҳи маъмултарини инсолятсияи (радиатсия) офтобӣ дар шароити истифода мувофиқат мекунад;

− **ҳарорати муҳити атроф:** 20 °C, дар муқоиса бо ҳарорати [3] муқарраршудаи элементи офтобӣ 25 °C дар шароити стандартии санҷиш STC;

− **суръати бод (шамол):** 1 м/с, ки имкон медиҳад мубодилаи табиии гармӣ бо муҳити атроф ба назар гирифта шавад;

− **насби кушодаи модул,** ки вазиши озоди ҳаворо аз сатҳи пушти модул таъмин намуда, ба ин васила баҳисобгирии воқеитари мубодилаи гармии конвективиро имконпазир мегардонад.

Аз ин рӯ, методологияи NOCT нисбат ба истифодаи танҳо параметрҳои STC (шароити стандартии санҷиш) имкон медиҳад, ки ҳарорати кории модули фотоэлектрикӣ аз нуқтаи назари физикӣ асосноктар арзёбӣ карда шавад. «Ин махсусан барои таҳлили талафоти ҳароратӣ дар шароити иқлими гарм аҳамияти муҳим дорад, зеро ҳарорати воқеии модули фотоэлектрикӣ метавонад аз ҳарорати стандартии 25 ^{o}C ба таври назаррас баландтар бошад» [3].

Маҳз ба инобат гирифтани шароити воқеии истифодабарӣ, ки дар методологияи NOCT пешбинӣ шудааст, имкон медиҳад, ки аз арзёбии реҷаи ҳароратии модулҳои алоҳидаи фотоэлектрикӣ ба таҳлили вобастагии он аз шароити иқлими минтақаи мушаххас гузариш анҷом дода шавад. Дар ин замина, муқоисаи сатҳи инсолятсияи (радиатсия) офтобӣ бо иқтидори эҳтимолии неруи барқ аҳамияти махсус дорад.

Таҳлили графикҳои тақсимоти глобалии инсолятсия ва иқтидори истеҳсоли неруи барқ (расмҳои 2.2 ва 2.3 дар кори [70]) имкон медиҳад, ки “падидаи вобастагии ҳароратии энергетикаи офтобӣ” муайян карда мешавад. Минтақаҳое, ки сатҳи баландтарини захираи офтобӣ доранд, ҳамзамон бо сарбории ҳароратии зиёд ба модулҳои фотоэлектрикӣ тавсиф мешаванд. Ин таъсир махсусан дар Осиёи Марказӣ ва, аз ҷумла, дар шароити Тоҷикистон равшан зоҳир мегардад, ки дар он сатҳи баланди радиатсияи офтобӣ бо ҳарорати баланди муҳити атроф ҳамоҳанг мебошад.

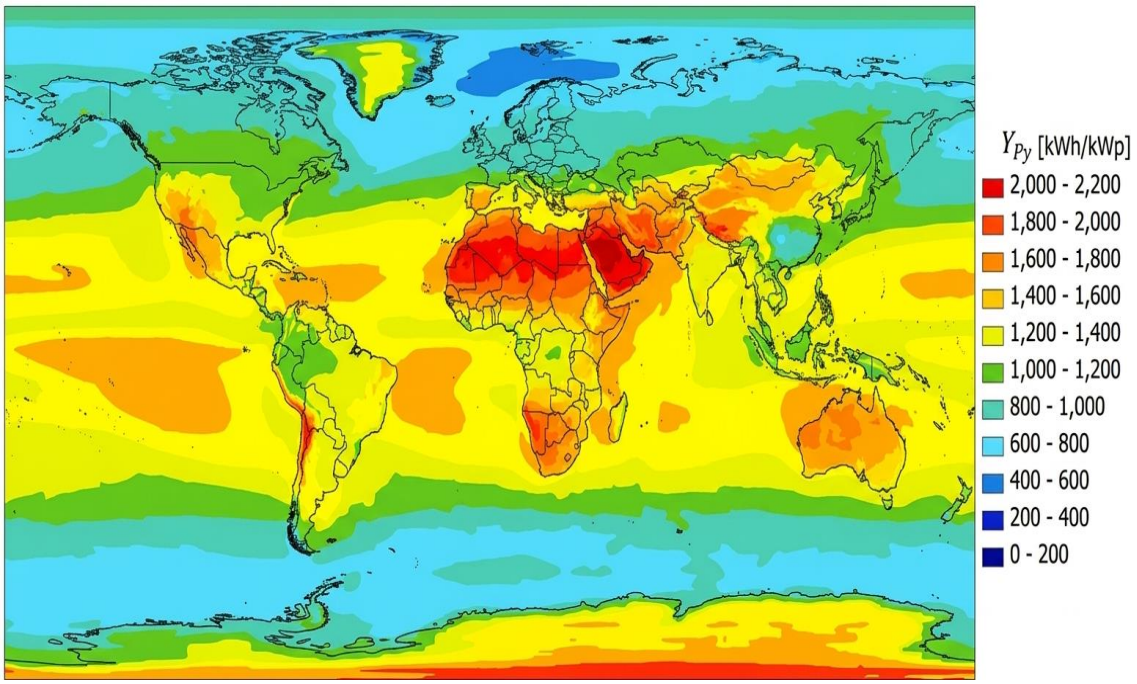
Аз ин сабаб, иқтидори баланди захираи энергетикии офтобии минтақа на танҳо барои истеҳсоли неруи барқ шароити мусоид фароҳам меорад, балки талафоти ҳароратиро низ афзоиш медиҳад. Бинобар ин, ба назар гирифтани ҳарорати кории модул яке аз омилҳои асосӣ ҳангоми арзёбии самаранокии воқеии энергетикии низомҳои фотоэлектрикӣ ба ҳисоб меравад.

Минтақаҳои дорои талафоти баланди ҳароратӣ ва Осиёи Марказӣ. Минтақаҳои дорои иқлими хушк Саҳрои Кабир, нимҷазираи Арабистон, инчунин ҳудудҳои биёбонии Туркменистон ва Ӯзбекистон ба таври анъанавӣ бо сатҳи баланди инсолятсияи (радиатсия) офтобӣ тавсиф мешаванд. Аммо

захираи баланди офтобӣ дар ин минтақаҳо бо сарбории назарраси ҳароратӣ ба модулҳои фотоэлектрикӣ ҳамроҳ мебошад.

Тибқи маълумоти таҳқиқоти [70], ҳангоми ҳарорати тобистонаи ҳавои муҳит то 45-50 ºС, ҳарорати кории модулҳо метавонад ба 75-80 ºС расад. Дар чунин шароити талафоти иқтидор аз таъсири ҳарорат метавонад нисбат ба нишондиҳандаҳои номиналӣ тақрибан 18-25 %-ро ташкил диҳад.

Вобаста ба ин, барои ҳудудҳои ҳамвор ва хушкшудаи Осиёи Марказӣ сатҳи баланди инсолятсияи офтобӣ на ҳамеша афзоиши мутаносиби истеҳсоли воқеии неруи барқро таъмин менамояд. Афзоиши ба дастомадаи истеҳсоли энергия қисман аз ҳисоби талафоти ҳароратӣ ҷуброн карда мешавад. Бинобар ин, ҳангоми интихоби технологияи модулҳои фотоэлектрикӣ, пешгӯии истеҳсоли онҳо ва арзёбии самаранокии неругоҳҳои фотоэлектрикии минтақа ба инобат гирифтани ин омил зарур мебошад.



Расми 2.2. – Харитаи глобалии иқтидори истеҳсолии энергияи фотоэлектрикӣ (Y_{pu}) бо истифода аз модули фотоэлектрикии c-Si [70, 74].

Падидаи минтақаҳои баландкӯҳи Тоҷикистон дар заминаи истеҳсоли неруи барқи фотоэлектрикӣ. Тоҷикистон барои санҷиши амалии хулосаҳои дар таҳқиқотҳои [73-74] пешниҳодшуда оид ба таъсири реҷаи

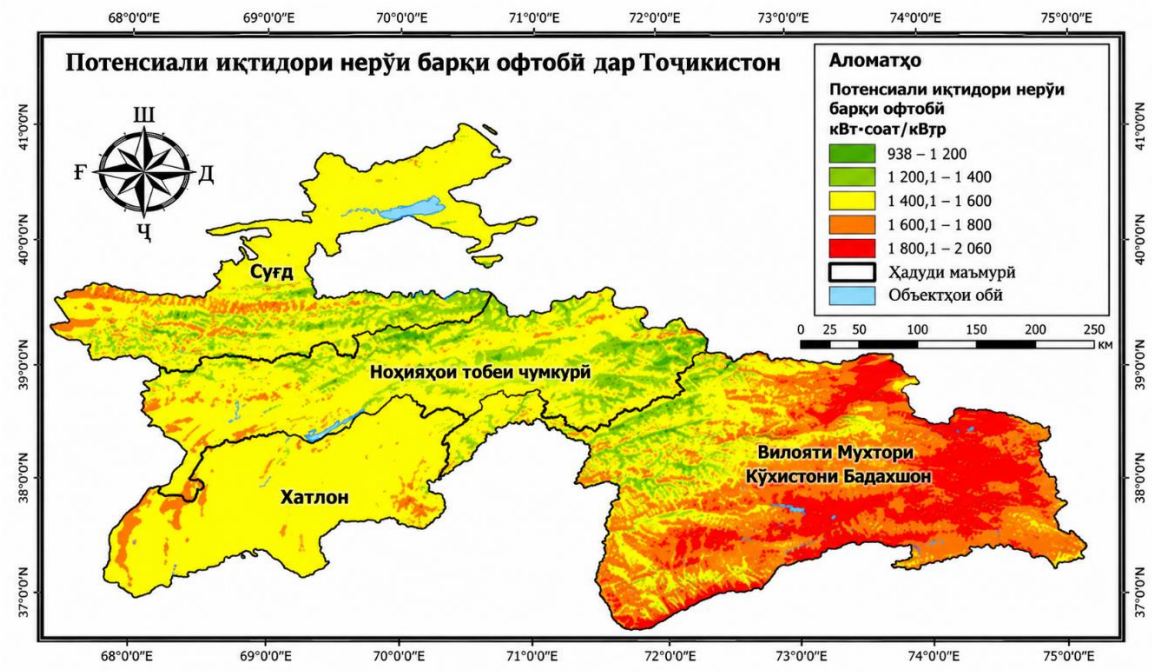
ҳароратӣ ба самаранокии воқеии истеҳсоли неруи барқи фотоэлектрикӣ минтақаи намунавӣ ба ҳисоб меравад. Омезиши радиатсияи баланди офтобӣ бо ҳарорати нисбатан пасти ҳаво дар минтақаҳои баландкӯҳ шароитеро фароҳам меорад, ки дар онҳо талафоти ҳароратии модулҳои фотоэлектрикӣ нисбат ба минтақаҳои гарми хушк дар ҳолати сатҳи муқоисашавандаи инсолятсия метавонад ба таври назаррас камтар бошад. «Ҳамин тариқ, таҳлили “падидаи вобастагии ҳарорат”-и қаблан баррасишуда имкон медиҳад, ки як қатор омилҳои ба самаранокии баланди неругоҳҳои фотоэлектрикӣ дар баъзе минтақаҳои ҷумҳурӣ мусоидаткунанда муайян карда шаванд» [3]:

− ***Градиенти баландӣ ва тозагии атмосфера.*** Дар шароити вилояти Мухтори Кӯҳистони Бадахшон, (Помир) ва дигар минтақаҳои баландкӯҳи Тоҷикистон бо зиёд шудани баландии массаи оптикии атмосфера коҳиш меёбад, ки ба афзоиши ҳиссаи радиатсияи мустақими офтобӣ мусоидат менамояд. Омили иловагӣ нисбатан паст будани сарбории аэрозолӣ дар муқоиса бо баъзе минтақаҳои ҳамвор ва хушк мебошад, ки дар онҳо ғуборолудии атмосфера метавонад воридшавии инсолятсияи (радиатсия) офтобиро ба сатҳи модулҳо ба таври назаррас коҳиш диҳад.

− ***Хунукшавии табиии модулҳои фотоэлектрикӣ.*** Ҳарорати пасти ҳавои муҳит дар минтақаҳои баландкӯҳ барои хориҷ намудани гармӣ аз модулҳои фотоэлектрикӣ шароити мусоид фароҳам меорад. Дар натиҷа, ҳарорати кории элементҳо офтобӣ (T_c) метавонад дар сатҳи ба ҳарорати стандартии STC (25 ^{o}C) наздик нигоҳ дошта шавад ва дар давраи хунук ҳатто аз он пасттар бошад.

− Бо дарназардошти зариби манфии ҳароратии иқтидор, ин ҳолат бевосита талафоти ҳароратиро коҳиш дода, ба баланд шудани самаранокии воқеии истеҳсоли неруи барқи фотоэлектрикӣ мусоидат менамояд. Тибқи маълумоти адабиёт [73-74], таъсири маҷмуи омили ҳароратӣ дар шароити сарди баландкӯҳ метавонад дар муқоиса бо системаҳои шабеҳӣ, ки дар шароити иқлими гарм истифода мешаванд, бартарии назаррасро аз ҷиҳати самаранокии энергетикӣ таъмин намояд.

– ***Албедо ва криосфера.*** Мавҷудияти қабати устувори барф дар минтақаҳои баландкӯҳ албедои сатҳи заминро зиёд намуда, ҷузъи иловагии инсолятсияи (радиатсия) инъикосшудаи офтобиро ба вуҷуд меорад. «Барои модулҳои дуҷонибаи фотоэлектрикӣ (bifacial) ин омил аҳамияти махсус дорад, зеро инсолятсияи (радиатсия) инъикосшуда метавонад воридшавии радиатсияро ба сатҳи пушти элементҳои фотоэлектрикӣ иловатан афзоиш диҳад» [83]. Барои ҳамин омезиши захираи баланди офтобӣ, ҳарорати пасти корӣ ва албедои баланди сатҳҳои барфпӯш маҷмуи таъсироти иқлимиро ба вуҷуд меорад, ки метавонад истеҳсоли хоси неруи баркро ба ҳар воҳиди иқтидори насбшуда ба таври назаррас афзоиш диҳад.



Расми 2.3. – Харитаи захираи (потенсиалӣ) иқтидори фотоэлектрикии офтобии Тоҷикистон [74, 83].

– ***Муқоисаи истеҳсоли хоси неруи барқ.*** «Дар натиҷаи омезиши сатҳи баланди инсолятсияи офтобӣ ва реҷаи мусоиди ҳароратӣ, истеҳсоли хоси неруи барқ (кВт·соат/кВтр) дар шароити минтақаҳои сарди баландкӯҳи Тоҷикистон, аз ҷумла дар ноҳияи Мурғоб, метавонад бо нишондиҳандаҳои минтақаҳои гарми Австралия ва Африқо қобили муқоиса бошад ва дар баъзе ҳолатҳо ҳатто аз онҳо зиёдтар шавад» [25]. «Ин нишон медиҳад, ки ҳангоми банақшагирии стратегии рушди энергетикаи офтобӣ реҷаи ҳароратии

минтақаҳои баландкӯҳи Тоҷикистонро на танҳо ҳамчун омили маҳдудкунанда, балки ҳамчун омили эҳтимолан ҳавасмандкунанда низ бояд баррасӣ намуд, ки ба баланд шудани самаранокии энергетикӣ ва иқтисодии лоиҳаҳои фотоэлектрикӣ мусоидат мекунад» [3].

Ҳамзамон, таъсири ҳарорат танҳо бо коҳиши кӯтоҳмуддати иқтидори истеҳсолии модулҳои фотоэлектрикӣ маҳдуд намешавад. Вобастагиҳои ба дастомада мавҷудияти робитаи байни ҳарорати баланди корӣ ва равандҳои таназзули дарозмуддати сохторҳои нимноқилиро нишон медиҳад.

Ҳангоми истифодаи дарозмуддат дар шароити ҳарорати баланд ва таъсири давраи сарбориҳои ҳароратӣ, равандҳои таназзулӣ метавонанд суръат гирифта, боиси зиёд шудани муқовиматҳои электрикии дохилӣ, коҳиш ёфтани зариби пуркунӣ ва бад шудани параметрҳои асосии электрикии модулҳо гарданд. Ҳамин тавр, омили ҳароратиро бояд ҳамзамон аз ду ҷиҳат баррасӣ намуд: ҳамчун сабаби бевоситаи талафоти иқтидор дар раванди истифода ва ҳамчун омили эҳтимолан суръатбахшандаи коҳиши дарозмуддати нишондиҳандаҳои энергетикии низоми фотоэлектрикӣ.

2.3. Таназзули (деградатсия) ҳароратии модулҳои фотоэлектрикӣ ва таъсири он ба хусусиятҳои кории онҳо

Таъсири ҳароратии дар зербоби қаблӣ баррасишуда асосан коҳиши баръакси кӯтоҳмуддати иқтидори электрикии модулҳои фотоэлектрикиро ҳангоми баланд шудани ҳарорати кории онҳо тавсиф мекунад. Аммо ҳангоми таъсири дарозмуддати ҳарорати баланд ин омил хусусияти дигар пайдо намуда, ба яке аз шартҳои рушди равандҳои таназзулӣ табдил меёбад, ки устувории дарозмуддат ва хусусиятҳои истифодабарии модулҳоро муайян мекунад. Бар хилофи таъсири кӯтоҳмуддати ҳароратӣ, давраҳои такрории ҳароратӣ ва истифодаи дарозмуддат дар шароити ҳарорати баланд метавонанд боиси тағйироти бебозгашт дар мавод, пайвастагиҳо ва элементҳои сохтори модули фотоэлектрикӣ гарданд, ки дар натиҷа параметрҳои электрикии он тадриҷан коҳиш меёбанд.

«Аз ин рӯ, ҳангоми арзёбии таъсири ҳарорат бояд ду механизми бо ҳам алоқаманд аз ҳам ҷудо карда шаванд: талафоти муваққатии иқтидор аз таъсири ҳарорат, ки коҳиши ҷории самаранокии энергетикиро муайян менамояд, ва таназзули дарозмуддати бо ҳарорат вобаста [25], ки боиси тадриҷан коҳиш ёфтани захираи истифодабарӣ ва истеҳсоли неруи барқ дар давоми муҳлати хизмати модул мегардад» [4].

“Таҳлили тавсифоти волтамперӣ (ТВА) ва таназзули ҷараён. Дар ҷараёни истифодабарии дарозмуддат, ки давомнокии он барои модулҳои фотоэлектрикӣ метавонад аз 20 сол зиёд бошад, дар тавсифоти волтамперии онҳо тағйирот ба амал меояд, ки тадриҷан бад шудани параметрҳои электрикиро инъикос менамояд” [8]. Тибқи таҳқиқоти адабиёти [75], таъсири ҳарорат дар шакли тағйирёбии хоси каҷхатаҳои тавсифоти волтамперӣ ҳангоми ҳароратҳои гуногуни корӣ (T_m) зоҳир мегардад.

Таҳлили муқоисавии каҷхатаҳои тавсифотии назариявӣ ва таҷрибавӣ:

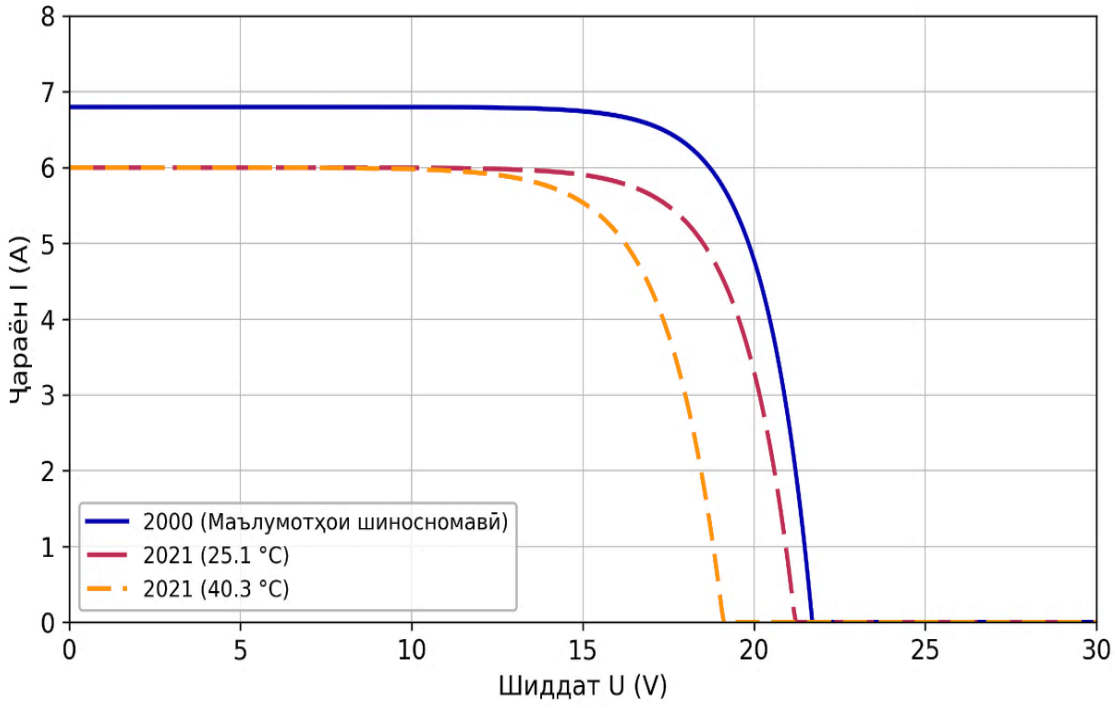
− ***Модели назариявӣ.*** «Дар ҳолати идеалӣ баланд шудани ҳарорат боиси коҳиш ёфтани шиддати кори бебор (U_{oc}) мегардад, дар ҳоле ки ҷараёни расиши кӯтоҳ (I_{sc}) хеле камтар тағйир ёфта, барои фотоэлементҳои кремнӣ одатан дорои зариби хурди мусбати ҳароратӣ буда, тақрибан 0,04-0,06 %/°C-ро ташкил медиҳад» [83]. Бинобар ин, таъсири ҳарорат асосан тавассути тағйирёбии шиддат зоҳир мегардад на балки ҷараён.

− ***Ҳассосияти ҳароратии шиддат.*** Маълумоти таҷрибавии дар таҳқиқотҳои [75, 83] пешниҳодшуда нишон медиҳанд, ки зуҳуроти асосии гармшавӣ коҳиши назарраси шиддати кори бебор (U_{oc}) мебошад. Ҳангоми баланд шудани ҳарорат тақрибан аз 25 то 40 °C тағйирёбии назарраси тавсифоти волтамперӣ ба самти қиматҳои пасттари шиддат мушоҳида мешавад, дар ҳоле ки ҳангоми ҳарорати тақрибан 25 °C параметрҳои каҷхатаҳои тавсифотӣ нисбатан устувор боқӣ мемонанд.

Ин нақши муайянкунандаи омили ҳароратиро дар коҳиши ёфтани иқтидори истеҳсолии модул дар шароити ҳарорати баланди корӣ тасдиқ менамояд.

– ***Таъсири таназзули оптикӣ ба ҷараён.*** Бар хилофи шиддати кори бебор (U_{oc}), ҷараёни расиши кӯтоҳ (I_{sc}) бо ҳассосияти ҳароратии хеле камтар тавсиф мешавад. Барои фотоэлементҳои кремнӣ ҳангоми баланд шудани ҳарорат афзоиши камтарини ҷараён интизор меравад, аммо дар намунаҳои таҳқиқшудаи кори [75] ин таъсир суст ифода ёфта ё амалан мушоҳида намешавад (ниг. ба расми 2.4). Чунин дуршавӣ аз рафтори аз ҷиҳати назариявӣ интизоршаванда метавонад аз мавҷудияти механизмҳои иловагии таназзулӣ, аз ҷумла таназзули оптикӣ, шаҳодат диҳад, ки бо коҳиш ёфтан гузарониши рӯшноӣ тавассути қабатҳои муҳофизатӣ алоқаманд мебошад.

«Ҳамин тариқ, таҳлили тавсифоти волтамперӣ имкон медиҳад, ки саҳми механизмҳои гуногуни таназзул аз ҳам ҷудо карда шаванд: таъсири ҳароратӣ асосан дар коҳиш ёфтани шиддати кори бебор (U_{oc}) инъикос меёбад, дар ҳоле ки тағйирёбии ҷараёни расиши кӯтоҳ (I_{sc}) бештар метавонад бо равандҳои оптикӣ ва дигар равандҳои таназзулӣ алоқаманд бошад» [4]. Чунин ҷудокунии таъсири омилҳо барои ташхиси минбаъдаи ҳолати техникии модулҳои фотоэлектрикӣ аҳамияти асосӣ дорад.



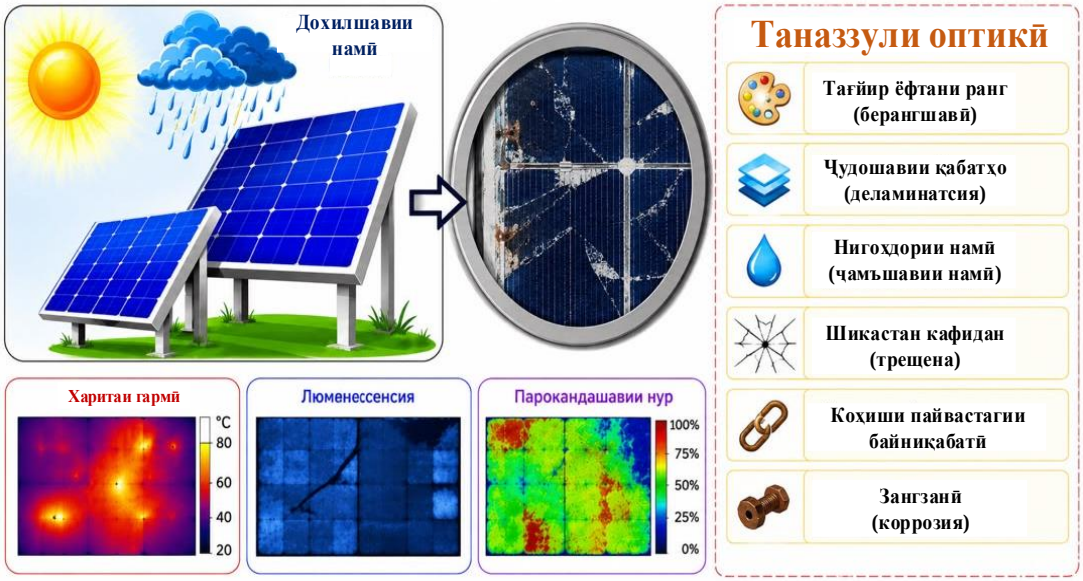
Расми 2.4. – Тавсифоти муқоисавии волтамперии модули фотоэлектрикӣ пас аз 21 соли истифода: муқоисаи маълумотҳои шиносномавӣ ва ченкуниҳои таҷрибавӣ ҳангоми ҳарорати 25 °C ва 40 °C [75].

– ***Механизмҳои комплексии талафот.*** Кӯҳнашавии оптикии маводи модули фотоэлектрикӣ метавонад на танҳои ҷараёнро коҳиш диҳад, балки шароити фурӯбурди радиатсияи офтобиро дар қабатҳои муҳофизатӣ низ тағйир диҳад [3]. Ҳангоми нобаробарии маҳаллии параметрҳои оптикӣ ва электрикӣ мн ҳолат метавонад ба ташаккули минтақаҳои дорои гармиҷудокунӣ мусоидат намуда, ба элементҳои алоҳидаи модул сарбории иловагии ҳароратӣ эҷод кунад. Дар натиҷа, занҷири бо ҳам алоқаманди равандҳои таназзулӣ ташакул меёбад. «Кӯҳнашавии маводи полимерӣ хусусиятҳои оптикӣ ва ҳароратии модулро тағйир медиҳад дар навбати худ, ҳарорати баланд метавонад таназзули маводро суръат бахшида, параметрҳои электрикии фотоэлементҳоро бадтар намояд, ки пеш аз ҳама дар коҳиш ёфтани шиддати кори бебор (U_{oc}) ва иқтидори максималии истеҳсолӣ (P_{max}) зоҳир мегардад» [4].

Ҳамин тариқ, дар муқоиса бо модули нави фотоэлектрикӣ, ки дар он баланд шудани ҳарорат бо афзоиши ночизи ҷараёни расиши кӯтоҳ (I_{sc}) ҳамроҳ мешавад, дар модули муддати дароз истифодашуда таъсири ҳарорат метавонад дар шакли коҳиши комплексии нишондиҳандаҳои энергетикӣ зоҳир гардад. Коҳиши назарраси шиддати кори бебор (U_{oc}) дар ҳолати мавҷуд набудани афзоиши интизоршавандаи ҷараёни расиши кӯтоҳ (I_{sc}) дар натиҷаи коҳиш ёфтани гузарониши рӯшноӣ тавассути маводи таназзулшуда. Ин ҳолат боиси коҳиши иловагии иқтидори максималии истеҳсолӣ (P_{max}) ва дар натиҷа, паст шудани самаранокии воқеии энергетикии модули фотоэлектрикӣ мегардад.

Механизми ба вуҷуд омадани таназзули оптикии МФЭ. Дар ҷараёни истифодабарӣ дар шароити воқеии иқлимӣ модули фотоэлектрикӣ ба таъсири комплексии (маҷмуӣ) омилҳои беруна, аз ҷумла намнокии баланд, радиатсияи шадиди ултробунафш ва тағйирёбии даврии ҳарорат дучор мешавад. Таъсири якҷояи ин омилҳо тадриҷан хусусиятҳои физикию кимиёвии маводи полимерӣ ва муҳофизатии модулро тағйир дода, барои рушди равандҳои таназзулӣ шароит фароҳам меоранд [4]. Тибқи расми пешниҳодшудаи муаллиф [75]

(расми 2.5), яке аз омилҳои асосии оғозкунандаи ин раванд воридшавии намӣ ба сохтори модул тавассути минтақаҳои канорӣ, кафидаҳои хурд (микротрещены) ва осебҳои қабати муҳофизатии пушти модул мебошад.



Расми 2.5. – Тавири схемавии раванди воридшавии намӣ ва таназзули минбаъдаи ҷузъҳои модули фотоэлектрикӣ ҳангоми истифодабарии дарозмуддат [75].

Ин раванд маҷмуи механизмҳои ба ҳам алоқаманди таназзулиро ба вуҷуд меорад, ки ба тавсифоти электрикӣ ва истифодаи модули фотоэлектрикӣ таъсири назаррас мерасонад. Дар доираи таҳқиқоти анҷомдодашуда, муаллиф [75] таснифи намудҳои асосии таназзулиро аз рӯйи якчанд самти функционалӣ пешниҳод намудааст.

Ба гурӯҳи якум таназзули оптикии қабати инкапсулятсионӣ дохил мешавад, ки бо бад шудани хусусиятҳои рӯшноигузаронии сохтори модул ҳамроҳ мегардад. Яке аз зуҳуроти маъмултарини он ҷудошавии қабатҳои (деламинатсия) вайрон шудани пайвасти адгезионӣ байни шишаи муҳофизатӣ, плёнкаи EVA (маводи термопластикии чандир, мустаҳкам ва шаффоф) ва сатҳи элементҳои фотоэлектрикӣ мебошад. Дар натиҷаи вайроншавии маҳалии пайвастшавӣ метавонад фосилаҳои ҳавоӣ ва дигар нобаробариҳои сохторӣ ба вуҷуд оянд, ки ба воридшавии намӣ, тағйир ёфтани шароити гузаштани радиатсияи офтобӣ ва минбаъд суръат гирифтани равандҳои таназзулӣ мусоидат мекунад.

Зуҳуроти дигари ин раванд тағйир ёфтани ранг (берангшавӣ) маводи полимерӣ мебошад, ки бо тағйирёбии фотокимёвии сохтори EVA дар зери таъсири радиатсияи офтобии ултрабунафш ва ҳарорати баланд алоқаманд аст.

Зардшавӣ ва тирашавии инкапсулант боиси коҳиш ёфтани зариби гузарониши инсолятсияи (радиатсия) офтобӣ, кам шудани шиддатнокии радиатсияе, ки ба сатҳи фотоэлементҳо мерасад ва дар маҷмуъ, ба коҳиш ёфтани фоточараёни истеҳсолшаванда ва иқтидори тавлидии модул оварда мерасонад.

Ба гурӯҳи дуюм равандҳои коррозияи (зангзанӣ) кимиёвии элементҳои ҷараёнгузари модули фотоэлектрикӣ дохил мешавад. Дар зери таъсири намӣ, оксиген ва маҳсулоти пиршавии термооксидшавии маводи полимерӣ оксидшавии тадричӣ ва вайроншавии коррозиявии элементҳои металии ҷараёнгузар, аз ҷумла ноқилҳои нуқрагӣ ва мисӣ, ба амал меояд. Шадидияти ин равандҳо ҳангоми баланд будани намнокӣ ва такроршавии даврaҳои гармшавӣ ва хунукшавӣ афзоиш ёфта, барои воридшавии намӣ ва суръат гирифтани реаксияҳои кимиёвӣ шароити иловагӣ фароҳам меорад.

Яке аз зуҳуроти хоси визуалии таназзул “нишонаҳо ё пайҳои ҳалзун” (snail trails) мебошанд, ки ин сохторҳои торики хаттӣ ё камоншаклро дар сатҳи элементҳои фотоэлектрикӣ пайдо мекунад. Пайдошавии онҳо одатан бо мавҷудияти шикатан, микрокафиданҳо (трещены) дар пластинаи кремнӣ, воридшавии намӣ ба минтақаҳои осебдида ва рушди минбаъдаи равандҳои маҳаллии кимиёвӣ ва коррозиявӣ алоқаманд мебошад.

«Ҳамин тариқ “нишонаҳо ё пайҳои ҳалзун” метавонад ҳамчун аломати ташхисии берунии равандҳои бо ҳам алоқаманди пайдоиши микрокафидаҳо, воридшавии намӣ ва таназзули маҳаллии мавод баррасӣ шаванд, ки метавонанд ба бад шудани алоқаи электрикӣ ва коҳиш ёфтани нишондиҳандаҳои истеҳсолии модули фотоэлектрикӣ оварда расонад» [8].

Ба гурӯҳи сеюм осебҳои физикию механикии элементҳои сохтори модули фотоэлектрикӣ дохил мешаванд. Ба нуқсонҳои муҳимтарин микрокафидаҳо ва кафидаҳои пластинаҳои кремнӣ дохил мешаванд, ки дар

натиҷаи таъсири сарбориҳои механикӣ, деформатсияҳои ҳароратӣ ва таъсири ларзиш ҳангоми интиқол, насб ва истифодаи дарозмуддат ба вуҷуд меояд. Мавҷудияти чунин осебҳо тақсимоти ҷараёни электрикиро дар дохили фотоэлемент вайрон намуда, муқовиматҳои маҳаллии барқиро зиёд мекунад ва метавонад барои воридшавии намӣ ва пайвастагиҳои кимиёвии фаъол ба сохтори модул роҳҳои иловагӣ ба вуҷуд орад.

Таъсири комплексии омилҳои таназзулии баррасишуда боиси тадриҷан бад шудани тавсифоти оптикӣ ва электрикии модули фотоэлектрикӣ мегардад. Тағйир ёфтани ҳолати маводи инкапсулатсионӣ ва муҳофизатӣ, пайдо шудани микрокафидаҳо ва нобаробариҳои маҳаллӣ метавонанд воридшавии самараноки инсолятсияи (радиатсия) фотобиро ба қабати нимноқили фаъол коҳиш дода, равандҳои фотоистеҳсол ва ҷараёнгункуниро ҳалалдор намояд.

Дар натиҷа, ҷараёни расиши кӯтоҳ ва иқтидори максималии истеҳсолӣ коҳиш ёфта, талафоти дохилӣ зиёд мешаванд ва бад шудани маҳаллии гармигузаронӣ ва ҷараёнгузаронӣ метавонад ба боз ҳам баланд шудани ҳарорати кории модул мусоидат намояд. Аз ин рӯ, механизмҳои алоҳидаи таназзул мустақим аз ҳам намбуда, балки занҷири бо ҳам алоқамандро ташаккул медиҳанд, ки дар он осеби ибтидоии як элементи сохторӣ метавонад рушди минбаъдаи равандҳои таназзулиро суръат бахшад.

Усулҳои назорати вайроннашаванда ва тасдиқи тағйироти ғайримуқаррарии ҳароратӣ:

Барои муайян намудани сабабҳои ба вуҷуд омадани гармшавии маҳаллӣ (“нуқтаҳои гарм”) ва минтақаҳои таназзулӣ дар таҳқиқот маҷмуи усулҳои ташхиси вайроннашаванда истифода шудааст, ки имкон медиҳанд тақсимоти ҳарорат дар сатҳи модули фотоэлектрикӣ бо хусусият ва ҷойгиршавии нуқсонҳои физикии он муқоиса карда шавад.

Чунин равиш имкон медиҳад, ки на танҳо тағйироти ғайримуқаррарии ҳароратӣ ба таври визуалӣ муайян карда шавад, балки робитаи онҳо бо вайроншавии сохтор, пайвастаҳои электрикӣ ва ҳолати маводи муҳофизатӣ низ муқаррар карда шавад.

А. Флуоресценсияи ултрабунафш (UV-F). Усули флуоресценсияи ултрабунафш ба қобилияти маҳсулоти таназзули қабати полимерии инкапсулатсионии EVA барои тағйир додани шиддатнокии флуоресценсия дар зери таъсири радиатсияи ултрабунафш асос ёфтааст. Дар қитъаҳои дорои дараҷаи баланди таназзул, минтақаҳои флуоресценсияи суст ё “доғҳои торик” мушоҳида мешаванд, ки аз тағйироти фотокимиёвии мавод, аз ҷумла равандҳои камрангшавии фотоӣ (photobleaching) ва хомӯшшавии фотоӣ (photoquenching), шаҳодат медиҳанд.

Муқоисаи маълумоти UV-F бо натиҷаҳои таҳқиқоти тепловизионӣ робитаи фазоиро байни қитъаҳои таназзули полимер ва минтақаҳои гармшавии маҳаллӣ нишон медиҳад. «Ин ҳолат тасдиқ менамояд, ки таназзули қабати инкапсулатсионӣ метавонад ба ташаккули тағйироти ғайримуқаррарии ҳароратӣ ва коҳиш ёфтани самаранокии кори модули фотоэлектрикӣ мусоидат кунад» [8].

Б. Электролюменессенсия (EL). Усусли электролюменессенсия барои ошкор намудани нуқсонҳои пинҳонии модулҳои фотоэлектрикӣ, аз ҷумла микрокафидаҳо, осеби пайвастаҳои тамосӣ, коррозия ва ҷудошавии қабатҳои дохилӣ истифода мешавад. Дар тасвирҳои электролюменессентӣ минтақаҳои нуқсондор дар шакли қитъаҳои торик зоҳир мешаванд, ки ба минтақаҳои аз ҷиҳати электрикӣ ғайрифаъоли элементҳои офтобӣ мувофиқат мекунанд.

Мавҷудияти чунин нуқсонҳо боиси аз нав тақсим шудани ҷараёни электрикӣ мегардад, ки дар натиҷа ҷараён дар минтақаҳои маҳдуд мутамарказ шуда, роҳҳои иловагии гузариши он ба вуҷуд меоянд. Ин раванд ба зиёд шудани зичии маҳаллии ҷараён ва шиддатнокии гармшавӣ мусоидат мекунад.

Дар натиҷа метавонанд “нуқтаҳои гарм” ба вуҷуд оянд, ки тавассути усули термографияи инфросурх ошкор карда мешаванд. Ин аз робитаи байни нуқсонҳои сохторӣ, тағйироти ғайримуқаррарии ҳароратӣ ва коҳиш ёфтани нишондиҳандаҳои истифодабарии модули фотоэлектрикӣ шаҳодат медиҳад.

Тавсифи математикии равндҳои термодинамикӣ дар минтақаҳои нуқсондор. Барои амиқ дарк намудани сабабҳои гармшавии маҳаллии

модулҳои фотоэлектрикӣ таҳлили механизми табдилёбии энергияи электрикӣ ба энергияи гармӣ дар минтақаҳои пайдоиши нуқсонҳо, аз ҷумла таназзули оптикӣ, коррозия ва микрокафидаҳо зарур мебошад. Чунин таҳлил имкон медиҳад, ки робитаи байни хусусияти нуқсон, талафоти маҳаллии энергияи электрикӣ ва ташаккули тағйироти ғайримуқаррарии ҳароратӣ муайян карда шавад.

1. Иқтидори парокандашавии гармӣ дар минтақаи нуқсондор (P). Тибқи таҳқиқоти корӣ [114], иқтидоре, ки дар минтақаҳои нуқсондори элементи офтобӣ дар шакли гармӣ пароканда мешавад, бо параметрҳои геометрӣ ва электрофизикии қитъаи осебдида мувофиқи муодилаи 2.3 муайян карда мешавад:

$$P = I^2 R = I^2 \frac{\rho_D \cdot l_D}{A_D} \tag{2.3}$$

Ин ҷо:

- I – ҷараёне, ки аз элементи фотоэлектрикӣ мегузарад;
- R – муқовимат дар минтақаи нуқсон;
- ρ_D – муқовимати хос дар минтақаи нуқсон (Ω·м);
- l_D – дарозии хоси роҳи гузариши ҷараён дар минтақаи нуқсон;
- A_D – масоҳати самараноки буриши қитъаи нуқсондор.

2. Вобастагии муқовимати хос аз зичии ҷараён. Муаллифи кори [115], робитаи муҳими таҳлилро байни муқовимати хоси минтақаи нуқсондор (ρ_D), шиддатнокии майдони электрикӣ (E_D) ва зичии маҳалии ҷараён (J_D) дар минтақаи тағйироти ғайримуқаррарии ҳароратӣ ворид намудааст, ки бо муодилаи 2.4 ифода карда мешава:

$$\rho_D = \frac{E_D}{J_D} \tag{2.4}$$

Ин вобастагӣ имкон медиҳад, ки механизми физикии пайдоиши “нуқтаҳои гарм” дар минтақаҳои дорои таназзули оптикӣ ё коррозияи шабакаи ҷараёнгузар аз нигоҳи физикӣ шарҳ дода шавад. Дар чунин минтақаҳои зичии

маҳаллии ҷараён J_D ҳангоми нигоҳ доштани шиддатнокии майдони электрикӣ E_D ё зиёд шудани он коҳиш меёбад. Дар натиҷа, муқовимати хоси минтақаи нуқсондор ба таври маҳаллӣ зиёд шуда, ин ҳолат бо афзоиши талафоти неруи барқ ва ҷудошавии иловагии гармии Ҷоулӣ ҳамроҳ мегардад. Маҳз маҳаллисозии чунин талафоти гармӣ барои ташаккули тағйироти ғайримуқаррарии ҳароратӣ "нуқтаҳои гарм" шароит фароҳам меорад.

3. Вобастагии ҳароратии муқовимати хоси модули таназзулшудаи фотоэлектрикӣ. Воситаи асосӣ барои муайян намудани зариби ҳароратӣ аз рӯйи маълумоти термографияи инфрасурх модели вобастагии муқовимати хос аз ҳарорат мебошад, ки бо муодилаи 2.5 пешниҳод карда шудааст:

$$\rho_D = \rho_{ref}[1+\beta(T_D - T_{ref})] \qquad (2.5)$$

Ин ҷо:

– ρ_{ref} – муқовимати хоси истинодӣ ҳангоми ҳарорати 25 °C (T_{ref});

– T_D – ҳарорати воқеии минтақаи нуқсондор, ки тавассути тепловизор чен карда мешавад;

– β – зариби ҳароратии муқовимати хос, ки дар модулҳои таназзулшуда бо зариби ҳароратии иқтидор (βp_{max}) вобастагӣ дорад.

Истифодаи низоми мазкури муодилаҳо имкон медиҳад, ки таназзули ҳароратии МФЭ на танҳо таъсири берунии гармӣ, балки тағйирёбии хусусиятҳои дохилии электрофизикии маводи таназзулшуда низ мебошад. Баланд шудани ҳарорати минтақаҳои нуқсондор T_D боиси тағйир ёфтани муқовимати он гардида, дар навбати худ ба бузургии иқтидори парокандашавандаи гармӣ (P) таъсир мерасонад.

Аз ин сабаб, занҷири бо ҳам алоқаманди таъсири ҳароратӣ ва электрикӣ ташаккул меёбад, ки фарзияи пешниҳоднамудаи муаллифи кори [115]-ро оид ба мавҷудияти даври сарбастаи таназзули ҳароратӣ дар шароити истифодабарӣ тасдиқ менамояд.

Бо вуҷуди мавҷудияти моделҳои назариявӣ ва таҷрибавии таназзули ҳароратии модулҳои фотоэлектрикӣ, хусусият ва шиддатнокии ин равандҳо аз шароити иқлими истифодабарӣ, сарбориҳои ҳароратӣ ва хусусиятҳои

конструктивии модулҳо ба таври назаррас вобаста мебошанд. Ин масъала махсусан барои минтақаҳои дорои инсолятсияи баланди офтобӣ ва иқлими гарм, аз ҷумла ноҳияҳои ҷанубии Ҷумҳурии Тоҷикистон, аҳамияти муҳим дорад. Вобаста ба ин, барои санҷиши таҷрибавии қонуниятҳои баррасишуда ва арзёбии миқдории талафоти ҳароратии иқтидори истеҳсоли модулҳо, аз ҷониби муаллифи рисола, таҳқиқот дар шароити воқеии истифодабарии модулҳои фотоэлектрикӣ гузаронида шудааст, ки дар зербоби баъдӣ оварда мешавад.

2.4. Таҳқиқоти таҷрибавӣ оид ба таъсири ҳарорат ба самаранокии модулҳои фотоэлектрикӣ

«Ҳадафи таҳқиқоти таҷрибавӣ тасдиқи қонуниятҳои назарявии муайяншудаи таъсири ҳарорат ба самаранокии модулҳои фотоэлектрикӣ инчунин арзёбии миқдории талафоти ҳароратӣ дар шароити воқеии истифодабарӣ мебошад» [3], [83]. Диққати махсус ба муқоисаи вобастагиҳои ҳисобӣ бо натиҷаҳои воқеии ченкуниҳо равона карда мешавад, ки имкон медиҳад, мувофиқати моделҳои математикии баррасишуда арзёбӣ карда шавад.

«Дар шароити муосири рушди энергетикаи офтобӣ яке аз омилҳои асосии муайянкунандаи устуворӣ ва самаранокии энергетикии низомҳои фотоэлектрикӣ реҷаи ҳароратии он мебошад» [41]. Бо вуҷуди сатҳи баланди инсолятсияи офтобӣ дар минтақаҳои ҷанубии Ҷумҳурии Тоҷикистон, истифодаи модулҳои фотоэлектрикӣ бо таъсири ҳарорати баланди муҳити атроф, радиатсияи шадиди офтобӣ ва ғуборолудии назарраси атмосфера ҳамроҳ мебошад [3]. «Таъсири комплексии омилҳои зикршуда параметрҳои электрикии модулҳои фотоэлектрикиро тағйир дода, метавонад боиси коҳиши назарраси самаранокии табдил додани энергияи офтоб ба неруи барқ гардад» [3]. Аз ин сабаб, арзёбии таҷрибавии талафоти ҳароратӣ марҳалаи зарурии муайян намудани хусусиятҳои воқеии истифодаи низомҳои фотоэлектрикӣ дар шароити Ҷумҳурии Тоҷикистон мебошад.

Барои элементҳои фотоэлектрикии кремний вобастагии манфии ҳароратии шиддат хос мебошад. Ҳангоми баланд шудани ҳарорати элементи фотоэлектрикӣ паҳноии минтақаи мамнуи нимноқил коҳиш ёфта, ин раванд боиси паст шудани шиддати кори бебор ва иқтидори истеҳсолии модул мегардад. Ҳамзамон, баланд шудани ҳарорат танҳо ба афзоиши ночизи ҷараёни расиши кӯтоҳ оварда мерасонад, ки барои ҷуброн намудани талафоти шиддат нокифоя мебошад. Дар натиҷа, зариби умумии фоиданокии табдилдиҳандаи фотоэлектрикӣ коҳиш меёбад.

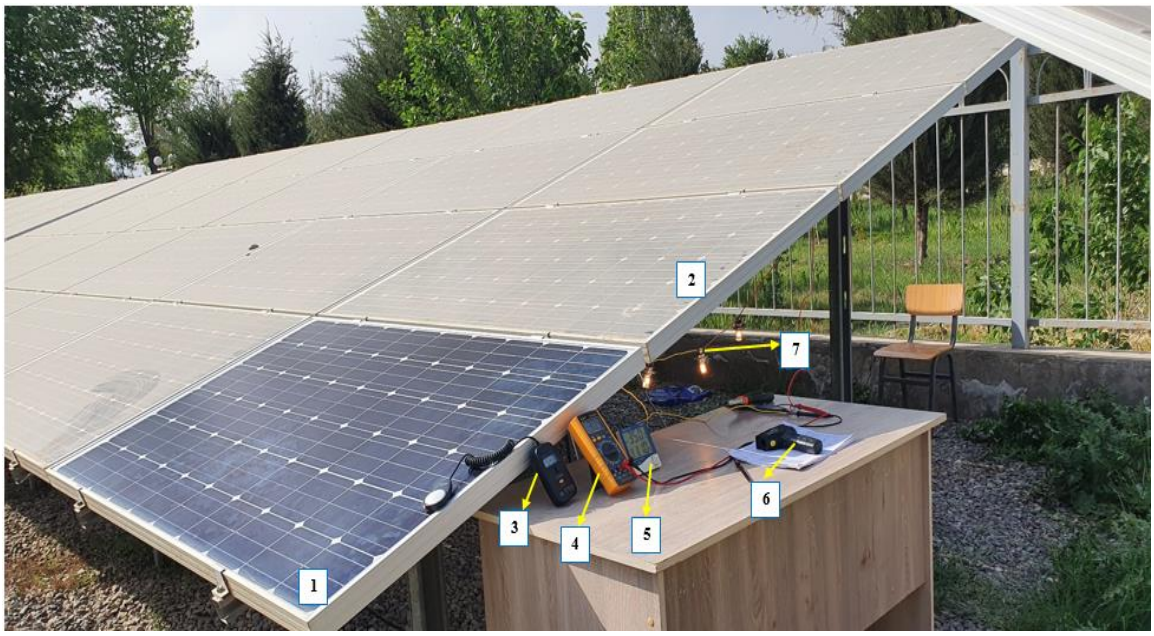
Ин падида махсусан дар шароити иқлими ноҳияиҳои ҷанубии Тоҷикистон равшан зоҳир мегардад, ки дар давраи баҳору тобистон ҳарорати сатҳи модулҳо метавонанд аз 60-70 ^{o}C зиёд шавад. Дар якҷоягӣ бо радиатсияи офтобии баланд ва чанголудшавии сатҳ ин омилҳо боиси боз ҳам коҳиш ёфтани нишондиҳандаҳои кории неругоҳҳои барқи офтобӣ гардида, барои суръат гирифтани равандҳои таназзулии (деградатсия) модулҳои фотоэлектрикӣ шароит фароҳам меоранд.

Дар доираи таҳқиқоти диссертатсионӣ маводи корҳои таҷрибавие истифода шудаанд, ки дар заминаи Донишкадаи энергетикии Тоҷикистон дар ҳамкорӣ бо И.М. Кирпичникова, И.Б. Махсумов, А.Н. Давлатзода ва В.В. Шестакова анҷом дода шудаанд. Таҳқиқоти таҷрибавӣ дар неругоҳи барқи офтобии автономӣ бо иқтидори 10 кВт, ки дар ноҳияи Кӯшониён, вилояти Хатлон, дар заминаи кафедраи манбаъҳои алтернативии энергияи Донишкадаи энергетикии Тоҷикистон ҷойгир шудааст, гузаронида шуданд [38, 76-77].

Маҳали гузаронидани таҳқиқоти таҷрибавӣ дар баландии 419 м аз сатҳи баҳр ҷойгир буда, координатаҳои ҷуғрофии он 37,872^{o} арзи шимолӣ ва 68,724^{o} тӯли шарқӣ мебошанд [68]. Дар таҳқиқот ду модули монокристалии фотоэлектрикии навъи SOLARMODUL ALEO S19 HE 300W Superchardeg истифода шуданд. Модулҳо бо кунҷи майлонии 45^{o} ва самтгирии ҷанубу ғарбӣ насб карда шудаанд.

Яке аз модулҳо дар давоми таҳқиқоти таҷрибавӣ мунтазам аз ифлосиву чанг тоза карда мешуд, дар ҳоле ки сатҳи модули дуюм ба ҷамъшавии табиии

чанг дучор мегардид. Чунин равиш имкон дод, ки таъсири якҷояи ҳарорат ва ифлосшавии сатҳ ба тағйирёбии нишондиҳандаҳои энергеткии модулҳои офтобӣ арзёбӣ карда шавад. Намуди зоҳирии дастгоҳи таҷрибавӣ дар расми 2.6 оварда шудааст.



Расми 2.6. – **«Намуди зоҳирии дастгоҳи таҷрибавӣ барои муайян намудани истеҳсоли неруи барқ аз модулҳои фотоэлектрикӣ дар шароити ноҳияи Кӯшониён, ҶТ:** ***(1 – модули фотоэлектрикии тозашуда; 2 – модули фотоэлектрикии чанголуд ифлосшудаи табиӣ; 3 – люксметри рақамии навъи MS6610; 4 – мултиметри рақамии навъи CHYVictorVC890D; 5 – термометр/гидрометри навъи TH90; 6 – термометри инфрасурхи навъи IR01D; 7 – лампаҳои галогенӣ)» [41], [78].***

Барои назорати параметрҳои ҳароратӣ термометри инфрасурхи навъи IR01D истифода карда шуд. Ҳарорати ҳавои муҳити таҷрибагузаронӣ ва намнокии нисбии ҳаво бо ёрии термогигрометри TH90 муайян карда шуданд.

Қиматҳои инсолятсияи (радиатсия) офтобӣ тавассути люксиметри рақамии навъи MS6610 сабт карда шудаанд.

Эзоҳ. Азбаски ченкунии радиатсияи офтобӣ бо истифодаи люксметр гузаронида шудааст, қиматҳои ибтидоии бадастомадаи равшаннокӣ бо люкс (лк) ифода гардиданд (замимаи 1). Барои табдили нисбии онҳо ба зичии радиатсияи офтобӣ, ки бо Вт/м^2 ифода мешавад, самаранокии равшании радиатсияи офтобӣ истифода шудааст. Дар ҳисобкуниҳо зариби миёнаи K =

93лм/Вт қабул гардид, ки имкон медиҳад ҷузъи радиатсионии нури офтоб аз рӯйи равшаннокии ченшуда ба таври нисбӣ арзёбӣ карда шавад.

Табдилдиҳии равшаннокӣ ба зичии радиатсия офтобӣ бо вобастагии зерин ҳисоб карда шудааст:

$$G = \frac{E_{\upsilon}}{K}, \tag{2.6}$$

Ин ҷо G – зичии нисбии радиатсияи офтобӣ, Вт/м^2; E_{υ} – равшаннокии ченшуда, лк; K – самаранокии қабулшудаи равшанӣ, лк/Вт, қимматаш баробар ба 93 қабул карда шудааст.

Масъалан ҳангоми равшаннокии ченшудаи E_{υ} = 92000 лк, (ҷадвали замимаи 1) қимати зерин ба даст оварда мешавад:

$$G = \frac{E_{\upsilon}}{K} = \frac{92000}{93} \approx 989\,\text{Вт/м}^2 \tag{2.7}$$

Ҳамин тариқ, барои таҳлили минбаъдаи кори модули фотоэлектрикӣ дар раванди гузаронидани таҳқиқоти таҷрибавӣ ҳамаи қиматҳои ченшуда равшаннокӣ бо истифодаи люксметр бо ин усули баррасишуда ба зичии радиатсия офтобӣ бо қиматҳои тақрибӣ табдил дода шудаанд [116]. Зеро барои дақиқ муайян кардани инсолятсия (радиатсия) офтобӣ истифодаи асбоби радиометрӣ (пиранометр) ё ба назар гирифтани таркиби воқеии спектралии радиатсияи офтобӣ зарур мебошад.

Параметрҳои электрикии модулҳои фотоэлектрикӣ бо мултиметри рақамии навъи CHYVictorVC890D чен карда шудаанд.

Таҳқиқоти таҷрибавӣ моҳи апрели соли 2023 дар давоми якчанд рӯз пай дар пай, дар давраи оғози падидаҳои мавсимии чанголудшавӣ гузаронида шуданд. «Ҷенкуниҳо ҳар рӯз аз соати 11:00 то 16:00 анҷом дода шудаанд, ки дар ин фосила шиддатнокии инсолятсияи офтобӣ баланд буда, мутаносибан гармшавии модулҳои фотоэлектрикӣ низ бештар зоҳир мегардад» [3], [8], [38].

«Дар таҳқиқоти таҷрибавӣ параметрҳои зерин ба қайд гирифта шудаанд» [3], [22]:

- ҳарорати ҳавои муҳит;

- ҳарорати сатҳи пеши модули фотоэлектрикӣ;
- ҳарорати сатҳи пушти модули фотоэлектрикӣ;
- шиддатнокии инсолятсияи (офтобӣ);
- намнокии нисбии ҳаво;
- суръати бод (шамол);
- шиддат ва ҷараёни истеҳсолии модулҳои фотоэлектрикӣ [3];
- иқтидори истеҳсолии модули фотоэлектрикӣ.

Дар ҷадвали 2.3 асбобҳо ва таҷҳизоти истифодашуда дар таҳқиқоти таҷрибавӣ оварда шудаанд.

Ҷадвали 2.3. – Асбобҳо ва таҷҳизоти истифодашуда ҳангоми гузаронидани таҳқиқоти таҷрибавӣ

Номгӯи асбобҳо	**Навъи асбобҳо**	**Шумораи асбобҳо, дона**
Модули монокристаллии фотоэлектрикӣ	SOLARMODUL ALEO S19 HE 300W Supercharged	2
Лампаҳои галогенӣ	МАЯК 12V/60/80W	3
Мултиметри рақамӣ	CHY Victor VC890D	1
Термометри инфрасурх	IR01D	1
Термометр бо функсияи ченкунии намии ҳаво	TH90	1
Люксметри рақамӣ	Mastech MS6610	1
Смартфон бо дастрасӣ ба интернет	Samsung Galaxy S10e	1

Тавсифоти техникии модулҳои фотоэлектрикии навъи SOLARMODUL ALEO S19 HE 300W Supercharged, ки дар низоми автономии фотоэлектрикӣ насб гардида, ҳамчун объекти таҳқиқоти таҷрибавӣ истифода шудаанд, дар ҷадвали 2.4 оварда шудаанд [38]. Маълумоти мазкур барои таҳлили кори модулҳо дар шароити воқеии истифодабарӣ, муқоисаи параметрҳои номиналӣ бо натиҷаҳои таҷрибавӣ ва муайян намудани таъсири ҳарорат ба тавсифоти электрикӣ ва энергетикии онҳо истифода шудааст.

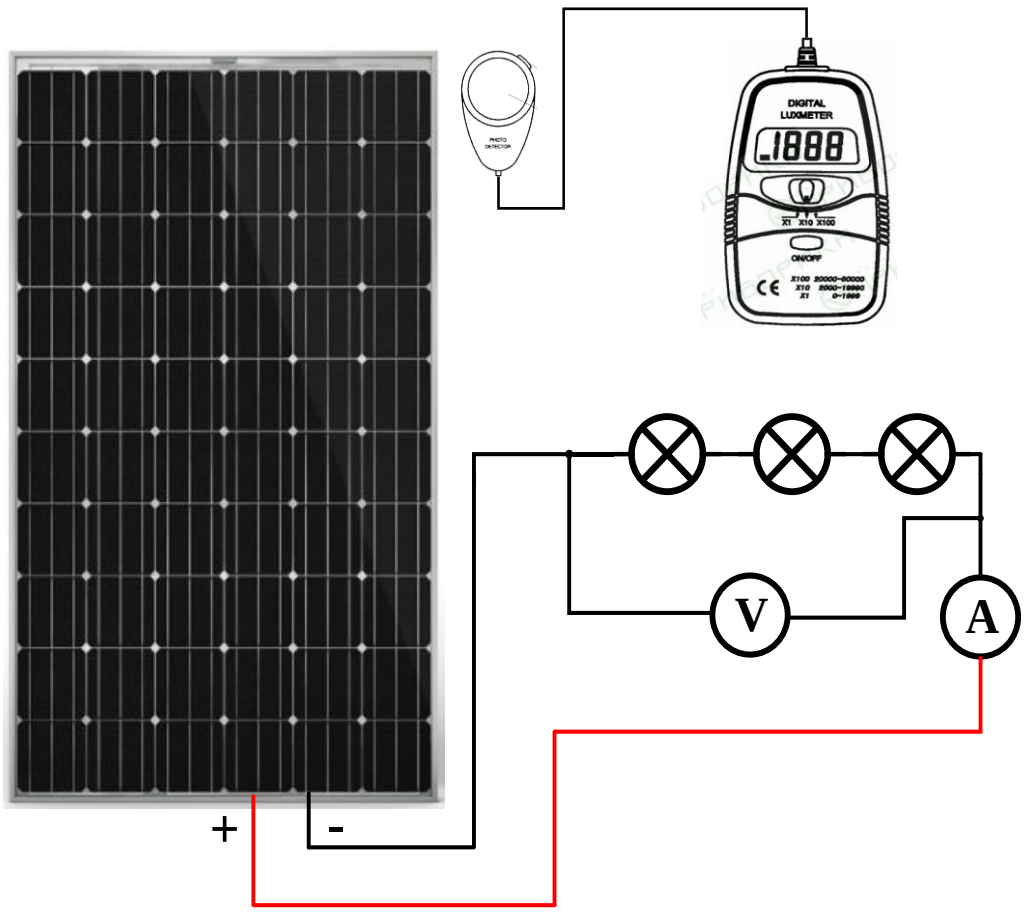
Ҷадвали 2.4. – Тавсифотҳои техникии модули фотоэлектрикии навъи SOLARMODUL ALEO S19 HE 300W Supercharged [38].

Номи параметрҳо	Ишораҳои ҳуруфӣ	Нишондиҳандаҳои параметрҳо
Иқтидори баландтарини (максималӣ) электрикӣ	$P_{\max}$	300 Вт
Шиддат дар нуқтаи иқтидори максималӣ	U_{mp}	31,2 В
Ҷараён дар нуқтаи иқтидори максималӣ	I_{mp}	9,63 А
Ҷараёни расиши кӯтоҳ	I_{sc}	9,97 А
Шиддати кори бебор	U_{oc}	39,4 В
Зариби ҳароратӣ аз рӯйи ҷараён	K_I	+0,05%/К
Зариби ҳароратӣ аз рӯйи шиддат	K_u	-0,29%/К
Зариби ҳароратӣ аз рӯйи иқтидори максималӣ	γ_{Pmpp}	-0,40%/К
ЗКФ-и модули фотоэлектрикӣ	η	16,7%
Андозаҳои модули фотоэлектрикӣ	ДхҒхБ	1660 х 990 х 50 мм
Шароити стандартии санҷиш	(STC)	1000W / м^2; AM 1,5; 25 ℃
Шумораи элементҳо (ячейкаҳо)	(10 х 6)	60

Дар ҷараёни таҳқиқот муайян карда шуд, ки ҳарорати сатҳи модулҳои фотоэлектрикӣ аз ҳарорати ҳавои муҳит ба таври назаррас баландтар мебошад. Ҳангоми ҳарорати ҳаво 35-37 ^oC будан, ҳарорати сатҳи болои модул ба 55-60 ^oC расида, ҳарорати сатҳи пушти он дар баъзе соатҳо аз 65 ^oC зиёд мегардад. Гармшавии шадидтарини сатҳи модул дар давраи аз соатҳои 12:00 то 14:00 мушоҳида шуд, ки ба давраи шиддатнокии максималии радиатсияи офтобӣ мувофиқат мекард.

«Таҳлили маълумоти бадастомадаи таҳқиқоти таҷрибавӣ дар манбаи [3] овардашуда нишон дод, ки бо баланд шудани ҳарорати кории модули фотоэлектрикӣ шиддати истеҳсолии он коҳиш меёбад, дар ҳоле ки тағйирёбии ҷараён нисбатан ночиз боқӣ мемонад» [4]. Дар натиҷа, коҳиши ҳароратии шиддат ба иқтидори истеҳсолии модул таъсири муайянкунанда расонида,

ҳангоми баланд шудани ҳарорати модул боиси коҳиш ёфтани он мегардад. Дар расми 2.7 нақшаи электрикии дастгоҳи таҳқиқотӣ нишон дода шудааст.



Расми 2.7. – Нақшаи электрикии дастгоҳи таҷрибавии таҳқиқот

Таъсири ҳароратӣ ҳангоми мавҷуд будани ифлосшавии чанголуд дар сатҳи модул махсусан шиддат мегирифт. Зарраҳои чанги дар сатҳи нишасташуда самаранокии мубодилаи гармиро бо муҳити атроф коҳиш дода, ба гармшавии иловагии сатҳ мусоидат мекарданд. Дар натиҷа, ҳарорати модули ифлосшуда ба ҳисоби миёна нисбат ба модули тозашуда чанд дарача баландтар буд. Натиҷаҳои ченкуниҳо нишон доданд, ки баланд шудани ҳарорати сатҳи модули фотоэлектрикӣ бо киҳиш ёфтани самаранокии энергетикии он ҳамроҳ мешавад. Ҳангоми ҳарорати сатҳ аз 50 ^{o}C баланд шудан, коҳиши назарраси иқтидори истеҳсолӣ мушоҳида гардид ва ҳангоми минбаъд баланд шудани ҳарорат коҳиши истеҳсоли иқтидор боз ҳам бештар зоҳир гардид.

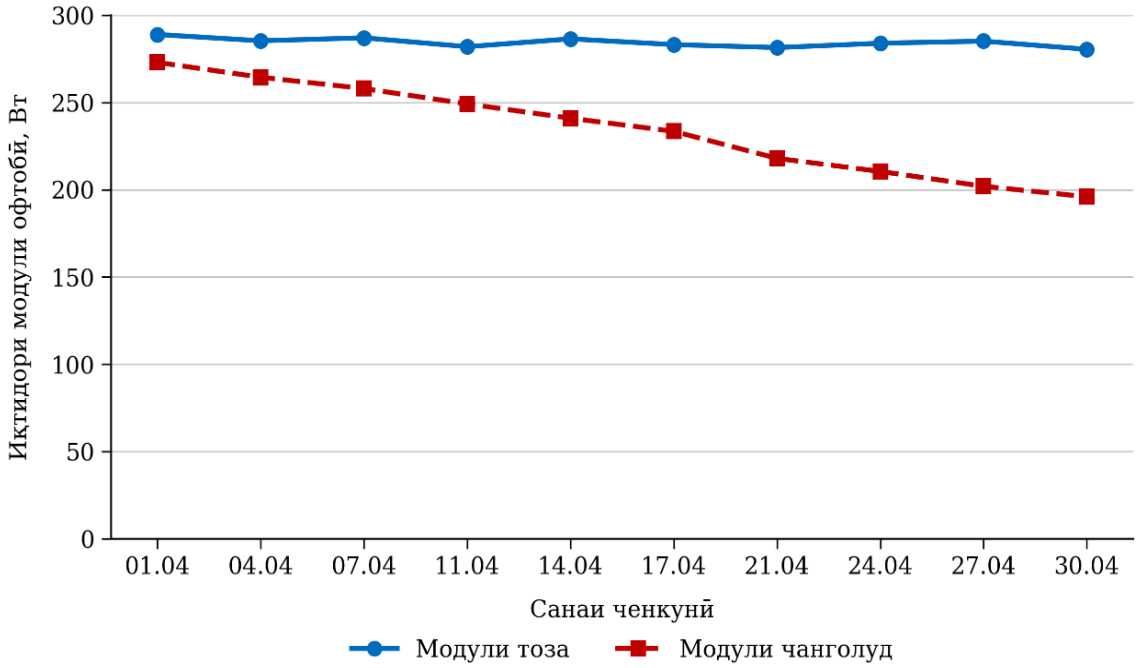
Таҳлили муқоисавии хусусиятҳои модулҳои тозабуда ва ифлосшуда нишон дод, ки модули чанголуд дар амал дар тамоми диапазони таҳқиқшудаи шароити истифодабарӣ бо иқтидори истеҳсолии камтар тавсиф мешуд. Коҳиши аз ҳама зиёди иқтидор дар соатҳои гармшавии максимаалии сатҳ мушоҳида гардид, ки дар ин вақт ҳамзамон талафоти ҳароратӣ ва таъсири ифлосшавии чанголуд зиёд мешуданд.

Қиматҳои миёнаи иқтидори модули тозашуда дар баъзе даврaҳо 280,5-289 Вт-ро ташкил медоданд, дар ҳоле ки иқтидори модули ифлосшуда то 196-273 Вт паст мегардид. Дар шароити ҳавои абрнок ва намнокии баланди ҳаво коҳиши иқтидор бештар зоҳир гардид. Натиҷаҳои бадастомада таъсири манфии баланд шудани ҳарорати сатҳи модулҳои фотоэлектрикиро ба нишондиҳандаҳои кории онҳо тасдиқ менамоянд (замимаи 1).

Ҳамзамон, мавҷудияти ифлосшавии чанголуд сарборii ҳароратиро зиёд намуда, самаранокии табдил додани энергияи офтобро боз ҳам коҳиш медиҳад.

Дар ҷараёни таҳлили маълумоти таҳқиқоти таҷрибавӣ муайян карда шуд, ки ҳангоми ҳарорати сатҳ тақрибан 60 ^{o}C будан, иқтидори истеҳсолии модули фотоэлектрикӣ нисбат ба шароити стандартии озмоиш метавонад ба 15-20% расад. Ҳангоми муддати дароз тоза накардани сатҳи модул талафоти самаранокӣ метавонад дар натиҷа таъсири комплексии омилҳои ҳароратӣ ва чанголудшавӣ боз ҳам зиёд шавад. Барои арзёбии возеҳи тағйирёбии иқтидори модулҳои фотоэлектрикӣ вобаста ба дараҷаи гармшавии онҳо вобастагиҳои графикии тағйирёбии иқтидор дар давоми рӯзи равшан сохта шуданд (расми 2.8).

Таҳлили вобастагиҳои таҳқиқоти таҷрибавӣ нишон медиҳад, ки қиматҳои максималии иқтидори модулҳо дар шароити радиатсияи баланди офтобӣ ва ҳарорати нисбатан муътадили сатҳ ба даст меоянд. Аммо минбаъд баланд шудани ҳарорат боиси бад шудани нишондиҳандаҳои кории табдилдиҳандаҳои фотоэлектрикӣ ТФЭ мегардад, ки ҳатто дар ҳолати нигоҳ доштани шиддатнокии баланди радиатсияи офтобӣ [3].



Расми 2.8. – **Динамикаи муқоисавии тағйирёбии иқтидори истеҳсолшавандаи МФЭ-и тозашуда ва чанголуд дар давраи мушоҳидаҳои таҳқиқоти таҷрибавӣ**

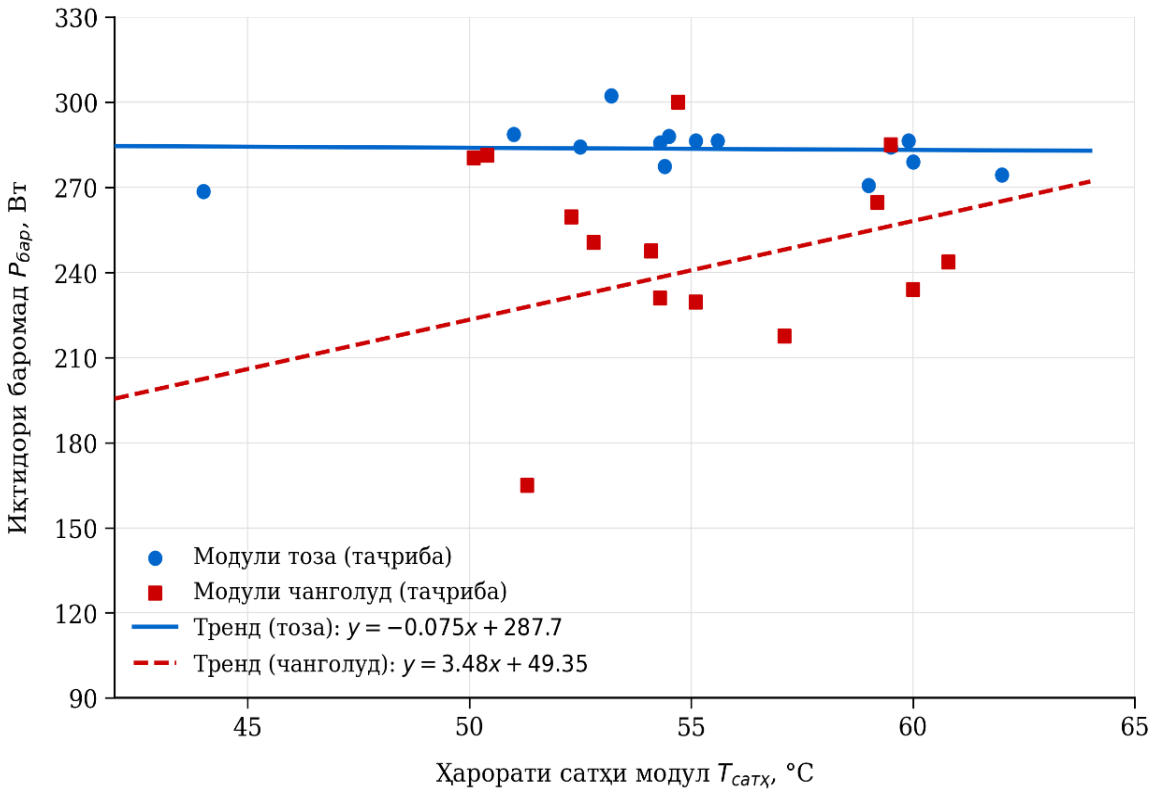
Натиҷаҳои таҳқиқоти таҷрибавии бадастомада вобастагии қаблан муайяншудаи байни баланд шудани ҳарорати модули фотоэлектрикӣ ва коҳиш ёфтани иқтидори истеҳсолии онро тасдиқ менамояд.

Бояд қайд намуд, ки барои шароити иқлими Ҷумҳурии Тоҷикистон масъалаи аз ҳад зиёд гарм шудани модули фотоэлектрикӣ аҳамияти махсус дорад. Давраи тӯлонии гармшавӣ, шиддатноккии баланди радиатсияи офтобӣ ва падидаҳои мавсимии чанголудшавӣ барои истифодаи неругоҳҳои фотоэлектрикӣ шароити номусоид фароҳам меоранд. Аз ин рӯ, зарурати истифодаи роҳҳои ҳали техникӣ, ки ба паст кардани ҳарорати сатҳи модули фотоэлектрикӣ равона шудаанд меафзояд. “Ба усулҳои самаранок паст кардани сарборii ҳароратӣ инҳо дохил мешаванд” [8]:

– таъмини шамолдиҳии табиии сатҳи пушти модулҳо;
– оптимизатсияи кунҷи насби панелҳои фотобӣ;
– истифодаи конструксияҳои гармихоричкунанда;
– истифодаи рӯйпӯшҳои муҳофизатӣ [8];
– мунтазам тоза кардани сатҳи модулҳо аз ифлосшавии чанголуд;
– истифодаи плёнкаҳои муҳофизатии инъикоскунанда ва голографи.

Дар таҳқиқоти анҷомдодаи мо истифодаи плёнкаи махсуси голографӣ пешниҳод шудааст, ки барои паст кардани гармшавии аз ҳад зиёди сатҳи МФЭ тавассути инъикоси қисми инфрасурхи спектри офтобӣ пешбини шудааст. Истифодаи чунин рӯйпӯш ба паст шудани ҳарорати элементҳои фотоэлектрикӣ ва баланд гардидани устувории истеҳсоли неруи барқ мусоидат менамояд [78-81].

Дар асоси декомпозитсияи маҷмуи маълумоти таҷрибавӣ вобастагии коррелятсионии байни реҷаи ҳароратии сатҳи модулҳо ва иқтидори фаврии электрикии онҳо муқаррар карда шуд (расми 2.9). Тавре ки муодилаҳои бадастомадаи апроксиматсияи хаттӣ дар дохили графикбуда нишон медиҳанд, барои модули тозашуда тамоюли возеҳи манфии ҳароратӣ хос мебошад, ки асосан бо коҳиш ёфтани шиддат ҳангоми гарм шудани элементи офтобӣ вобаста аст. «Ҳамзамон, дар соатҳои авҷи нисфирӯзӣ (аз 11:00 то 14:00), ҳангоми ҳарорати муҳити атроф 32-37 °C, ҳарорати сатҳи модули фотоэлектрикии тозашуда ба қиматҳои баланди 53-62 °C расид» [3].



Расми 2.9. – Вобастагиҳои таҷрибавӣ ва тамоюлҳои (тренд) хаттии тағйирёбии иқтидори МФЭ-и тозашуда ва чанголуд ҳангоми тағйирёбии ҳарорати сатҳи он

Ҷолиби диққат аст, ки барои модули чанголуд кунҷи майли хати апроксиматсионӣ ба таври назаррас бештар ифода ёфтааст. “Ин таъсири якҷояи омилҳои оптикӣ ва ҳароратӣ шаҳодат медиҳад: қабати зичи зарраҳои майда воридшавии радиатсияи офтобиро ба элементҳои фотоэлектрикӣ коҳиш дода, ҳамзамон мубодилаи гармиро бо муҳити атроф бад менамояд” [8]. Дар шароити иқлими берунаи ҳаммонанд, модули чанголуд реҷаи ҳароратии баландтари сатҳро дар ҳудуди 50,1-60,8 ºС нишон дод.

Ин ҳолат дар якҷоягӣ бо коҳиш ёфтани воридшавии радиатсияи офтобӣ ба фотоэлементҳо боиси бештар коҳиш ёфтани зариби кори фоиданок ва кам шудани иқтидори истеҳсолшаванда то 111,7-121,15 Вт дар шароити абрнокии тағйирёбанда гардид [82-83].

Дуршавии мушоҳидашудаи каҷхатаҳои таҷрибавӣ аз вобастагиҳои ҳисобӣ бо таъсири инерсияи ҳароратӣ ва ғайриустувории реҷаи ҳароратии модулҳои фотоэлектрикӣ шарҳ дода мешавад.

«Натиҷаҳои таҳлили таҳқиқоти таҷрибавии гузаронидадаро ҷамъбаст намуда, бояд таъсири манфии ҳарорати баланд ба тавсифоти электрикии модулҳои фотоэлектрикӣ қайд карда шавад» [3]. «Аз ҷиҳати таҷрибавӣ коҳиш ёфтани шиддати истеҳсолӣ ҳангоми баланд шудани ҳарорат тасдиқ гардид, ки бо қонунияти коҳиши иқтидори истеҳсолшаванда ҳангоми гарм шудани сатҳи модулҳо ҳамроҳ мебошад» [3]. Ин вобастагӣ дар натиҷаи таъсири ифлосшавии чанголуд шиддат мегирад: қабати чанг дар шишаи муҳофизатӣ на танҳо воридшавии радиатсияи офтобиро ба элементҳои фотоэлектрикӣ коҳиш медиҳад, балки шароити мубодилаи гармиро бо муҳити атроф низ бад намуда, ба гармшавии иловагии сатҳ ва ташаккули аномалияҳои маҳаллии ҳароратӣ мусоидат мекунад.

Дар шароити хоси иқлими Ҷумҳурии Тоҷикистон, ки бо инсолятсияи баланди тобистона ва чанголудии баланди ҳавои атмосфера тавсиф мешаванд, ба назар гирифтани таъсироти ҳароратӣ ва таназзулии муайяншуда барои арзёбии пешгӯишавандаи самаранокии энергетикии неругоҳҳои барқи офтобӣ аҳамияти назаррас дорад. Ин омил зарурати таҳия ва татбиқи чорабиниҳои

техникии мутобиқгардонидашударо ба миён меорад, ки ба коҳиш додани сарбории ҳароратӣ ва нигоҳ доштани тозагии сатҳҳои оптикии модулҳои фотоэлектрикӣ равона шудаанд.

Маҷмуи маълумотҳои таҷрибавии бадастомада барои гузариш аз мушоҳидаҳои саҳроӣ ба таҳлили миқдории рақамии реҷаҳои истифодаи низомҳои фотоэлектрикӣ замина фароҳам меорад. Бо мақсади баланд бардоштани эътимоднокии арзёбӣ ва паҳн намудани натиҷаҳои таҳқиқоти маҳаллӣ ба шароити истифодаи неругоҳҳои фотоэлектрикии саноатӣ, истифодаи моделсозии комплексии компютерӣ бо истифода аз маҷмуи барномавии махсуси PVsyst ва муҳити моделсозии блокӣ-тақлидии (имитатсионӣ) MATLAB/Simulink мувофиқи мақсад мебошад.

Истифодаи маҷмуи барномавии PVsyst ба арзёбии системавии нишондиҳандаҳои энергеткии неругоҳи фотоэлектрикӣ равона шудааст, аз ҷумла ҳисоб намудани истеҳсоли солонаи неруи барқ бо истифода аз маълумоти метеорологӣ барои минтақа, муайян намудани зариби истеҳсолнокӣ ва арзёбии талафоти ҳароратӣ. Дар навбати худ, моделсозӣ дар муҳити MATLAB/Simulink имкон медиҳад, ки равандҳо дар сатҳи элементи фотоэлектрикӣ ва модул таҳқиқ карда шавад, аз ҷумла динамикаи параметрҳои электрикӣ ва ҳароратӣ ҳангоми тағйир ёфтани шиддатнокии радиатсияи офтобӣ, ҳарорат ва дараҷаи ифлосшавии сатҳ.

«Истифодаи муштараки воситаҳои мазкур имкон медиҳад, ки натиҷаҳои таҷрибаи саҳроӣ бо моделҳои ҳисобӣ алоқаманд карда шуда, барои баланд бардоштани самаранокии энергетикӣ ва эътимоднокии истифодаи неругоҳҳои барқи офтобӣ дар шароити иқлими Ҷумҳурии Тоҷикистон тавсияҳои асоснок таҳия карда шаванд» [4], [32].

Барои тасдиқи қонуниятҳо аз ҷиҳати назариявӣ муқарраршудаи таъсири ҳарорати баланд, ифлосшавии табиӣ ва дигар омилҳои иқлимӣ ба нишондиҳандаҳои истифодабарӣ ва энергетикии МФЭ ва неругоҳҳои барқи офтобӣ, инчунин барои муқоисаи натиҷаҳои ҳисобӣ ва таҷрибавӣ, дар боби сеюми диссертатсия бо истифода аз маҷмуи барномавии PVsyst моделсозии неругоҳи барқи офтобӣ анҷом дода шудааст.

Хулосаҳои боби 2

«Дар боби дуюми кори диссертатсионӣ таҳқиқоти назариявӣ ва таҷрибавии таъсири ҳарорат ба самаранокии модулҳои фотоэлектрикӣ анҷом дода шуд, инчунин равандҳои асосии таназзулӣ, ки ҳангоми истифодаи неругоҳҳои барқи офтобӣ дар шароити ҳарорати баланд ба вуҷуд меоянд, таҳлил карда шудаанд»:

1. «Таҳлилҳо нишон доданд, ки тағйирёбии ҳарорати кории модулҳои фотоэлектрикӣ ба параметрҳои асосии энергетикии онҳо таъсири мустақим мерасонанд. Афзоиши ҳарорат боиси коҳиши шиддати кори бебор ва ЗКФ, инчунин тағйир ёфтани тавсифоти волтамперӣ мегардад». Дар натиҷа, ҳатто ҳангоми радиатсияи баланди офтобӣ, зиёдшавии ҳарорати модул метавонад ба пастшавии иқтидори истеҳсолшавандаи он оварда расонад.

2. Нақши таъсири ҳароратии дарозмуддат дар раванди таназзули модулҳои фотоэлектрикӣ муайян карда шуд. Таҳлилҳо нишон медиҳанд, ки таъсири такроршавандаи тағйирёбии ҳарорат ва кори бефосила дар муҳити ҳарорати баланд суръати равандҳои таназзулиро афзоиш дода, боиси зиёдшавии талафоти дохилӣ ва паст гардидани нишондиҳандаҳои электрикии модул мегардад. Дар натиҷа, устуворӣ ва қобилияти нигоҳдории хусусиятҳои кории модулҳо дар давраи истифодаи дарозмуддат паст мегардад.

3. Натиҷаҳои таҷрибавии таъсири ҳароратро ба самаранокии энергетикии низомҳои фотоэлектрикӣ тасдиқ намуд. Бо афзоиши ҳарорати сатҳи болои модулҳо талафоти мунтазами иқтидори истеҳсолӣ ва зариби кори фоиданоки онҳо дида шуд. Ин натиҷаҳо бо қонуниятҳои назариявӣ ва маълумоти бадастомада аз моделсозии математикӣ мутобиқати хуб доранд.

4. Фарқи назарраси байни шароити стандартии санҷиш (STC) ва шароити воқеии истифодабарӣ муқаррар карда шуд. Нишон дода шуд, ки омезиши инсолятсияи баланди офтобӣ ва ҳароратӣ баланди муҳити атроф реҷаҳои кориро ба вуҷуд меорад, ки аз шароити меъёрие, ки хусусиятҳои

шиносномавии модулҳои фотоэлеткрикӣ ба онҳо асос ёфтаанд, ба таври назаррас фарқ мекунанд.

5. Зарурати ба таври маҷмуӣ ба назар гирифтани омилҳои ҳароратӣ ва истифодабарӣ ҳангоми моделсозӣ ва лоиҳакашии неругоҳҳои барқи офтобӣ дар шароити Ҷумҳурии Тоҷикистон асоснок карда шуд. Таҳлили натиҷаҳо, самаранокии истифодаи якҷояи моделҳои ҳароратӣ ва маълумоти таҷрибавиро тасдиқ намуд. Чунин муносибат барои дақиқтар пешгӯи намудани истеҳсоли неруи барқ, кам кардани хатои ҳисобкунии нишондиҳандаҳои энергетикӣ ва баланд бардоштани эътимоднокии кори низомҳои фотоэлектрикӣ дар муҳити иқлими гарм ва дорои чангу ғубор шароити мусоидат фароҳам меорад.

6. «Натиҷаҳои бадастомада дар боби дуюм нишон медиҳанд, ки реҷаи ҳароратӣ ба нишондиҳандаҳои энергетикӣ, эътимоднокии кори НФЭ ва нигоҳдории хусусиятҳои онҳо дар давраи дарозмуддат таъсири муайянкунанда дорад». «Натиҷаҳои таҳлили назариявӣ, моделҳои математикӣ ва санҷишҳои таҷрибавӣ имконият медиҳанд, ки усулҳои моделсозӣ минбаъд такмил дода шуда, қарорҳои техникии самаранок барои беҳтар намудани истифодаи неругоҳҳои барқи офтобӣ бо дарназардошти шароити иқлими Ҷумҳурии Тоҷикистон таҳия карда шаванд».

БОБИ 3. МОДЕЛСОЗИИ РЕҶАҲОИ КОРӢ ВА ИНТИХОБИ ТАҶҲИЗОТҲОИ БАРҚИИ НЕРУГОҲИ ФОТОЭЛЕКТРИКӢ ДАР МУҲИТИ БАРНОМАВИИ PVsyst БО ДАРНАЗАРДОШТИ ОМИЛҲОИ ҲАРОРАТӢ

3.1. Масъалагузорӣ ва принсипҳои умумии моделсозии тақлидӣ

Дар шароити муосири рушди босуръати энергетикаи ғайримарказонидашуда дар заминаи манбаъҳои барқароршавандаи энергия, таъмини кори самаранок ва устувори низомҳои фотоэлектрикӣ дар шароити гуногуни иқлими истифодабарӣ аҳамияти махсус пайдо мекунад. Барои Ҷумҳурии Тоҷикистон ин масъала бинобар сатҳи баланди инсолятсияи (радиатсия) офтобӣ, тағйирёбии назарраси мавсимии ҳарорати муҳити атроф, релефи мураккаби кӯҳӣ ва мавҷудияти минтақаҳои дурдасти бо барқ таъминнашуда аҳамияти стратегӣ дорад. Дар чунин шароит низомҳои автономии фотоэлектрикӣ ҳамчун яке аз алтернативаҳои ояндадору аз ҷиҳати экологӣ бехатар ба таъминоти анъанавии энергия сӯзишворӣ баррасӣ мешаванд.

Табдили мустақими энергияи офтобӣ ба неруи барқ тавассути низомҳои автономии фотоэлектрикӣ имконияти таъмини энергияи объектҳои маишӣ ва коммуналиро дар минтақаҳои душвордастрас фароҳам меорад. Сохтори баланди чунин низомҳо имкон медиҳад, ки иқтидори насбшуда вобаста ба тағйирёбии бори электрикии истеъмолкунандагон ба таври чандир тағйир дода шавад.

Ҳамзамон, тавре ки дар боби дуюм нишон дода шуд, самаранокии истифодабарӣ ва эътимоднокии неругоҳҳои барқи офтобӣ на танҳо аз сатҳи радиатсияи офтобӣ, балки аз таъсири маҷмуи омилҳои иқлимӣ, ҷуғрофӣ ва пеш аз ҳама ҳароратӣ муайян карда мешаванд. Бинобар ин, ба назар гирифтани онҳо ҳангоми моделсозӣ шарти зарурии арзёбии боэътимоди нишондиҳандаҳои энергетикӣ ва интихоби реҷаҳои оптималии кори низоми фотоэлектрикӣ мебошад.

«Таҷрибаи истифодабарии дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ нишон медиҳад, ки баланд шудани ҳарорати сатҳи модулҳои офтобӣ боиси коҳиш ёфтани шиддати истеҳсолӣ, паст шудани зариби фоиданокӣ ва дар натиҷа, кам шудани иқтидори истеҳсолшавандаи неруи барқ мегардад» [3]. «Таъсири мазкур махсусан дар давраи тобистон дида мешавад, ки дар он шиддатнокии баланди радиатсияи офтобӣ бо гармшавии назарраси сатҳи модулҳои фотоэлектрикӣ якҷоя мегардад» [26]. Омилҳои иловагии талафот чанголудшавии сатҳ, талафоти ҳароратӣ, сояафканӣ ва талафоти амикӣ дар пайвастаҳои электрикии система мебошанд.

Ҳамин тариқ, самаранокии кори неругоҳҳои фотоэлектрикӣ аз таъсири маҷмуи омилҳои иқлимӣ, конструксия ва истифодабарӣ муайян карда мешавад, ки ба назар гирифтани онҳо ҳангоми арзёбии истеҳсолнокии воқеии энергеткии он зарур мебошад. Омилҳои асосии муайянкунандаи самаранокии энергеткии низоми фотоэлектрикӣ дар раси 3.1 нишон дода шудааст.



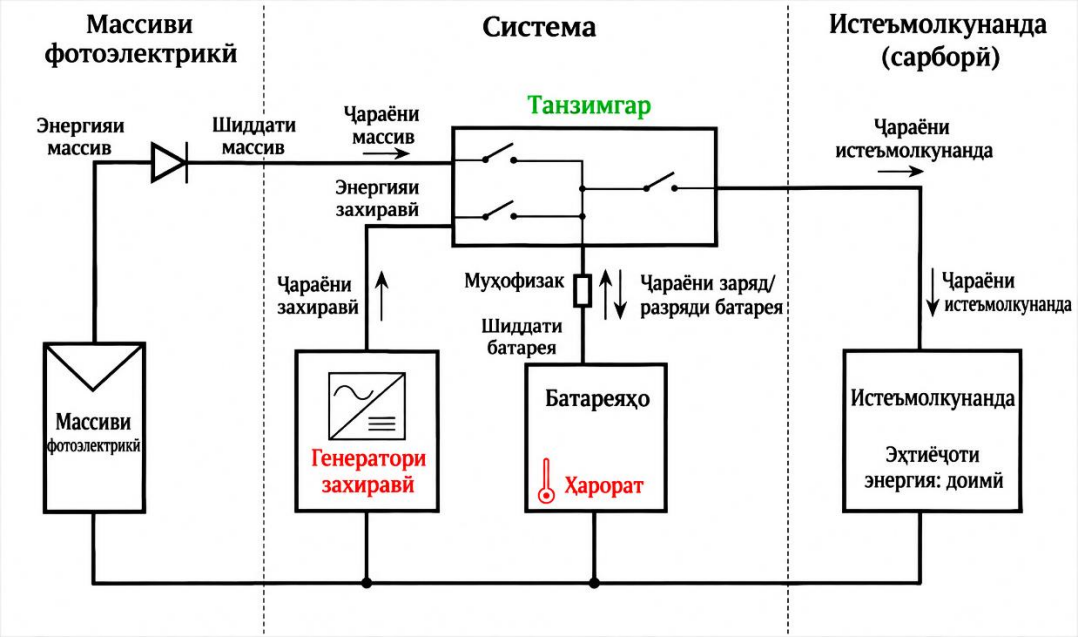
Расми 3.1. – Омилҳои таъсиркунанда ба самаранокии неругоҳи фотоэлектрикӣ

Чи гунае, ки аз расми 3.1 дида мешавад, самаранокии кори неругоҳҳои фотоэлектрикӣ аз маҷмуи параметрҳои бо ҳам алоқаманд муайян карда мешавад. «Таъсири бештарро сатҳи радиатсияи офтобӣ ва реҷаи ҳароратии модулҳои фотоэлектрикӣ мерасонанд, чун маҳз ин омилҳо бевосита бузургии

иқтидори истеҳсолшавандаи неруи барқ ва сатҳи талафоти энергетикии низоми фотоэлектрикиро муайян менамоянд» [27].

Хусусияти низомҳои автономии фотоэлектрикӣ, ки новобаста аз низоми мутамаркази энергетикӣ фаъолият мекунанд, барои таъмини тавозуни энергетикӣ байни истеҳсол ва истеъмоли неруи барқ талаботи баландтар ба миён меорад [4]. Дар шароити номувофиқ будани ҷадвали истеҳсоли энергияи фотоэлектрикӣ ва бори электрикӣ зарурати захиракунии энергияи истеҳсолшуда ба вуҷуд меояд.

Вобаста ба ин, объекти таҳқиқот (НАФЭ) низоми автономии фотоэлектрикӣ интихоб гардидааст, ки дастгоҳи фотоэлектрикӣ (ДФЭ), назоратчии (контроллер) барқиро бо функсияи пайгири нуқтаи максималии иқтидо (MPPT), батареяи аккумуляторӣ ва манбаи захиравии таъминоти барқро дар бар мегирад. Манбаи захиравӣ барои ҷуброн намудани норасоии истеҳсоли неруи барқ ҳангоми паст шудани фаъолияти низоми фотоэлектрикӣ пешбинӣ шудааст. Нақшаи сохтории (принсипиалӣ) низоми автономии фотоэлектрикии таҳқиқшаванда дар расми 3.2 оварда шудааст.



Расми 3.2. – Нақшаи сохтории (принсипиалӣ) низоми автономии фотоэлектрикӣ

Сохтори пешниҳодшудаи низоми автономии фотоэлектрикӣ табдил додани энергияи офтобиро ба неруи барқ бо ҷамъкунии минбаъдаи энергия

дар батареяи аккумуляторӣ ва интиқоли он ба истеъмолкунандагон таввасути табдилдиҳандаи инверторӣ таъмин менамояд. Истифодаи назоратчии (контроллер) MPPT имкон медиҳад, ки самаранокии система таввасути пайгирии доимии нуқтаи максималии иқтидори дастгоҳи фотоэлектрикӣ баланд бардошта шавад.

Дар асоси таҳлили нақша (расми 3.2), вазифаҳои асосии илмии ин боб на танҳо муайян кардани параметрҳои меъёрии таҷҳизот, балки муқаррар кардани қонуниятҳои таъсири тағйирёбии ҳарорати модулҳои фотоэлектрикӣ ва шароити сояафкании маҳаллӣ ба нишондиҳандаҳои истеҳсолии низоми фотоэлектрикӣ мебошад [3]. Ба назар гирифтани омилҳои мазкур имкон медиҳад, ки эътимоднокии арзёбии нишондиҳандаҳои энергетикии низоми автономии фотоэлектрикӣ баланд бардошта шуда, аз зиёд нишон додани истеҳсолнокии ҳисобии он пешгирӣ карда шавад, ки дар шароити воқеӣ метавонад ба норасоии иқтидори истеҳсолшаванда ва зиёд шудани сарбории батареяи аккумуляторӣ оварда расонад.

Дар таҳқиқоти муосир аксар вақт диққати асосӣ ба арзёбии захираҳои офтобӣ ва ҳисоб намудани ҳаҷми истеҳсолии неруи барқ равона карда мешавад, дар ҳоле ки равандҳои ҳароратӣ ва талафотои энергетикии вобаста ба онҳо ба таври муфассал камтар баррасӣ мешаванд. Барои шароити иқлими Ҷумҳурии Тоҷикистон арзёбии маҷмуи (комплексӣ) низомҳои фотоэлектрикӣ бо дарназардошти ҳарорати баланд, тағйироти мавсимии радиатсияи офтобӣ ва реҷаҳои истифодабарии таҷҳизот аҳамияти махсус дорад.

Вобаста ба ин, зарурати истифодаи усулҳои муосири моделсозии тақлидӣ ба миён меояд, ки имкон медиҳанд параметрҳои иқлимӣ, хусусиятҳои таҷҳизот ва хусусиятҳои истифодабарии низомҳои автономӣ ба назар гирифта шаванд.

Яке аз воситаҳои самараноки ҳалли ин масъала маҷмуи барномавии PVsyst мебошад, ки таҳлили маҷмуи нишондиҳандаҳои энергетикии неругоҳҳои барқи офтобиро (фотоэлектрикӣ) дар шароити гуногуни истифодабарӣ таъмин менамояд.

Истифодаи маҷмуи (комплексӣ) барномавии PVsyst имкон медиҳад, ки амалҳои зерин иҷро шаванд:

− моделсозии равандҳои энергетикии низоми фотоэлектрикӣ бо дарназардошти параметрҳои иқлими маҳал ё минтақаи истифодабарӣ [25];

− ба назар гирифтани талафоти ҳароратии модулҳои фотоэлектрикӣ ва таҳлили таъсири онҳо ба самаранокии энергетикии НФЭ;

− ҳисоб намудани тавозуни энергетикии низоми автономии фотоэлектрикӣ;

− муайян намудани параметрҳои оптималии самтгирӣ ва кунҷи майлкунии модулҳои фотоэлектрикӣ;

− таҳлили истеҳсолнокии неругоҳи фотоэлектрикӣ дар реҷаҳои гуногуни сарборӣ ва истифодабарӣ;

− арзёбии нишондиҳандаҳои энергеткии низоми фотоэлектрикӣ ҳангоми тағйирёбии фаъолияти офтоб.

Дар ин боб масъалаи илмӣ-амалии моделсозӣ ва таҳлили комплексии низоми автономии фотоэлектрикӣ, ки барои таъминоти барқи минтақаҳои дурдасти Ҷумҳурии Тоҷикистон ва объектҳои хурди инфиродӣ ва ҳуқуқӣ пешбинӣ шудааст, ҳал карда мешавад. Моделсозӣ дар маҷмуи барномавии PVsyst дар асоси параметрҳои иқлими минтақаи таҳқиқот, хусусиятҳои техникии модулҳои фотоэлектрикӣ ва параметрҳои энергетикии НФЭ анҷом дода мешавад. «Диққати асосӣ ба таҳқиқи реҷаи ҳароратии модулҳои фотоэлектрикӣ, арзёбии миқдории талафоти ҳароратӣ ва муайян кардани таъсири рнҳо ба иқтидори истеҳсолии неругоҳи фотоэлектрикӣ дар шароити гуногуни истифодабарӣ равона карда шудааст» [48], [34].

Ҳамин тариқ, мақсади моделсозӣ арзёбии миқдории таъсири омилҳои ҳароратӣ ба самаранокии энергетикии неругоҳи фотоэлектрикӣ ва таҳияи тавсияҳо оид ба арзёбии параметрҳои истеҳсолӣ, баланд бардоштани самаранокӣ, эътимоднокии истифодабарии онҳо дар шароити Ҷумҳурии Тоҷикистон мебошад [34].

Дар доираи ин боб вазифаҳои зерини таҳқиқот гузошта шудаанд:

– таҳия намудани модели неругоҳи автономии фотоэлектрикӣ дар маҷмуи барномавии PVsyst;

– анҷом додани таҳлили параметрҳои иқлимӣ ва ҳароратии минтақаи таҳқиқот;

– муайян намудани параметрҳои асосии техникии низоми фотоэлектрикӣ ва элементҳои он;

– «таҳқиқ намудани таъсири ҳарорати модулҳои фотоэлектрикӣ ба иқтидори истеҳсолии низоми фотоэлектрикӣ» [27];

– анҷом додани таҳлили талафоти асосии энергетикии неругоҳи фотоэлектрикии афтономӣ;

– муайян кардани параметрҳои оптималии самтгирӣ ва кунҷи майлкунии МФЭ;

– арзёбии самаранокии энергетикӣ ва эътимоднокии кори неругоҳи фотоэлектрикӣ дар реҷаҳои гуногуни истифодабарӣ.

3.2. Методология ва воситаи моделсозии тақлидӣ

Барои таҳқиқи реҷаҳои кори низоми автономии фотоэлектрикӣ бо дарназардошти омилҳои динамикии ҳароратӣ ва иқлимӣ дар ин таҳқиқот маҷмуи барномавии махсуси PVsyst, ки дар Донишгоҳи Женеваи Шветсария таҳия шудааст, истифода гардид. Дар айни замон барои моделсозии низомҳои фотоэлектрикӣ доираи васеи воситаҳои барномавӣ, аз ҷумла MAELAB/Simulink, HOMER ва RETScreen, истифода мешаванд. Аммо воситаҳои барномавии қайдшуда аз рӯйи таъинот, дараҷаи муфассалият ва моделҳои математикии истифодашаванда аз ҳам фарқ мекунанд.

Бинобар ин, интихоби маҷмуи барномавӣ барои таҳқиқоти диссертатсионӣ бо зарурати ба таври маҷмуӣ ба назар гирифтани захираи энергетикии офтобӣ, реҷаи ҳароратии модулҳо, талафоти энергетикӣ ва реҷаҳои кори низоми автономӣ муайян карда мешавад.

Интихоби барномаи компютерии PVsyst ҳамчун воситаи асосии моделсозӣ бо мавҷудияти дастгоҳи мукаммали математикии он барои ҳисоб

кардани нишондиҳандаҳои энергетикии низомҳои фотоэлектрикӣ ва имконияти анҷом додани моделсозии соатбайъ дар давраи ҳисобӣ асоснок карда мешавад. «Бар хилофи усулҳои содакардашудаи таҳлилӣ ва тавозунӣ, маҷмуи барномавӣ имкон медиҳад, ки тағйирёбии радиатсияи офтобӣ, ҳарорати ҳавои муҳит ва дигар параметрҳои метеорологӣ, инчунин таъсири онҳо ба истеҳсолнокии энергетикии низоми фотоэлектрикӣ ба назар гирифта шаванд» [3].

«Моделҳои компютерии PVsyst ҳисоб намудани радиатсияи офтобиро дар сатҳи моилии модул, талафоти ҳароратии модулҳои фотоэлектрикӣ, талафоти электрикӣ ва омикӣ, инчунин тавосуни энергетикии низоми автономиро таъмин мекунад» [3]. Барнома имкон медиҳад, ки ташкилдиҳандаҳои асосии радиатсияи офтобӣ радиатсияи мустақим, паҳншуда ва инъикосшуда (албедо) ба назар гирифта шуда, дар асоси ин параметрҳои офтобӣ нишондиҳандаҳои энергетикии низоми фотоэлектрикӣ ҳисоб карда шаванд ва тавозуни аниқи талафотҳо муайян карда шавад.

«Пойгоҳи маълумоти метрологии ба PVsyst ҳамгирошуда, аз ҷумла Meteonorm ва NASA-SSE [3], [117], имкон медиҳанд, ки кори неругоҳи фотоэлектрикӣ дар асоси маълумоти иқлими бисёрсола бо дарназардошти омилҳои зерин моделсозӣ карда шавад» [48]:

– шиддатнокии радиатсияи офтобӣ, аз ҷумла ташкилдиҳандаҳои мутақим ва паҳншуда (диффузионӣ);

– ҳарорати ҳавои муҳит;

– суръати бод (шамол) [3, 48];

– тағйироти мавсимии параметрҳои асосии иқлими минтақаи таҳқиқот.

Хусусияти муҳими PVsyst барои ҳадафҳои (мақсад) таҳқиқоти диссертатсионии мазкур имконияти арзёбии миқдории таъсири ҳарорат ба истеҳсолнокии энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ ва муайян кардани талафоти мувофиқи ҳароратӣ мебошад. Ин хусусият махсусан барои таҳлили низомҳои автономии фотоэлектрикӣ, ки дар шароити инсолятсияи (радиатсия)

баланди офтобӣ ва тағйирёбии назарраси ҳароратӣ, хоси баъзе минтақаҳои Ҷумҳурии Тоҷикистон, истифода мешаванд, аҳамияти муҳим дорад.

Ҳангоми моделсозии тавозуни энергетикии низоми автономии фотоэлектрикӣ дар маҷмуи барномавӣ омилҳо ва намудҳои асосии талафоти зерин ба инобат гирифта шуданд:

– талафоти ҳароратӣ – коҳиш ёфтани ЗКФ-и модулҳои фотоэлектрикӣ ҳангоми баланд шудани ҳарорати кории онҳо;

– талафоти омикӣ – талафоти иқтидорӣ дар хатҳои кабелии ҷараёни доимӣ ва тағйирёбанда;

– талафоти IAM (*Incidence Angle Modifier*), тағйирдиҳандаи кунҷи афтиш – талафоте, ки дар натиҷаи тағйирёбии инъикоси радиатсия офтобӣ ҳангоми кунҷҳои гуногуни афтиши он ба сатҳи модул ба вуҷуд меояд;

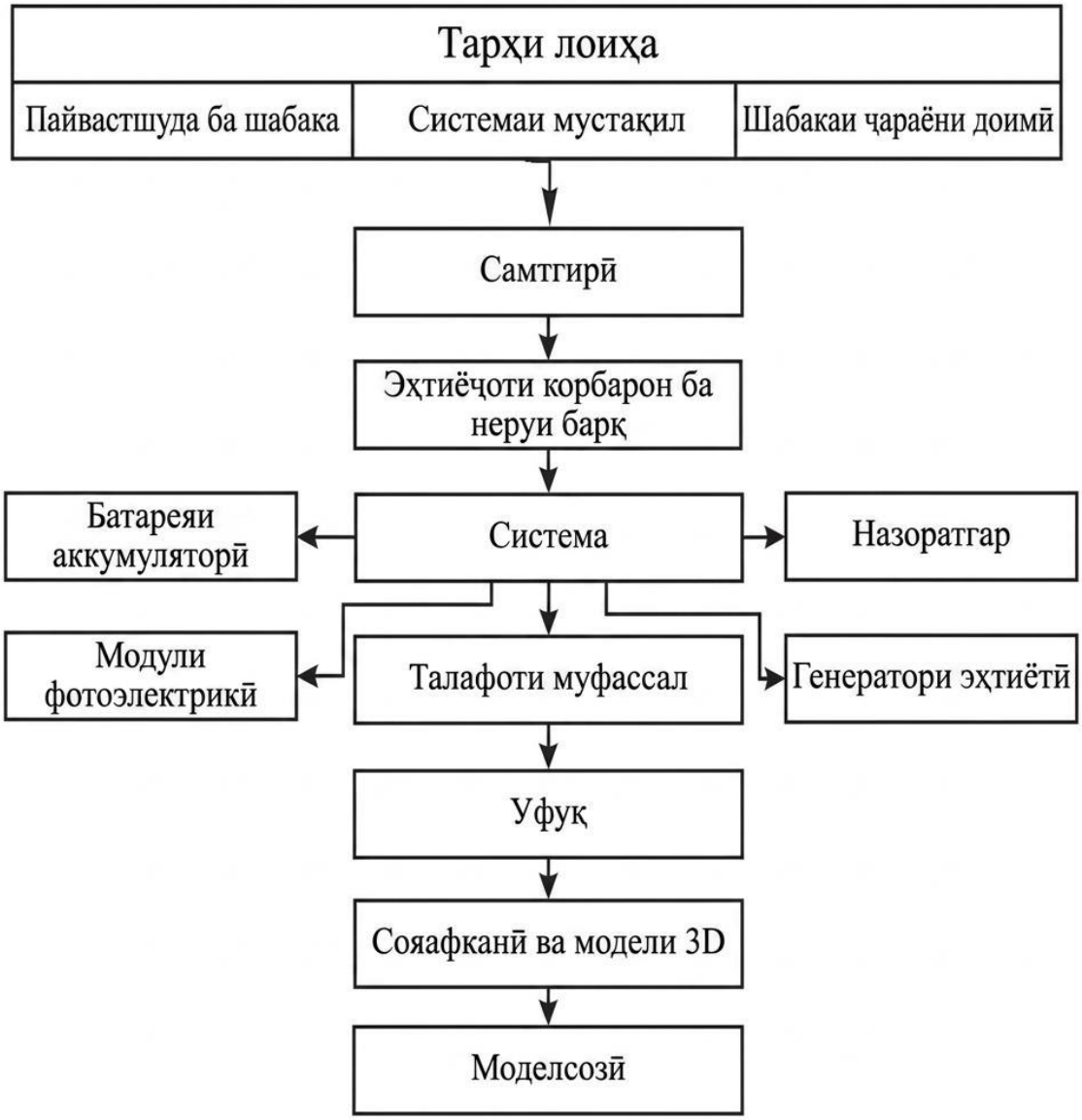
– омилҳои геометрӣ – талафот аз сояафкании статикӣ ва минамикӣ, инчунин таъсири самтгирӣ ва кунҷи майлкунии дастгоҳи фотоэлектрикӣ;

– «талафоти истифодабарӣ – коҳиш ёфтани истеҳсоли неруи барқ дар натиҷаи ифлосшавии сатҳи модулҳо ва номувофиқии хусусиятҳои электрикии модулҳои алоҳида» [25];

– «талафот ҳангоми табдил ва захиракунии энергия – талафоте, ки бо самаранокии инвертор, назоратчӣ ва низоми аккумуляторӣ алоқаманд мебошад» [8].

Нақшаи блоки алгоритми таҳияшуда ва пайдарпайии марҳалаҳои моделсозии тақлидии низоми автономии фотоэлектрикӣ дар расми 3.3 оварда шудааст. Таҳлили сохтори таҳияшудаи ҳисобкуниҳо (расми 3.3) нишон медиҳад, ки раванди моделсозӣ хусусияти пайдарпай дорад.

«Дар марҳалаи ибтидоӣ ба модел координатаҳои ҷуғрофии объект ва ҳаҷми сарбории электрикии муайяншуда ворид карда шуда, сипас самтгирии фазоӣ ва конфигуратсияи дастгоҳи фотоэлектрикӣ, инчунин параметрҳои асосии таҷҳизоти қуввагии низоми фотоэлектрикӣ муқаррар карда мешаванд» [4], [27].



Расми 3.3. – Сохтори иҷрои моделсозӣ дар барномаи PVsyst

Дар марҳалаи минбаъда модели ҳисобӣ бо дарназардошти омилҳои зерин такмил дода мешавад:

1. Ҳисоб намудани талафоти омикӣ ва ҳароратӣ;

2. Сохтани уфуқи сеченака ва муайян кардани параметрҳои сояафканӣ;

3. Ҳамгиро намудани хусусиятҳои низоми аккумуляторӣ, таҷҳизоти инверторӣ ва манбаи захиравии таъминоти барқ.

«Чунин пайдарпайӣ имкон медиҳад, ки модели ҳисобии низоми фотоэлектрикӣ марҳала ба марҳала ташаккул дода шавад: аз параметрҳои асосии ҷуғрофӣ ва энергетикӣ оғоз намуда, бо ба назар гирифтани муфассали омилҳои асосии муайянкунандаи самаранокии истифодаи он анҷом дода

шаван» [3]. Пешниҳод намудани натиҷаҳо дар шакли нақшаи ягонаи алгоритмӣ (расми 3.3), на ҳамчун пайдарпайии амалиётҳои алоҳидаи интерфейси маҷмуи барномавӣ, сохторнокии ҳисобҳо ва такрорпазирии методикаи қабулшудаи моделсозиро таъмин менамояд.

Таҳлили сохтори таҳияшудаи ҳисобҳо (расми 3.3) нишон медиҳад, ки раванди моделсозӣ хусусияти пайдарпай ва интератсионӣ дорад. Дар асоси координатаҳои ҷуғрофии объект ва ҳаҷми муайяншудаи сарбории электрикӣ аз ҷониби муаллиф параметрҳои самтгирӣ ва конфигуратсияи таҷҳизоти асосии қуввагӣ пайдарпай муайян карда шуда, сипас дар модели ҳисобӣ бо дарназардошти талафоти омикӣ ва ҳароратӣ, уфуқӣ геометрии сеченака ва параметрҳои сояафканӣ муфассал гардонида шуд. Пешниҳод намудани тартиби ҳисоб дар шакли нақшаи ягонаи алгоритмӣ (расми 3.3) ба муаллиф имкон дод, ки пайдарпайии моделсозиро низомнок намуда, такрорпазирии ҳисобҳоро таъмин кунад ва таъсири омилҳои субъективиро ҳангоми ташаккули модели ҳисобӣ коҳиш диҳад.

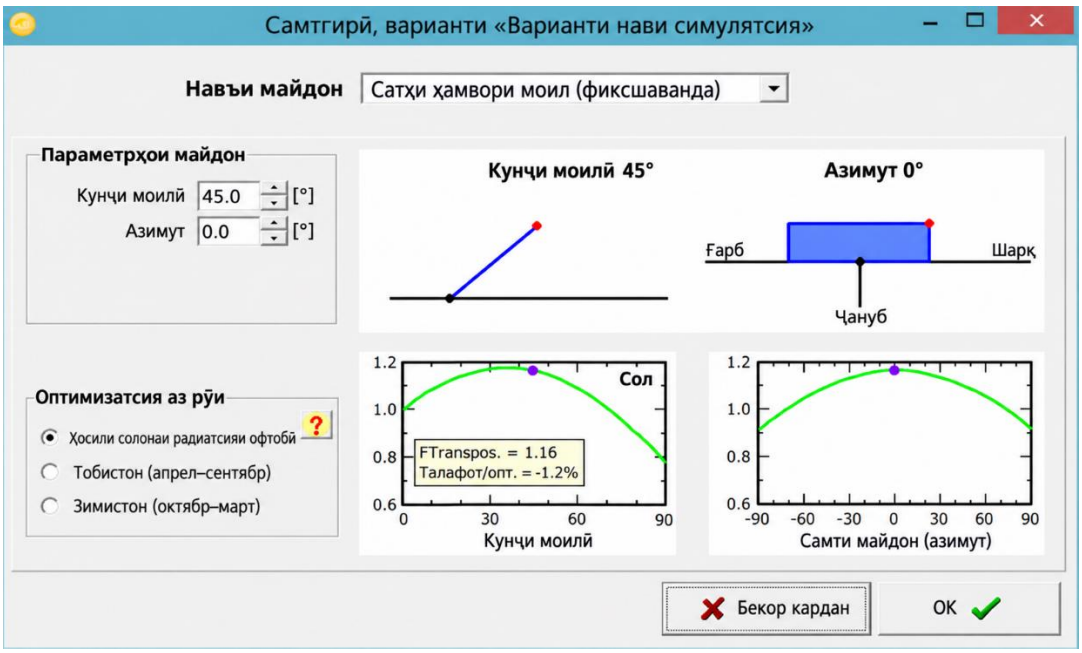
3.3. Ташаккули маҷмуи параметрҳои воридотӣ ва маълумоти ибтидоии иқлимӣ

Эътимоднокии натиҷаҳои моделсозии тақлидӣ бевосита аз намояндагӣ ва дақиқии маълумоти ибтидоӣ вобаста мебошад. Дар таҳқиқоти мазкур маҷмуи параметрҳои воридотӣ аз рӯйи се омили асосӣ гурӯҳбандӣ карда шудааст: ҷуғрофию иқлимӣ, геометрӣ (параметрҳои самтгирӣ фазоӣ) ва сарборӣ (графики истеъмоли неруи барқ).

1. Параметрҳои ҷуғрофӣ ва иқлимӣ. Ҳамчун объекти ҳисобӣ барои моделсозии низоми автономии фотоэлектрикӣ ноҳияи Кӯшониёни вилояти Хатлон интихоб карда шуд. Координатаҳои ҷуғрофии объекти интихобшудаи таҳқиқотӣ: арзи ҷуғрофӣ 37,872° N, тӯлӣ ҷуғрофӣ 68,724° E, баландии муқлақ 419 метр аз сатҳи баҳр. «Маълумотҳои метрологӣ ва профилҳои инсолятсияи офтобӣ дар асоси даври синтетикии солонаи метрологӣ (*Sat = 100% -Synthetic*) [83], [84], ки аз пойгоҳи иқлими Meteonorm 7.2 гирифта шудааст, ташаккул

дода шуданд. Қимати миёнаи шабонарӯзии радиатсияи офтобӣ дар сатҳи уфуқӣ дар минтақаи таҳқиқот тақрибан 5,5-6,6 кВт·соат/(м^2·шабонарӯз)-ро мувофиқи манбаи ташкил медиҳад» [4].

2. Параметрҳои самтгирии дастгоҳи фотоэлектрикӣ. Барои таъмини ҳадди аксари воридшавии радиатсияи офтобӣ дар давоми сол дар модели ҳисобӣ самтгирии сатҳи дастгоҳи фотоэлектрикӣ ба самти ҷануб (азимут 0^o) қабул карда шуд. Бо вуҷуди он ки дар давраи тобистон кунҷи камтари майлкунии дастгоҳи фотоэлектрикӣ 45^o қабул карда шуд. Интихоби қимати мазкур бо зарурати таъмини графики нисбатан якхелаи солонаи истеҳсоли неруи барқ ва коҳиш додани норасоии иқтидор дар давраи зимистон, вақте ки баландии Офтоб нисбат ба уфуқ ҳадди ақал мебошад, асоснок карда мешавад. Параметрҳои самтгирии фазои дастгоҳи фотоэлектрикӣ дар расми 3.4 оварда шудааст.



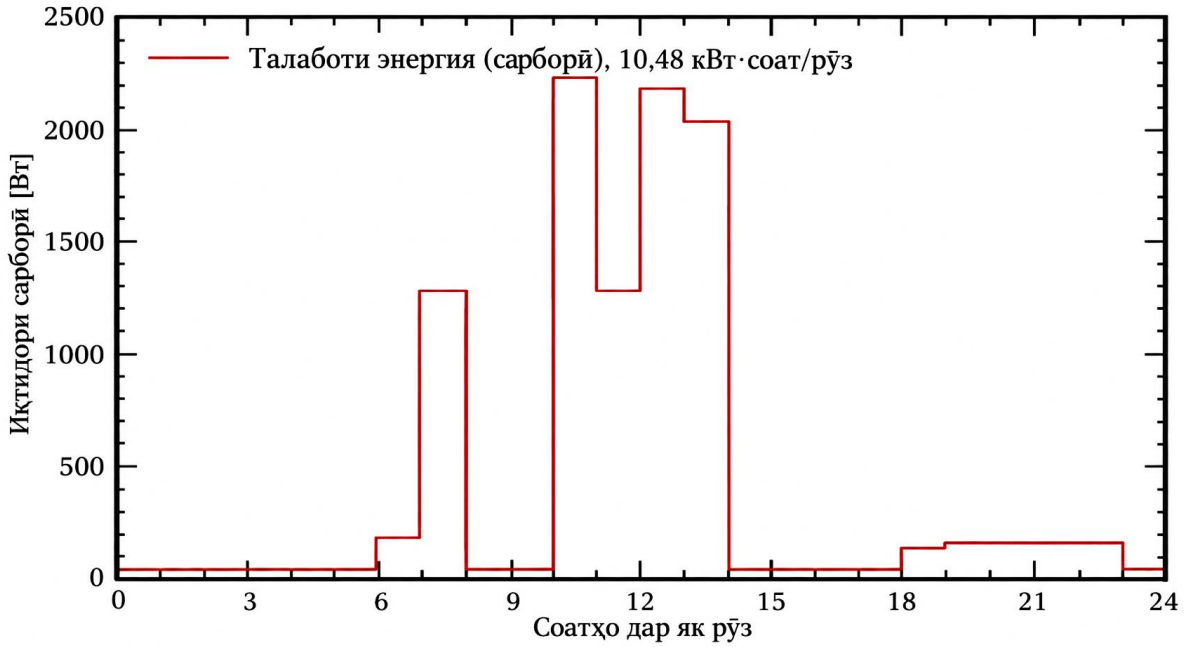
Расми 3.4. – Параметрҳои геометрии ҳисобии самтгирӣ, азимут ва кунҷи майлкунии сатҳи фотоэлектрикӣ дар муҳити PVsyst

3. Графики шабонарӯзии истеъмоли неруи барқ. Дар асоси таҳлили муфассали инфрасохтори маишию коммуналии объекти автономӣ кафедраи манбаъҳои алтернативии энергияи Донишкадаи энергетикии Тоҷикистон муаллиф графики шабонарӯзии сарбории электрикиро муайян намуд.

«Маҷмуи қабулкунакҳои барқӣ гурӯҳи доимии истеъмолкунандагонро дар бар мегирад: 10 то лампаҳои равшани диҳандаи LED, 2 то оинаи нилгун (телевизор), чойники барқӣ, яхдон, мошинаи ҷомашӯӣ якдонаӣ, инчунин кондитсионери сайёр, ки дар давраи зимистон бо гармкунаки барқӣ иваз карда мешавад» [83], [84].

Муайян карда шуд, ки иқтидори умумии насбшудаи қабулкунакҳои барқӣ 7 бада, сарбории максималии кӯтоҳмуддат ҳангоми ҳамзамон фаъол будани таҷҳизот ба 6573 Вт (6,573 кВт) мерасад. Бо дарназардошти истеъмоли шабонарӯзии неруи барқ ба андозаи 10,483 кВт·соат/шабонарӯз, иқтидори миёнаи сарборӣ 437 Вр-ро ташкил медиҳад [83], [84].

Ҷадвали шабонарӯзии сарбории электрикии истеъмолкунандагон дар расми 3.5 оварда шудааст.



Расми 3.5. – Графики сарбории электрикии шабонарӯзии истеъмолкунандагони низоми автономии фотоэлектрикӣ

4. Мушаххасот ва параметрҳои таҷҳизоти электрикии интихобшуда. Дар асоси тавозуни ҳисобии энергетикӣ, графики шабонарӯзии сарборб ва иқтидори максималии истеъмолкунандагон аз ҷониби муаллиф, конфигуратсияи таҷҳизотҳои асосии қуввагии низоми автономии фотоэлектрикӣ таҳия карда шуд (ҷадвали 3.1) [4].

Ҷадвали 3.1. – Параметрҳои техникӣ ва мушахассоти таҷҳизоти электрикии низоми автономии фотоэлектрикӣ, ки ба модели ҳисобӣ ҳамгиро карда шудаанд [4].

Номгӯи таҷҳизотҳо	Навъ	Шумора (дона)	Параметрҳои ҳисобӣ
Модули фотоэлектрикии навъи монокристаллӣ	SOLARMODUL ALEO S19 HE 300 W	45	13,5 кВтр
Блоки батареяи аккумуляторӣ, навъи универсалӣ	Литий-ионии танзимшаванда Universal (Li-ion), 65,6 А·соат, 48 В	19	48 В, 1256,4 А·соат
Контроллери (назоратчӣ) универсалӣ	Universal controller with DC-DC converter	1	13,50 кВт
Табдилдиҳандаи DC-AC (инвертор)	Интихоби алоҳидаро талаб мекунад	1	6,57 кВт
Дастгоҳи генератори захиравӣ	Иқтидори номиналӣ 3,0 кВт, Иқтидори самаранок 1,5 кВт	1	3,0 кВт

3.4. Алгоритми моделсозӣ ва таҳлили натиҷаҳо

«Алгоритми тақлидии дар барномаи PVsyst татбиқшуда ҳисобкунии пайдарпайи соатбайи тавозуни энергетикии низоми автономиро дар давоми соли ҳисобӣ иҷро мекунад» [48].

«Моҳияти физикии алгоритм аз табдил додани маълумоти ибтидоии метеорологӣ оид ба радиатсияи уфуқии офтобии глобалӣ (GlobHor) ва радиатсияи офтобии уфуқии паҳншуда (DiffHor) бо дарназардошти геометрияи ҷойгиршавии дастгоҳи фотоэлектрикӣ ба қимати радиатсияи глобалии ба сатҳи дастгоҳ (GlobInc) воридшаванда иборат мебошад» [83].

«Барои объекти ҷуғрофии таҳқиқшаванда қимати ҳисобии радиатсияи умумии солона дар сатҳи дастгоҳи фотоэлектрикӣ 1946 кВт·соат/м^2·сол-ро ташкил дод, дар ҳоле ки қиматҳои ибтидоии радиатсияи глобалии уфуқӣ (GlobHor) 1715,1 кВт·соат/м^2·сол ва радиатсияи уфуқии паҳншуда (DiffHor) 580,51 кВт·соат/м^2·сол буданд (ҷадвали 3.2)» [4].

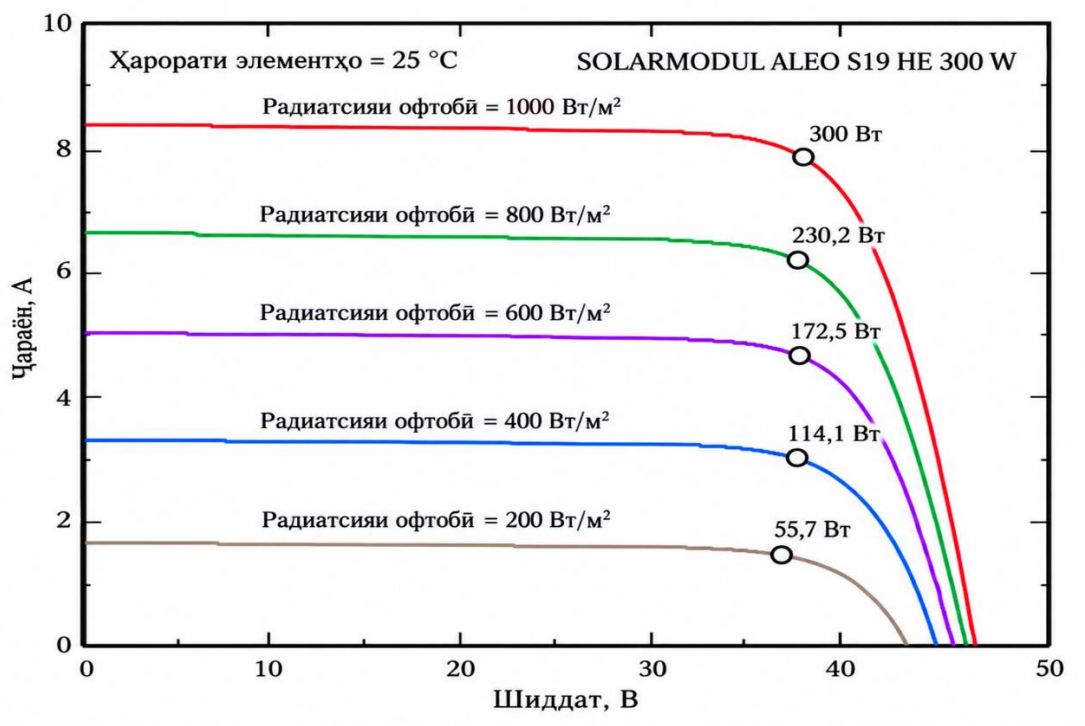
Ҷадвали 3.2. – Қиматҳои ҳисобии параметрҳои радиатсия офтобии воридшаванда ба сатҳи МФЭ-и низоми автономӣ [4].

Ридиатсияи уфуқи офтобии глобалӣ (GlobHor)	Ридиатсияи офтобии уфуқии паҳншуда (DiffHor)	Радиатсияи глобалии ба сатҳи дастгоҳ (GlobInc)
1715,1 кВт·ч/м^2 в год	580,51 кВт·ч/м^2 в год	1946 кВт·ч/м^2 в год

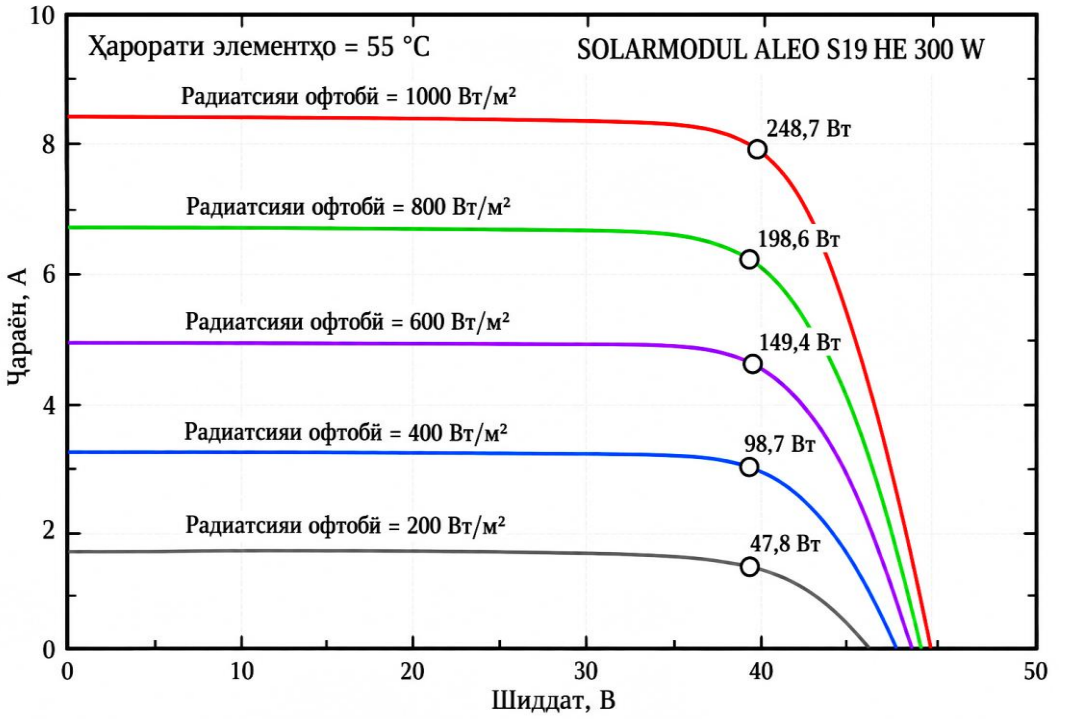
Ҷанбаи асосии илмии усули таҳияшуда ба назар гирифтани вобастагии ҳароратии тавсифоти электрикии модулҳои монокристаллии фотоэлектрикии SOLARMODUL ALEO S19 HE 300 W мебошад. Шароити стандартии санҷиш (STC) шиддатнокии радиатсияи офтобӣ 1000 Вт/м^2 ва ҳарорати элементҳои фотоэлектрикӣ 25 ^oC) реҷаҳои воқеии истифодабариро инъикос мекунанд, зеро ҳарорати муҳити атроф ва модулҳо пайваста тағйир меёбад. «Бинобар ин, дар модели ҳисобӣ аз навҳисобкунии динамикии тавсифоти волтамперт (ТВА) ва тавсифоти тавоноии (ТВТ) модули фотоэлектрикӣ бо дарназардошти тағйирёбии ҳарорат анҷом дода мешавад» [49].

Аз ин сабаб натиҷаҳои моделсозӣ тавсифоти волтамперӣ (ТВА)-и модул фотоэлектрикии таҳқиқшаванда барои ду реҷаи ҳароратӣ сохта шуданд (расми 3.6): а) 25 ^oC ва б) 55 ^oC. Муқоисаи тавсифоти бадастомада имкон медиҳад, ки таъсири миқдории баланд шудани ҳарорат ба тағйирёбии шиддат, ҷараён ва иқтидори максималии истеҳсолшавандаи модули фотоэлектрикӣ арзёбӣ карда шавад. Таҳлили муқоисавии вобастагиҳои бадастомада (расми 3.6) имкон медиҳад, ки хулосаи муҳими назариявӣ бароварда шавад: ҷараёни расиши кӯтоҳ (I_{sc})-и сохтори нимноқилӣ ба тағйирёбии ҳарорат нисбатан устувор мебошад. «Аммо, шиддати кори бебор (U_{oc}), ки ба иқтидори истеҳсолии табдилдиҳандаи фотоэлектрикӣ таъсири муайянкунанда мерасонад, бо баланд шудани ҳарорат мунтазам коҳиш ёфта, вобастагии манфии возеҳи ҳароратиро нишон медиҳад» [8].

Дар расми 3.6 вобаста ба натиҷаи моделсозӣ дар барномаи PVsyst тавсифотҳои муқоисавии волтамперии МФЭ дар ҳарорати кории элементҳои он, яъне 25 ва 55 ^oC оварда шудаанд [4].



а)



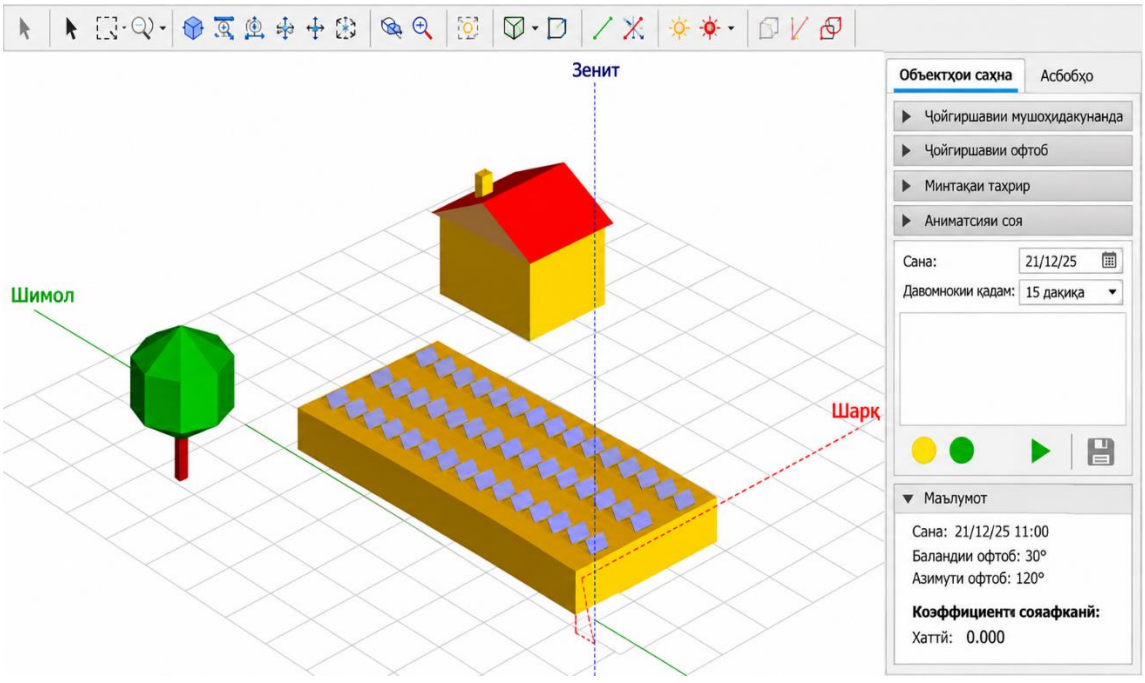
б)

Расми 3.6. – Таҳлили муқоисавии тавсифоҳои ҳисобии волтамперӣ (ТВА)-и модули монокристаллии фотоэлектрикӣ дар ҳароратҳои истифодабарии 25 ºС (а) ва 55 ºС (б)

Ҳангоми баланд шудани ҳарорати кремнӣ аз 25 ºС то 55 ºС иқтидори максималии истеҳсолшаванда модули фотоэлектрикӣ аз 300 то 248,7 Вт коҳиш меёбад, ки ба кам шудани иқтидори истеҳсолӣ ба андозаи зиёда аз 17,1 %

мувофиқат мекунад. Барои ҷуброни ин таъсири ҳароратӣ дар шароити иқлими гарм роҳи ҳалли илмӣ-техникӣ пешниҳод карда шудааст, ки ҳамгиро намудани параметрҳои муҳофизати гармии голографиро ба алгоритми ҳисобкуниҳо пешбинӣ менамояд. Модели математикии таҳияшуда коҳиш ёфтани ҳарорати сатҳи модули фотоэлектрикиро ба ҳисоби миёна ба андозаи 5 °C ба назар мегирад, ки ба устувор гардидани тавсифоти волтамперӣ ва нигоҳ доштани истеҳсоли фоиданоки неруи барқ мусоидат менамояд.

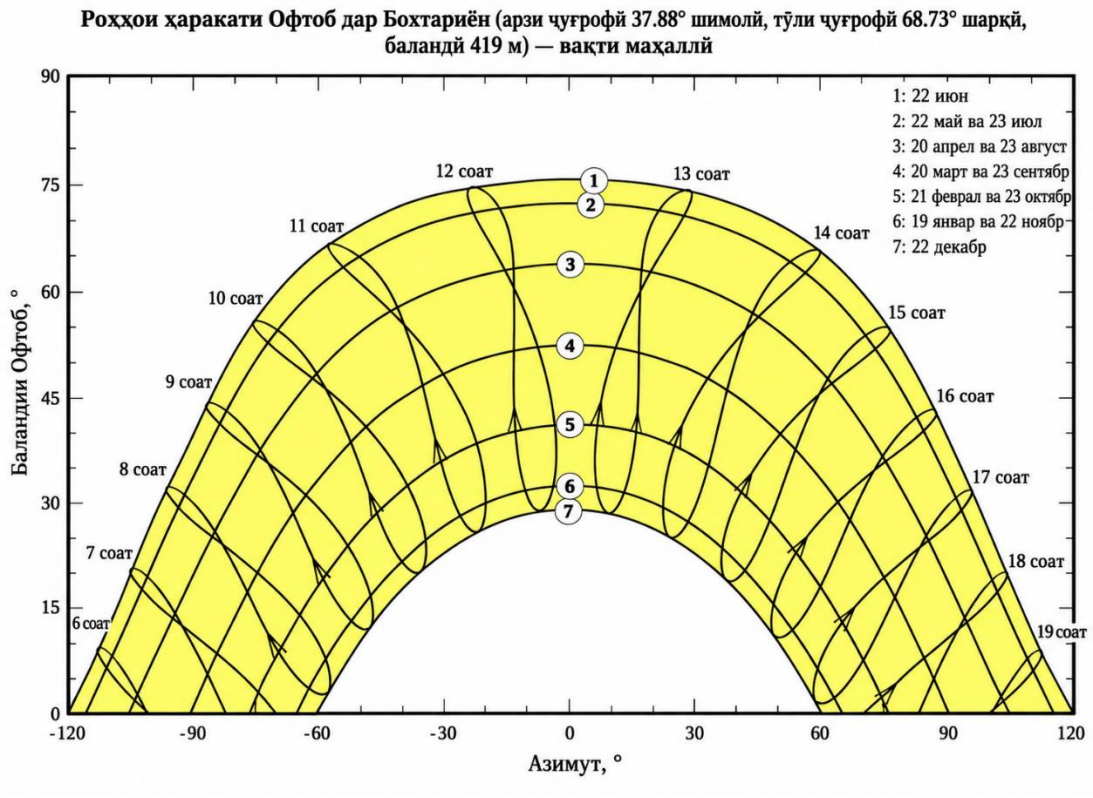
Барои ба таври дақиқ ба назар гирифтани талафоти оптикии вобаста ба сояафканӣ, алгоритми моделсозии PVsyst модели рақамии сеченака (3D) муҳити наздики объектро истифода мебарад (расми 3.7). Дар асоси ин модел мавқеи ҳаракати Офтоб дар координатаҳои фазоӣ барои фосилаҳои хоси вақтӣ дар давоми сол (аз 22-юми март то 22-юми декабр) ҳисоб карда шуда, зарибҳои (коэффисент) геометрии сояафканӣ аз монеаҳои собит, аз ҷумла унсурҳои боми бино ва растаниҳои дарахтӣ, ба таври худкор муайян карда мешаванд.



Расми 3.7. – Модели геометрии 3D сеченакаи объекти таҳқиқот (НАФЭ) ва унсурҳои биноҳои атроф барои ҳисоб намудани профилҳои сояафканӣ

«Аз рӯйи натиҷаҳои ҳисобҳои анҷомдодашуда, алгоритм графики ҳисобии уфуқ ва диаграммаи сояафкании дастгоҳи фотоэлектрикиро дар координатаҳои «Баландии Офтоб-Азимут» (расми 3.8) ташкил медиҳад» [83].

Ин натиҷаҳо имкон медиҳанд, ки тақсимоти фазоии минтақаҳои кунҷии сояафканӣ, ки дар натиҷаи таъсири объектҳои муҳити атроф ба вуҷуд меоянд, муайян карда шавад.



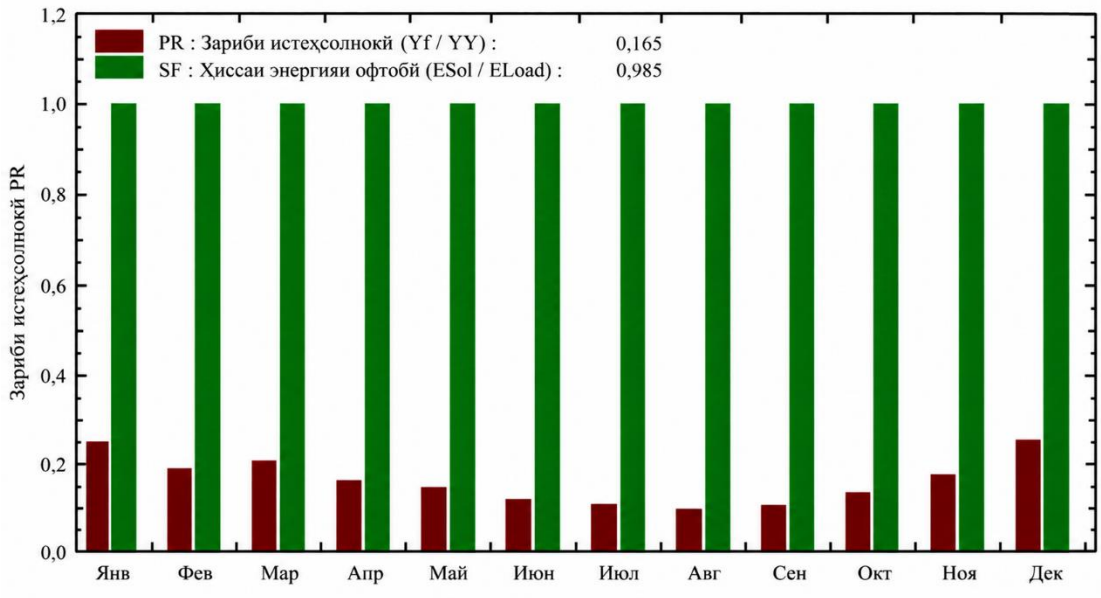
Расми 3.8. – Грфики ҳисобии уфуқ ва диаграммаи сояафкании дастгоҳи фотоэлектрикӣ дар координатаҳои “Баландии Офтоб-Азимут”

Ҳамзамон ба сохтори умумии алгоритми тақлидӣ блоки ҳисобкунии динамикаи тавозуни энергетикии захиракунанда дар асоси модели универсиалии аккумулятори литий-ионӣ бо зарфияти 65,6 А·соат ҳамгиро (якҷоя) карда шудааст [83]. Тавсифоти шиддати кори бебор (U_{oc}) ҳангоми реҷаҳои гуногуни барқистеъмолгирӣ ва холишавии (разряд) блоки аккумулятории модели Universal Li-ion бо зарфияти 65,6 А·соат, инчунин тасвири экрани интерфейси барномаи PVsyst дар замимаи 2 пешниҳод шудаанд.

Алгоритм бо қадами соатбайъ воридшавии неруи барқ аз модулҳои фотоэлектрикиро бо истеъмоли сарбории неруи барқ муқоиса менамояд (расми 3.5). Шиддати кори бебори аккумулятор (U_{oc}) ҳамчуни функсияи хаттии ҳолати ҷории пуркунии (заряд) он (SOC) бо дарназардошти

хусусиятҳои кулонӣ, омикӣ ва ҳароратии захиракунанда ҳисоб карда мешавад. Ҳангоми аз сатҳи критикӣ паст шудани (SOC), алгоритм ба кор даровардани дастгоҳи генератории захиравиро бо иқтидори номиналии 3,0 кВт ва иқтидори самараноки 1,5 кВт оғоз намуда, бо чунин тартиб таъминоти бефосилаи барқи гиреҳи автономии энергетикиро таъмин менамояд.

Таҳлили натиҷаҳои интегралии моделсозии тақлидӣ. Аз рӯйи натиҷаҳои ҳисобкунии маҷмуи анҷомдодашуда параметрҳои интегралии кори неругоҳи лоиҳашуда муайян карда шуданд. «Зариби истеҳсолнокии низоми автономии фотоэлектрикӣ (Performance Ratio, PR), ки ҳамчуни таносуби истеҳсоли ниҳоии хоси неруи барқ (Y_f) ба истеҳсоли хоси нишондиҳанда (эталонӣ) (Y_r) муайян карда мешавад, 0,165 ё 16,5%-ро (расми 3.9) ташкил дод» [27]. Қимати бадастомада истеҳсолнокии энергетикии низоми фотоэлектрикиро бо дарназардошти таъсири маҷмуи талафоти истифодабарӣ ва системавӣ тавсиф менамояд.

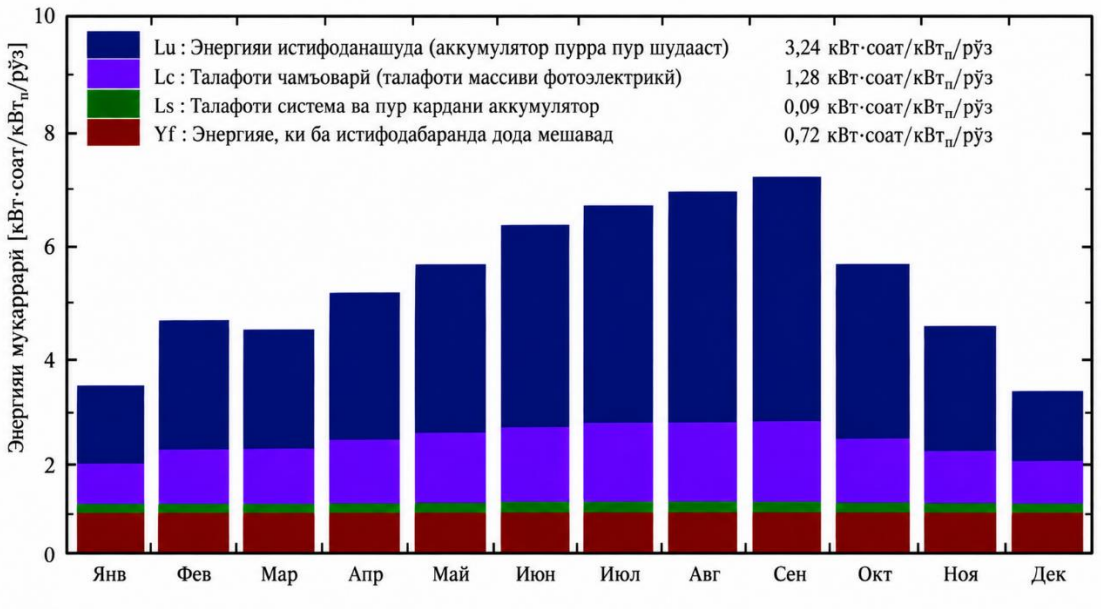


Расми 3.9. – Графики қиматҳои интегралии зариби (коэффисенти) истеҳсолнокии НАФЭ ва ҳиссаи пӯшонидани сарбории электрикӣ тавассути истеҳсоли энергияи офтобӣ

Ҳиссаи энергияи офтобӣ дар пӯшонидани сарбории электрикӣ (Solar Fraction, SF), ки ҳамчун таносуби энергияи офтобии (E_{sol}) ба энергияи аз ҷониби сарбории истеъмолшаванда (E_{Load}) муайян карда мешавад, дар давраи

ҳисобӣ 0,985 ё 98,5%-ро ташкил дод [37], [83]. Таҳлили моҳона нишон медиҳад, ки дар давоми қисми зиёди сол истеҳсоли энергияи офтобӣ талаботи сарбории электрикии истеъмолкунандагонро қариб пурра таъмин менамояд ва дар баъзе моҳҳо қимати SF ба 100 % мерасад ё ба он наздик мешавад. Қисми нокифояи истеъмоли энергия тавассути захиракунандаи аккумуляторӣ ва манбаи захиравии таъминоти барқ ҷуброн карда мешавад.

Таҳлили профилҳои истеҳсоли номиналии (меъёрии) энергия (расми 3.10) нишон медиҳад, ки иқтидори номиналии насбшудаи низоми фотоэлектрикӣ 13,50 кВтр-ро ташкил медиҳад. Қимати шабонарӯзии энергияи истифодашавандаи (L_u), ки нисбат ба иқтидори насбшуда меъёрӣ карда шудааст ва асосан ҳангоми пурра пур (заряд) шудани захиракунандаи аккумуляторӣ ба вуҷуд меояд, ба ҳисоби миёна 3,24 кВт·соат/(кВтр·шабонарӯз)-ро ташкил медиҳад.



Расми 3.10. – Графики истеҳсоли ба меъёр даровардашудаи миёнаи шабонарӯзии неруи барқ ва тақсимоти тавозунии он

«Талафот ҳангоми ҷамъоварии энергия дар дастгоҳи автономии фотоэлектрикӣ (L_c) ба 1,28 кВт·соат/(кВтр·шабонарӯз) ва талафоти системавӣ ва талафот ҳангоми захиракунии аккумулятор (L_s) ба 0,09 кВт·соат/(кВтр·шабонарӯз) баробар мебошанд» [27].

Энергияи фоиданоки (Y_f), ки бевосита ба истеъмолкунанда интиқол дода мешавад, 0,72 кВт·соат/(кВтр·шабонарӯз)-ро ташкил медиҳад [37], [83].

Тавозуни ниҳоии солонаи тақсимоти энергия ва талафоти баамаломада дар диаграммаи солона, ки аз рӯйи натиҷаҳои моделсозӣ дар барномави PVsyst таҳия шудааст, инъикос ёфтааст (замимаи 2). «Таҳлили сохтори графикии талафот (замима 2) нишон медиҳад, ки радиатсияи самараноки офтобӣ дар сатҳи дастгоҳи фотоэлектрикӣ 1756 кВт·соат/м^2-ро ташкил медиҳад. Энергияи номиналии ҳисобии низоми фотоэлектрикӣ дар шароити стандартии санҷиш (STC) ба 24180 кВт·соат/сол баробар буда, ЗКФ-и умумии система 14,78 %-ро ташкил медиҳад» [4].

«Дар сохтори графикии талафот ташкилдиҳандаҳои асосии зерин ҷудо карда шудаанд: талафоти ҳароратӣ 4,0 %; талафот дар натиҷаи таназзули МФЭ 0,75 %; талафот дар пайвастаҳои бастукӯшо (комутатсионӣ) 2,6 %; талафоти омикӣ дар занҷирҳои ҷараёни доимӣ 5,13 %. Дар натиҷа, энергияи самаранок дар баромади низоми автономӣ 4071 кВт·соат/сол-ро ташкил медиҳад» [4], [84].

«Бо дарназардошти талафот ҳангоми табдили энергия дар блоки инверторӣ ва равандҳои захиракунӣ-холишавии захиракунандаҳои аккумуляторӣ, энергияи солонаи неруи барқ, ки барои интиқол ба истеъмолкунандагон дастрас мебошад, 3612 кВт·соат/сол-ро ташкил дод.

Қимати бадастомада бо истеҳсоли ниҳоии хоси ба меъёр даровардашудаи Y_f = 0,72 кВт·соат/(кВтр·шабонарӯз) мебошад, ки дар расми 3.10 пешниҳод шудааст мувофиқат намуда, кифоягии энергетикии сохтори (конфигуратсияи) интихобшудаи низоми автономии фотоэлектрикиро тасдиқ мекунад» [4].

Натиҷаҳои бадастомада метавонанд ҳангоми лоиҳакашӣ ва таҳияи чунин низомҳои фотоэлектрикӣ дар ширкатҳои ватании Ҷамъияти дорои масъулияти маҳдуди «Руфтоб», Ҷамъияти саҳомии кушодаи «Системавтоматика» ва дигар ташкилоту ширкатҳои лоиҳакашӣ васеъ истифода шаванд.

Хулосаҳои боби 3

Дар асоси моделсозии тақлидии анҷомдодашуда дар муҳити барномавии PVsyst дар боби 3 хулосаҳои илмӣ-амалии зерини бароварда шуданд:

1. Масъалаи маҷмуи моделсозии низоми автономии фотоэлектрикӣ (НАФЭ) барои шароити ноҳияи Кӯшониёни Ҷумҳурии Тоҷикистон бо дарназардошти таъсири ғайрихаттии омилҳои ҳароратӣ ба нишондиҳандаҳои энергетикии МФЭ таҳия карда шуд.

2. Профили солонаи инсолятсия (радиатсия) барои объекти ҳисобӣ бо координатаҳои 37,872° арзи шимолӣ, 68,724° тӯли шарқӣ, ки дар баландии 419 метр аз сатҳи баҳр ҷойгир аст, ташаккул дода шуд. Ҳисобҳо дар муҳити барнома нишон доданд, ки дар сатҳи бо кунҷи моилии 45° ва азимути 0° ҷойгиршуда миқдори солонаи радиатсияи офтобӣ ба 1946 кВт·соат/м^2 мерасад. Ин нишондиҳанда нисбат ба сатҳи уфуқӣ 11,86 % зиёд буда, бартарии ҷойгиркунии оптималии МФЭ-ро тасдиқ менамояд.

3. Аз рӯйи таҳлили графики шабонарӯзии сарборӣ параметрҳои низоми таъминоти барқ интихоб ва асоснок карда шуданд. Иқтидори насбшудаи сарборӣ 7 кВт, қимати максималии сарбории ҳисобӣ 6,573 кВт ва масрафи шабонарӯзии неруи барқ 10,483 кВт·соат/шабонарӯзро ташкил медиҳад. Конфигуратсияи низоми автономии фотоэлектрикӣ бо иқтидори насбшудаи 13,50 кВтр таҳияи гардид. Дар таркиби он низ захиракунандаи аккумулятории литий-ионӣ бо зарфияти 65,6 А·соат ва шиддати номиналии 48 В, инчунин генератори захиравии 3 кВт пешбинӣ шудааст.

4. Интихоби тачҳизоти табдилдиҳанда (инвертори DC-AC) бо дарназардошти сарбории максималии ҳисобии 6,57 кВт ва иқтидори насбшудаи низоми фотоэлектрикии 13,50 кВтр асоснок карда шуд. «Ба таркиби система инвертори DC-AC бо иқтидори номиналии 8 кВт ва назоратчии (контроллер) универсалӣ бо табдилдиҳандаи DC-DC бо иқтидори ҳисобии 13,50 кВт дохил карда шуданд, ки мувофиқакунии дастгоҳи фотоэлектрикӣ бо захиракунандаи аккумуляторӣ, танзими ба меъёр даровардашудаи энергия ва таъминоти боэътимоди кувваи барқи

истеъмолкунандагон, аз ҷумла пӯшонидани сарбориҳои кӯтоҳмуддати оғозиро таъмин менамояд» [27].

5. «Муайян карда шуд, ки афзоиши ҳарорати муҳити атроф ба нишондиҳандаҳои энергетикии МФЭ таъсири манфӣ мерасонад. Ҳангоми тағйирёбии ҳарорат аз 25 °C то 55 °C шиддати кори бебор (U_{oc}) паст шуда, иқтидори максималии модул аз 300 Вт то 248,7 Вт паст гардид». Дар натиҷа, талафоти иқтидор 51,3 Вт ё тақрибан 17,1 %-ро ташкил дод.

6. Модели рақамии сеченака (3D) муҳити наздики объект дар муҳити PVsyst сохта шуда, дар асоси он тағйирёбии мавқеи Офтоб ҳисоб ва минтақаҳои кунҷӣ ва зариби сояафканӣ аз монеаҳои собит муайян карда шуданд. Ин имкон медиҳад, ки талафоти оптикии вобаста ба сояафканӣ ҳангоми арзёбии истеҳсоли энергетикии НАФЭ ба назар гирифта шавад.

7. Тавозуни ниҳоии энергетикии НАФЭ муайян карда шуд. Тибқи натиҷаҳои моделсозӣ, энергияи истеҳсолии солонаи низоми автономии фотоэлектрикӣ дар шароити STC 24180 кВт·соатро ташкил медиҳад. Самаранокии умумии энергетикии система 14,8 % арзёбӣ гардид. «Дар тавозуни талафот таъсири ҳарорат 4,0 %, таназзули МФЭ 0,75 %, талафоти пайвастагиҳо 2,6 % ва талафоти муқовиматӣ (Ом) дар занҷирҳои ҷараёни доимӣ 5,13 % муайян карда шуд. Дар натиҷаи моделсозӣ энергияи самараноки дар баромади НФЭ ҳосилшаванда 4071 кВт·соат/солро ташкил дод» [4].

8. «Бо дарназардошти талафоти минбаъдаи системавӣ, энергияи солона барои таъмини истеъмолкунандагон дастрас ба 3612 кВт·соат/сол баробар гардид. Зариби интегралии истеҳсолнокии низоми фотоэлектрикӣ (PR) 0,165 (16,5%) ва ҳиссаи энергияи офтобӣ дар пӯшонидани сарбории электрикӣ (Solar Fraction, SF) 0,985 (98,5%)-ро ташкил дод» [4-М].

БОБИ 4. ТАҲҚИҚИ РЕҶАҲОИ КОРИ ДАСТГОҲҲОИ ФОТОЭЛЕКТРИКӢ ДАР АСОСИ МОДЕЛСОЗИИ РАВАНДҲОИ ҲАРОРАТӢ

4.1. Таҳлили талафоти самаранокии дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ дар ҳароратҳои баланд

«Самаранокии истифодаи неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ аз таъсири маҷмуи омилҳои иқлимӣ ва ҳароратӣ муайян карда мешавад. Дар байни онҳо ҳарорат яке аз параметрҳои муҳимтарин буда, ба раванди табдили энергияи офтобӣ ва истеҳсолнокии умумии энергетикии низомҳои фотоэлектрикӣ таъсири мерасонад» [26]. Гарчанде ки радиатсияи офтобӣ манбаи асосии энергия барои табдили фотоэлектрикӣ мебошад, танҳо як қисми энергияи афтидаи офтобӣ ба энергияи электрикӣ табдил ёфта [32], қисми назарраси он ташкилдиҳандаҳои инфрасурх ба гармӣ мубаддал мегардад. Дар натиҷа, ҳарорати модулҳои фотоэлектрикӣ ҳангоми истифода метавонанд аз ҳарорати муҳити атроф ба таври назаррас баландтар бошад.

Ҳангоми шиддатнокии баланди радиатсия офтобӣ ва суръати пасти бод шамол ҳарорати кории МФЭ метавонад ба 60-70 ^{o}C, расад, ки боиси коҳиши назарраси самаранокии электрикӣ ва истеҳсоли энергетикии онҳо мегардад. Бинобар ин, таҳқиқи рафтори ҳароратии МФЭ ва арзёбии миқдории талафоти ҳароратӣ барои баланд бардоштани самаранокии истифодаи неругоҳҳои фотоэлектрикӣ аҳамияти муҳим дорад [84], [85], [86].

Нишондиҳандаҳои электрикии МФЭ аз ҳарорати элементҳои фотоэлектрикӣ ба таври назаррас вобаста мебошанд. Ҳангоми баланд шудани ҳарорати маводи нимноқилӣ паҳнои минтақаи манъшуда кам мешавад, ки боиси коҳиш ёфтани шиддати кори бебор (U_{oc}) мегардад. Ҳамзамон, ҷараёни расиши кӯтоҳ (I_{sc}) ба андозаи хеле камтар тағйир ёфта, одатан бо баланд шудани ҳарорат каме зиёд мешавад, ки ба тағйирёбии хусусиятҳои истеҳсолӣ (генератсия) ва рекомбинатсияи (аз нав пайвастшавии электронҳо ва сӯрохиҳо дар нимноқил) интиқолдиҳандагони заряд вобаста аст. Аммо афзоиши ҷараён

коҳишёбии шиддатро ҷуброн карда наметавонад ва дар натиҷа иқтидори максималии истеҳсолии МФЭ бо баланд шудани ҳарорати корӣ паст мегардад. Ин қонуниятҳо дар бобҳои болотар муфассал дарҷ карда шудаанд [118-122].

Барои модулҳои кремнии кристалӣ, ки қисми асосии иқтидори насбшудаи фотоэлектрикии ҷаҳониро ташкил медиҳанд, зариби (коэффисенти) ҳароратии иқтидор одатан дар ҳудуди -0,35 то -0,50% ^{o}C нисбат ба шароити стандартии санҷиш (STC) ҳангоми ҳарорати элементи 25 ^{o}C қарор дорад. «Ҳамин тавр, ҳангоми баланд шудани ҳарорати элемент то 65 ^{o}C, дар сурати бетағйир мондани шиддатнокии радиатсияи офтобӣ, коҳиши иқтидори максималӣ метавонад тақрибан 14-20 %» [8] нисбат ба қимати номиналӣ дар шароити стандартии санҷиш STC-ро ташкил диҳад [86], [87].

Рафтори ҳароратии МФЭ аз тавозуни байни фурӯбарии радиатсияи офтобӣ, табдил додани қисми энергияи фурӯбурдашуда ба энергияи электрикӣ, мубодилаи гармии конвективӣ ва шуоъдиҳии гармӣ муайян карда мешавад. Ҳангоми ба сатҳи модул ворид шудани радиатсияи офтобӣ танҳо қисми маҳдуди он (қисми дидашавандаи спектри офтобӣ) ба энергияи электрикӣ табдил меёбад, дар ҳоле ки қисми назарраси энергияи фурӯбурдашуда ба гармӣ табдил шуда, боиси гармшавии элементҳои фотоэлектрикӣ мегардад.

Ҷамъшавии гармӣ махсусан дар шароити шиддатнокии баланди радиатсия офтобӣ ва суръати пасти бод (шамол), ки барои минтақаҳои хушк ва нимхушк хос мебошанд, бештар зоҳир мегардад. Дар чунин шароит шиддатнокии хориҷшавии гармӣ аз сатҳи модул коҳиш ёфта, боиси баланд шудани ҳарорати элементҳои фотоэлектрикӣ ва дар натиҷа, афзоиши талафоти ҳароратӣ мегардад [87], [88].

Алоқамандии байни ҳарорати муҳити атроф ва ҳарорати элементи фотоэлектрикӣ хусусияти ғайрихаттӣ дорад, зеро он аз таъсири маҷмуи радиатсияи офтобӣ, суръати бод, шароити насб ва хусусиятҳои гармифизикии маводи модул вобаста мебошад. Дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ, ки дар конструксияҳои кушода насб шудаанд, одатан ба туфайли гардиши озоди ҳаво

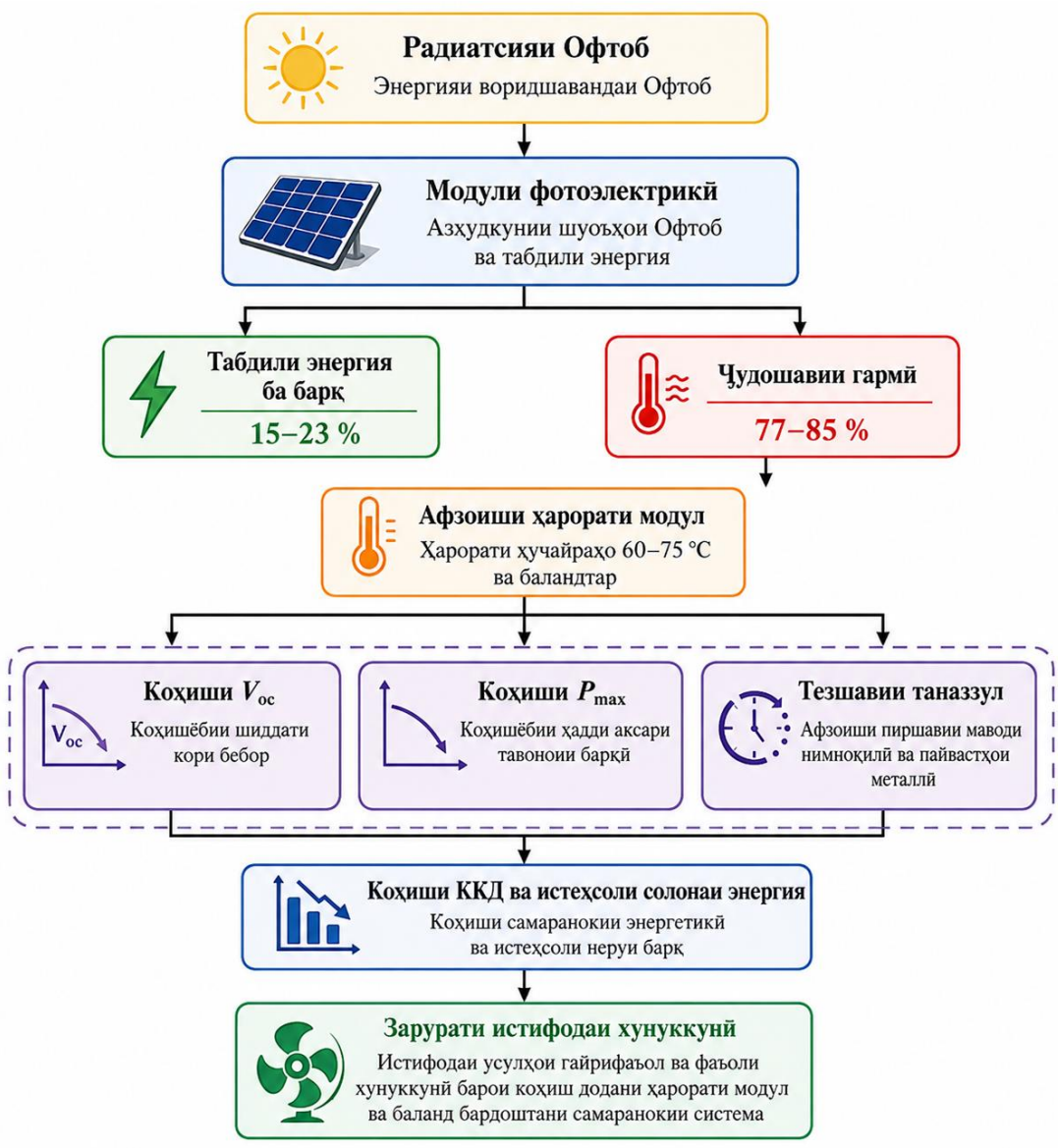
бо хунукшавии табиии самараноктар тавсиф мешаванд, дар ҳоле ки стемаҳои бомӣ метавонанд аз сабаби маҳдуд будани ҷараёни ҳаво дар зери модулҳо дар ҳарорати баландтар кор кунанд. «Аз ин лиҳоз, модулҳои якхелаи фотоэлектрикӣ, ки дар шароити гуногуни насб ва истифода ҷойгир карда шудаанд, метавонанд ҳароратҳои кории ба таври назаррас фарқкунанда ва мутаносибан истеҳсоли энергетикии гуногун доштат бошанд» [3], [89].

Илова бар ин коҳиш ёфтани иқтидори фаврии истеҳсолӣ, ҳарорати баланди корӣ механизмҳои гуногуни таназзули МФЭ-ро низ метезонад. Даврaҳои такроршавандаи ҳароратӣ, ки дар натиҷаи тағйирёбии шабонарӯзии ҳарорат ба вуҷуд меоянд, дар пайвастаҳои кафшершуда, тамосҳои электрикӣ, қабатҳои инкапсулатсиякунада ва маводи нимноқилӣ ҳиддатҳои механикӣ ба вуҷуд меоранд. Ҳангоми истифодаи дарозмуддат ҷамъшавии чунин шиддатҳои термомеханикӣ ба пайдоиши микрокафидаҳо, қабатқабатшавӣ (деламинатсия), тағйирёбии ранги маводи инкапсулатсиякунада ва таназзули тамосҳои электрикӣ мусоидат мекунад. Рушди ин равандҳо боиси тадриҷан зиёд шудани муқовимати электрикӣ ва коҳиш ёфтани эътимоднокии дарозмуддати низомҳои фотоэлектрикӣ мегардад. Ҳамин тариқ, омили ҳароратӣ на танҳои ба истеҳсоли кӯтоҳмуддати неруи барқ, балки ба муҳлати хизмати МФЭ ва талаботи истифодабарии неругоҳи фотоэлектрикӣ низ таъсир мерасонад [90], [123-126].

Талафоти ҳароратӣ дар минтақаҳои дорои захираи баланди офтобӣ ва ҳарорати баланди муҳити атроф аҳамияти махсус пайдо мекунанд. Дар шароити иқлими гарм МФЭ дар реҷаҳои корие истифода мешаванд, ки аз шароити стандартии озмоиш ба таври назаррас фарқ мекунанд. Мувофиқи шароити стандартии санҷиш STC, ҳарорти элементи фотоэлектрикӣ 25 ^{o}C ва зичии радиатсия офтобӣ 1000 Вт/м^2 мебошад. Дар шароити воқеии истифодабарӣ бошад, ҳарорати кории элементҳо метавонад аз ин қимат ба таври назаррас баландтар гардад [90]. Аз ин сабаб, истеҳсолнокии энергетикие, ки дар шароити стандартии лабораторӣ муайян карда мешавад, метавонанд аз истеҳсоли воқеии энергияи низоми фотоэлектрикӣ ҳангоми

истифодабарӣ фарқ кунад. Ин номувофиқатӣ зарурати ба назар гирифтани таъсири ҳароратро ҳангоми арзёбии истеҳсолнокии дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ ва пешгӯии истеҳсоли неруи барқ муайян менамояд [91].

Нақшаи таъсири ҳарорат ба самаранокии фаъолияти низоми фотоэлектрикӣ дар расми 4.1 оварда шудааст.



Расми 4.1. – Нақшаи таъсири ҳарорат ба самаранокии фаъолияти низоми фотоэлектрикӣ

«Таъсири ҳароратро бо истифода аз моделҳои математикӣ, ки тавозуни гармии модулҳои фотоэлектрикиро тавсиф мекунанд, ба таври миқдорӣ арзёбӣ карда мумкин аст. Чунин моделҳо имкон медиҳанд, ки ҳарорати элементҳои фотоэлектрикӣ вобаста ба ҳарорати муҳити атроф, шиддатнокии радиатсия

офтобӣ ва суръати бод (шамол) муайян карда шавад» [3]. Моделҳои мураккабтари ададӣ ба таври иловагӣ хусусиятҳои гармифизикии маводи модул, зариби мубодилаи гармӣ ва параметрҳои муҳити атрофро ба назар мегиранд.

Истифодаи чунин моделҳо имкон медиҳад, ки ҳарорати кории МФЭ дар шароити гуногуни иқлимӣ пешгӯӣ карда шуда, маълумоти ибтидоӣ барои лоиҳакашии низомҳои фотоэлектрикӣ ва банақшагирии реҷаҳои истифодабарии онҳо ба даст оварда шавад [92].

Моделсозии компютерӣ воситаи самараноки таҳқиқи равандҳои ҳароратӣ дар низомҳои фотоэлектрикӣ ба ҳисоб меравад. Платформаҳои муосири барномавӣ, аз қабили MATLAB/Simulink ва PVsyst, имкон медиҳанд, ки таъсири параметрҳои муҳити атроф ба ҳарорати МЭФ ва тавсифоти энергетикии онҳо бидуни зарурати анҷом додани ҳаҷми зиёди ченкуниҳои таҷрибавӣ арзёбӣ карда шавад. Ҳамгироии маълумоти метеорологӣ бо моделҳои математикии элементҳои фотоэлектрикӣ имконият медиҳад, ки динамикаи соатбайъ, шабонарӯзӣ ва солонаи истеҳсоли неруи барқ бо дарназардошти таъсири ҳароратӣ арзёбӣ карда шавад. Моделсозӣ инчунин имконияти муқоисаи технологияҳои гуногуни МФЭ, вариантҳои ҷойгиркунии онҳо ва усулҳои хунуккуниро дар шароити якхелаи беруна фароҳам меорад [93].

Яке аз нишондиҳандаҳои асосие, ки барои арзёбии устувории ҳароратии МФЭ истифода мешавад, зариби (коэффисенти) ҳароратии иқтидор мебошад, ки тағйирёбии нисбии иқтидори максималии истеҳсолиро ҳангоми тағйир ёфтани ҳарорати элементи офтобӣ ба андозаи 1 ^{o}C тавсиф мекунад [27].

Азбаски қимати ин зариб аз технологияи истифодашудаи фотоэлектрикӣ вобаста мебошад, интихоби навъи модул ҳангоми лоиҳакашии неругоҳи фотоэлектрикӣ дар минтақаҳои дорои ҳарорати баланди муҳити атроф аҳамияти махсусро пайдо мекунад. Барои модулҳои кремнии монокристаллӣ зариби ҳароратии иқтидор одатан дар ҳудуди аз -0,35 то -0,45%/^{o}C қарор

дорад, дар ҳоле ки модулҳои поликристаллӣ метавонанд ҳасосияти ҳароратии нисбатан баланд дошта бошанд.

Технологияҳои фотоэлектрикии қабати тунук (аморфӣ), одатан, бо зарибҳои ҳароратии аз ҷиҳати мутлақ камтар тавсиф шуда, дар натиҷа ҳангоми ҳарорати баланд истеҳсоли нисбатан устувори неруи баркро таъмин мекунанд, гарчанде ки самаранокии номиналии онҳо дар шароити стандартӣ нисбатан пасттар мебошад.

Таҳлили талафоти ҳароратӣ инчунин аҳамияти механизмҳои хунуккунии неругоҳҳои фотоэлектрикиро нишон медиҳад. «Конвенсияи табиӣ, хунукшавӣ дар зери таъсири бод, оптимизатсияи қарорҳои конструктивӣ ҳангоми насб ва истифодаи усулҳои идоракунии реҷаи ҳароратӣ ба коҳиш додани ҳарорати кории МФЭ ва баланд бардоштани истеҳсолнокии электрикии онҳо мусоидат мекунанд» [4]. Ҳатто коҳиши мӯътадили ҳароратӣ корӣ ба чанд дараҷа метавонад боиси афзоиши назарраси истеҳсоли солонаи неруи барқ гардад.

Натиҷаҳои моделсозӣ нишон медиҳанд, ки талафоти ҳароратӣ дар давоми сол доимӣ набуда, хусусияти равшани мавсимӣ доранд. Дар моҳҳои зимистон ҳарорати нисбатан пасти элементҳои фотоэлектрикӣ имкон медиҳад, ки модулҳо наздиктар ба шароити стандартӣ фаъолият кунанд, ки ин нигоҳдории самаранокии нисбатан баланди табдили энергияро ҳатто ҳангоми шиддатнокии камтари радиатсияи офтобӣ таъмин менамояд. «Дар моҳҳои тобистон бошад, шиддатнокии баланди радиатсияи офтобӣ бо баланд шудани назарраси ҳарорати кории модулҳо ҳамроҳ мегардад ва дар натиҷа, сарфи назар аз зиёд шудани захираи дастраси офтобӣ, талафоти ҳароратӣ афзоиш меёбанд» [3].

Ин тағйироти мавсимиро ҳангоми арзёбии истеҳсолнокии солонаи энергетикии неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ ба назар гирифтан зарур аст [89-93].

Таҳлили анҷомдодашуда тасдиқ менамояд, ки равандҳои ҳароратӣ яке аз омилҳои асосии муайянкунандаи нишондиҳандаҳои истифодабарии низомҳои

фотоэлектрикӣ мебошанд. «Баланд шудани ҳарорати корӣ боиси коҳиш ёфтани шиддати кори бебор, кам шудани иқтидори максималии истеҳсолӣ ва ҳангоми таъсири дарозмуддат, тез гардидани равандҳои таназзули маводҳо мегардад, ки дар маҷмуъ истеҳсолнокии энергетикии неругоҳҳои барқи фотоэлектрикиро коҳиш медиҳад» [4]. Бинобар ин, моделсозии боэътимоди рафтори ҳароратии МФЭ барои пешгӯии дурусти нишондиҳандаҳои электрикии онҳо дар шароити воқеии иқлимӣ зарур мебошад.

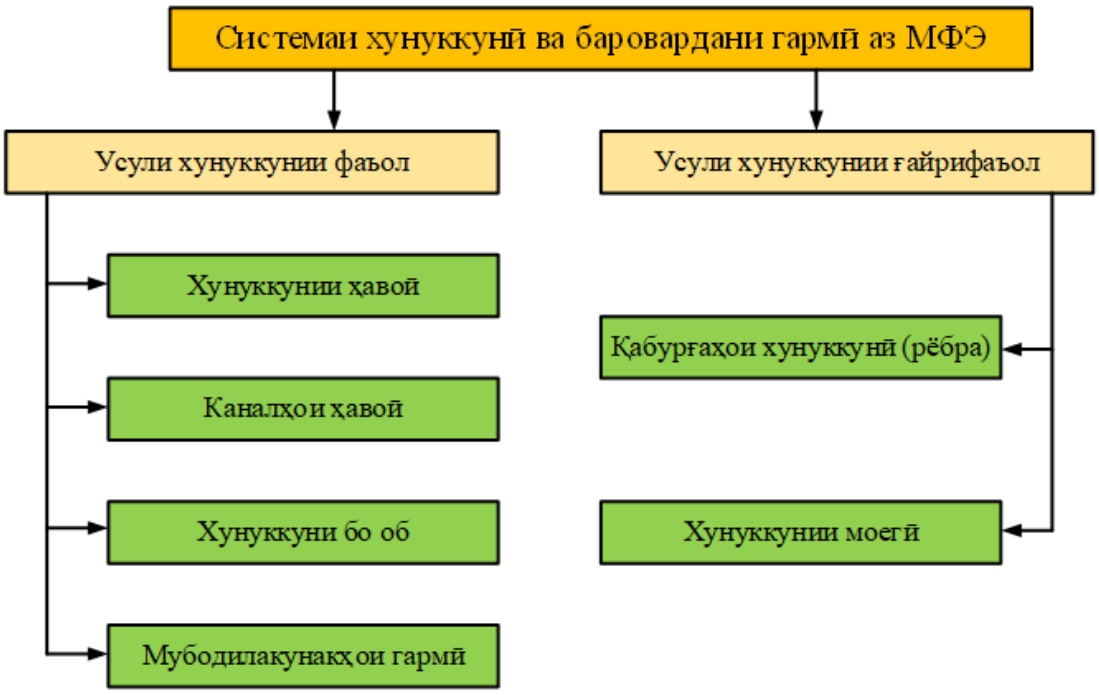
Ҳамгироии моделҳои ҳароратӣ ба ҳисобҳои низомҳои фотоэлектрикӣ заминаи илмиро барои арзёбии миқдории талафоти ҳароратӣ, такмили қарорҳои лоиҳавӣ ва таҳияи чорабиниҳои муҳандисӣ [32], ки ба баланд бардоштани самаранокии энергетикӣ ва эътимоднокии дарозмуддати неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ дар шароити ҳарорати баланд равона шудаанд, фароҳам меорад.

4.2. Усулҳои коҳиш додани талафоти ҳароратии дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ дар асоси хунуккунии фаъол ва ғайрифаъол

Самаранокии низомҳои фотоэлектрикӣ аз ҳарорати кории МФЭ ба таври назаррас вобаста мебошад. «Тавре ки дар зербоби қаблӣ қайд гардид, баланд шудани ҳарорати элементҳои фотоэлектрикӣ боиси коҳиш ёфтани шиддати кори бебор, кам шудани иқтидори максималии истеҳсолӣ ва тез гардидани равандҳои таназзули маводҳо мегардад» [8]. Дар робита ба ин, дар таҳқиқот ба таҳияи технологияҳои хунуккунӣ, ки ба нигоҳ доштани ҳарорати кории модулҳо дар ҳудуди оптималӣ равона шудаанд, диққати махсус дода мешавад. Вобаста ба зарурати истифодаи энергияи иловагӣ барои хориҷ намудани гармии зиёдатӣ, усулҳои хунуккунӣ ба хунуккунии фаъол ва ғайрифаъол ҷудо карда мешаванд. Дар расми 4.2 таснифоти системаҳои асосии хунуккунӣ ва хориҷ намудани гармӣ дар низомҳои фотоэлектрикӣ истифодашаванда пешниҳод шудааст [94].

Усулҳои хунуккунии ғайрифаъол имкон медиҳанд, ки ҳарорати кории МФЭ бидуни истеъмоли иловагии неруи барқ коҳиш дода шавад. Амали онҳо

ба механизмҳои табиии интиқоли гармӣ, аз ҷумла гармигузаронӣ, конвексия ва шуоъдиҳии гармӣ асос меёбад. «Набудани насосҳо шамолдиҳандаҳо (вентиляторҳо) ва дигар таҷҳизоти ёрирасон содагии конструктивӣ, талаботи паст ба хизматрасонии техникӣ, эътимоднокии баланди истифодабарӣ ва харочоти ҳадди ақали истифодабариро таъмин менамояд» [4]. Аз ин сабаб, системаҳои хунуккунии ғайрифаъол барои дастгоҳҳои фотоэлектрикие, ки дар минтақаҳои дурдаст истифода мешаванд ва дар онҳо эътимоднокӣ ва автономии система аҳамияти аввалиндараҷа доранд, таваҷҷуҳи махсусро ба худ ҷалб менамоянд [95].



Расми 4.2. – Усулҳо ва технологияҳои маълуми коҳиш додани ҳарорати сатҳи модулҳои фотоэлектрикӣ

Яке аз усулҳои содатарини хунуккунии ғайрифаъол насб намудани қабурғаҳои хунуккунӣ (рёбра) дар сатҳи қафои МФЭ мебошад [3]. Қабурғаҳои хунуккунӣ масоҳати самараноки мубодилаи гармиро зиёд намуда, ба пурзӯр шудани конвексияи табиӣ байни сатҳи қафои модул ва ҳавои муҳити атроф мусоидат мекунанд. Бо зиёд шудани масоҳати мубодилаи гармӣ, гармии ҳангоми кори МФЭ ҳосилшуда бо шиддатнокии бештар ба муҳити атроф хориҷ гардида, ба коҳиш ёфтани ҳарорати кории модул мусоидат мекунад.

«Тибқи маълумоти таҳқиқоти таҷрибавии дар манбаи овардашуда, қабурғаҳои алюмении хунуккунӣ дуруст тарҳрезишуда вобаста ба шароити бод (шамол) ва шиддатнокии радиатсияи офтобӣ метавонанд ҳарорати кории модулҳоро тақрибан 5-10 ^{o}C коҳиш диҳанд, ки ин бо баланд шудани самаранокии энергетикӣ ҳамроҳ мегардад» [3], [4], [95].

Роҳи дигари хунуккунии ғайрифаъол ин оптимизатсияи конструксияи насбкунӣ мебошад, ки ба беҳтар гардидани гардиши табиии ҳаво дар паси (зери) МФЭ мусоидат мекунад. Конструксияи баландбардоштаи насбкунӣ каналҳои вентелятсиониро ба вуҷуд меорад, ки ҳаракати пайвастаи ҷараёни ҳаворо таъмин менамоянд. Ҳавои гармшуда дар натиҷаи конвексияи табиӣ ба боло ҳаракат карда, ҷойи онро ҳавои нисбатан хунуки муҳити атроф мегирад.

Ин усул махсусан барои дастгоҳҳои бузурги фотоэлектрикӣ самаранок мебошад, зеро ҳанӯз дар марҳалаи лоиҳакашӣ имконияти пешбинӣ намудани фазои кофӣ байни қаторҳои модулҳо вуҷуд дорад.

Таҳқиқоти муосир ҳамзамон ба истифодаи мавод ва рӯйпӯшҳои ояндадори хунуккунии ғайфаъол, аз ҷумла маводҳои дорои гузариши фазафӣ (РМС), маводи композитии дорои гармигузаронии баланд ва рӯйпӯшҳои хунуккунии радиатсионӣ равона шудаанд. Маводҳои дорои гузариши фазавӣ ҳангоми гузариш аз ҳолати сахт ба ҳолати моеъ гармии пинҳониро фурӯ бурда, имкон медиҳанд, ки баландшавии ҳарорати МФЭ дар даврaҳои шиддатнокии баланди радиатсияи офтобӣ маҳдуд карда шавад.

Рӯйпӯшҳои хунуккунии радиатсионӣ ба зиёд шудани шиддатнокии шуоъдиҳии гармии инфрасурх ба самти фазои осмон мусоидат карда, ҳамзамон шаффофияти баланди оптикиро дар ҳудуди радиатсияи офтобӣ нигоҳ медоранд. Бо вуҷуди натиҷаҳои таҷрибавии ояндадори бадастомада, истифодаи амалӣ ва тиҷоратии технологияҳои мазкур ҳанӯз маҳдуд буда, ин ба арзиши онҳо, мураккабии ҳамгироӣ ба конструксияи модул ва талаботи баланд ба устуворӣ ва эътимоднокии дарозмуддат вобаста мебошад [96].

Бо вуҷуди содагии конструктивӣ, усулҳои хунуккунии ғайрифаъол як қатор маҳдудиятҳоро дорост. Самаранокии онҳо ба шароити метеорологӣ, пеш

аз ҳама, ба суръати бод (шамол) ва ҳарорати муҳити атроф, ба таври назаррас вобаста мебошад. Ҳангоми ҳавои ниҳояд гарм ва бе шамол конвексияи табиӣ метавонад барои нигоҳ доштани ҳарорати кории МФЭ дар сатҳи қобили қабул нокифоя бошад. Дар чунин шароит истифодаи технологияҳои хунуккунии фаъол имкон медиҳад, ки хориҷ намудани гармӣ бо шиддатнокии бештар анҷом дода шуда, реҷаи ҳароратӣ самараноктар танзим карда шавад.

Усулҳои хунуккунии фаъол барои пӯрзур кардани хориҷкунии гармӣ аз МФЭ таҷҳизоти беруна истифода мебаранд. Бо вуҷуди зарурати истеъмоли иловагии неруи барқ барои кори чунин системаҳо, онҳо одатан нисбат ба усулҳои ғайрифаъол коҳиши бештари ҳарорати кориро таъмин менамоянд. Истифодаи онҳо махсусан барои дастгоҳҳои бузурги фотоэлектрикӣ мувофиқи мақсад аст, зеро истеҳсоли иловагии неруи барқ метавонад ҳароҷоти энергетикии кори низоми хунуккуниро ҷуброн намояд [97]. Хунуккунии ҳавоӣ яке аз усулҳои маъмултарини хунуккунии фаъол ба ҳисоб меравад. Дар системаҳои хунуккунии маҷбурии ҳавоӣ шамолдиҳандаҳои (вентилятор) электрикӣ гардиши ҳаворо дар пас ё болои МФЭ таъмин карда, зариби мубодилаи гармии конвективиро зиёд мекунанд.

«Дар муқоиса бо вентилятори табиӣ, конвексияи маҷбурӣ хориҷкунии гармиро пурзӯр намуда, имкон медиҳад, ки ҳарорати элементҳои фотоэлектрикӣ дар даврaҳои шиддатнокии баланди радиатсияи офтобӣ дар сатҳи нисбатан паст нигоҳ дошта шавад» [25]. «Тибқи натиҷаҳои таҳқиқоти ҳисобӣ ва таҷрибавии дар манбаи [8] овардашуда, хунуккунии маҷбурии ҳавоӣ метавонад ҳарорати модулро тақрибан 10-15 °С коҳиш диҳад, ки бо баланд шудани самаранокии электрикӣ ба андозаи 5-8 % ҳамроҳ мегардад» [8].

Усули дигари хунуккунии фаъоли ҳавоӣ истифодаи каналҳои ҳавоӣ мебошад, ки ба конструксияи такягоҳии дастгоҳи фотоэлектрикӣ ҳамгиро карда мешаванд. Чунин каналҳо тақсимоти самтнок ва нисбатан якхелаи ҷараёни ҳаворо дар сатҳи пушти модулҳо таъмин карда, ба коҳиш додани минтақаҳои маҳаллии аз ҳад зиёд гармшуда ва баланд бардоштани якхелагии ҳарорат мусоидат мекунанд. Дар низомҳои мураккабтар вентиляторҳои ба

таври худкор танзимшаванда истифода мешаванд, ки шиддатнокии кори онҳо вобаста ба ҳарорати ҷории модулҳо тағйир меёбад. Ин усул имкон медиҳад, ки ҳангоми шароити мӯътадили атроф истеъмоли барзиёди неруи барқ аз ҷониби системаи хунуккунӣ маҳдуд карда шавад.

Хунуккунии обӣ ба усулҳои самаранокторини фаъоли хориҷкунии гармӣ дохил мешавад, зеро об нисбат ба ҳаво иқтидори гармии хос ва гармигузаронии баландтар дорад. «Дар низомҳои фотоэлектрикии бо об хунукшаванда қабати тунуки оби равон ё системаи қубурҳои хунуккунанда хориҷкунии гармии зиёдатиро аз сатҳи пушти модулҳо таъмин менамояд» [3]. Энергияи гармии хориҷшуда метавонад иловатан барои тайёр кардани оби гарм ё гармидиҳӣ истифода шавад, ки имконияти ташаккули низомҳои гибридии (омехта) фотоэлектрикию гармиро фароҳам меорад. Чунин дастгоҳҳо ҳамзамон энергияи электрикӣ ва гармӣ истеҳсол карда, нисбат ба низомҳои анъанавии фотоэлектрикӣ истифодаи пурратари энергияи воридшавандаи офтобиро таъмин мекунанд [98-99].

Мубодилакунакҳои гармӣ боз як гурӯҳи технологияҳои фаъоли хунуккуниро ташкил мекунанд. Дар чунин системаҳо гармибарандаи дар гардишбуда гармиро аз МФЭ хориҷ намуда, онро ба захиракунакҳои берунии гармӣ ё контурҳои дуюмдараҷаи хунуккунӣ интиқол медиҳад.

Мубодилакунакҳои гармӣ асосан дар неругоҳҳои барқи фотоэлектрикии иқтидори бузург ва системаҳои гибридии энергетикаи барқароршаванда истифода мешаванд, ки дар онҳо энергияи гармии хориҷшуда метавонад минбаъд мавриди истифода қарор гирад. Бо вуҷуди зарурати истифодаи тачҳизоти мураккабтари гидравликӣ ва системаҳои идоракунӣ, чунин қарорҳо имкон медиҳанд, ки самаранокии хориҷкунии гармӣ баланд бардошта шуда, нишондиҳандаҳои электрикӣ ва самаранокии умумии энергетикии система беҳтар карда шаванд. Интихоби усули оптималии хунуккунӣ аз маҷмуи омилҳои техникӣ ва иқтисодӣ, аз ҷумла шароити иқлимӣ, иқтидори насбшудаи система, навъи насбкунӣ, дастрасии об, талаботи хизматрасонии техникӣ ва зароҷоти сармоягузорӣ вобаста мебошад. Усулҳои хунуккунии ғайрифаъол,

одатан, барои дастгоҳҳои фотоэлектрикии дурдаст аз сабаби содагии конструктивӣ, эътимоднокии баланд ва набудани истеъмоли иловагии неруи барқ афзалтар мебошанд. Системаҳои хунуккунии фаъол барои неругоҳҳои фотоэлектрикии иқтидори бузург бештар мувофиқи мақсад мебошанд, зеро афзоиши истеҳсоли солонаи неруи барқ метавонад хароҷоти иловагии насб ва истифодаи таҷҳизотро ҷуброн намояд [100].

Аз нуқтаи назари муҳандисӣ, дар баъзе мавридҳо якҷоя намудани усулҳои ғайрифаъол ва фаъоли хунуккунӣ имкон медиҳад, ки стратегияи самараноктари идоракунии реҷаи ҳароратӣ ташаккул дода шавад.

Масалан, вентилятсияи табиии оптимизатсияшуда метавонад дар давраҳои шиддатнокии ниҳоят баланди радиатсияи офтобӣ бо хунуккунии даврии маҷбурии ҳавоӣ пурра карда шавад. Ин имкон медиҳад, ки ҳарорати кории модулҳо ҳангоми истеъмоли маҳдуди иловагии неруи барқ коҳиш дода шавад. Ба ҳамин монанд, қабурғаҳои гармибарор метавонанд якҷо бо мубодилакунакҳои гармии обӣ барои баланд бардоштани самаранокии хориҷкунии гармӣ истифода шаванд. Системаҳои гибридии хунуккунӣ танзими самараноки ҳарорати корӣ, баланд бардоштани истеҳсолнокии электрикӣ ва эътимоднокии низоми фотоэлектрикро ҳангоми тағйирёбии шароити муҳити атроф таъмин менамоянд [127-130].

Дар маҷмуъ, коҳиш додани ҳарорати кории МФЭ яке аз роҳҳои амалии баланд бардоштани истеҳсолнокии энергетикии онҳо мебошад. Идоракунии самараноки реҷаи ҳароратӣ на танҳо ба баланд шудани самаранокии ҷории электрикӣ мусоидат мекунад, балки шиддатнокии равандҳои дарозмуддати таназзули маводҳоро низ коҳиш дода, ба зиёд шудани муҳлати ҳизмати модулҳо ва баланд гардидани самаранокии иқтисодии неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ мусоидат менамоянд. Ҳамин тариқ, интихоб ва оптимизатсияи технологияҳои хунуккунӣ ҷузъҳои муҳими лоиҳакашии низомҳои муосири фотоэлектрикӣ ба ҳисоб рафта, махсусан барои минтақаҳои дорои ҳарорати баланди муҳити атроф ва радиатсияи шиддатноки офтобӣ, аз ҷумла ноҳияҳои ҷанубии Ҷумҳурии Тоҷикистон, аҳамияти калон доранд.

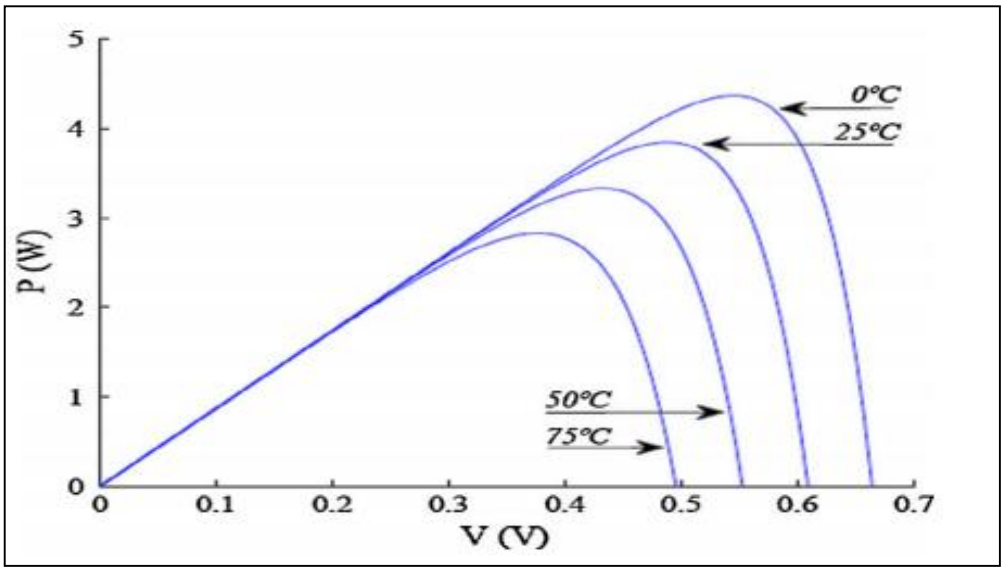
4.3. Методикаи ҳисоб намудани тавсифотҳои энергетикии дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ бо истифода аз муҳофизати гармии модулҳо

Равандҳои электрикие, ки дар элементҳои фотоэлектрикӣ, ҳамчун дар дигар дастгоҳҳои нимноқилӣ ба амал меоянд, ба қонуниятҳои бунёдии физикаи нимноқилҳо итоат мекунанд. Баланд шудани ҳарорати кори элементи фотоэлектрикӣ боиси кам шудани паҳнои минтақаи манъшудаи кремний ва зиёд шудани ҷараёни баръакси мершавӣ мегардад. Ин ба афзоиши консентратсияи интиқолдиҳандагони заряд ва тағйирёбии шароити генератсияи ва рекомбинатсияи ҷуфтҳои электрокӣ-сӯрохӣ вобаста мебошад [34], [83].

Бо баланд шудани ҳарорат ҷараёни расиши кӯтоҳ (I_{sc}) ба андозаи кам тағйир меёбад, дар ҳоле ки шиддати кори бебор (U_{oc}) ба таври назаррас бештар коҳиш меёбад. Камшавии шиддат ба истеҳсоли $U{\cdot}I$ таъсири бартаридошта расонида, дар натиҷа иқтидори максималии истеҳсолӣ ва самаранокии табдилдиҳии энергияи модули фотоэлектрикӣ коҳиш меёбад.

Таъсири ҳарорат ба тавсифоти иқтидори МФЭ ҳангоми шиддатнокии доимии радиатсияи офтобӣ 1000 Вт/м^2 дар расми 4.3 пешниҳод гардидааст. Дар расм тавсифоти иқтидору шиддати (тавсифоти тавоноӣ)-и модул дар ҳарорати стандартии 25 ^{o}C ва ҳангоми баланд шудани ҳарорати сатҳи пеши он ба андозаи 25 ва 50 ^{o}C, ки мутаносибан ба ҳарорати 50 ва 75 ^{o}C мувофиқат мекунанд, муқоиса шудаанд. Вобастагиҳои бадастомада коҳишёбии мунтазами иқтидори максималии истеҳсоли модули фотоэлектрикиро бо баланд шудани ҳарорати кории он нишон медиҳанд.

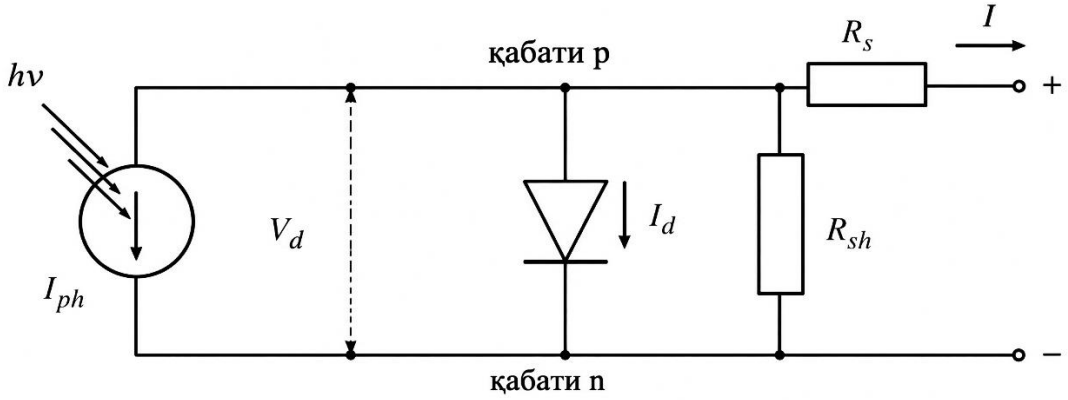
Таҳқиқоти дар кори диссертатсионии мазкур пешниҳодшуда бо истифода аз модули фотоэлектрикии SOLARMODUL ALEO S19 HE бо иқтидори номиналии 300 Вт анҷом дода шудааст [34], [69], [83]. Хусусиятҳои асосии техникии ин модул, ки дар ҷадвали 2.4 оварда шудааст, дар шароити стандартии санҷиш (STC) муайян карда шудааст, ки ба ҳарорати ЭФЭ 25 ^{o}C ва зичии иқтидори радиатсияи офтобӣ 1000 Вт/м^2 мувофиқат мекунад.



Расми 4.3. – Тавсифоти вобастагии иқтидори истеҳсолии ЭФЭ аз шиддат дар ҳарорати гуногуни сатҳи он

Дар асоси тавсифоти электрикии модули фотоэлектрикии интихобшуда параметрҳои як элементи алоҳидаи офтобӣ муайян карда шудааст, то ки минбаъд тавсифоти электрикӣ ва ҳароратии он таҳлил карда мешавад.

Нақшаи эквивалентии бадалии як элементи фотоэлектрикӣ (PV), ки дар таҳқиқоти диссертатсионӣ барои моделсозии математикӣ истифода шудааст, дар расми 4.4 нишон дода шудааст [34], [69], [83].



Расми 4.4. – Нақшаи бадалии элементи офтобӣ

Расми 4.4 нақшаи эквивалентии электрикии элементи офтобиро нишон медиҳад, ки дар он (I_{ph}) фотоҷараён, (R_s) муқовимати пайдарпай ва (R_{sh}) муқовимати шунтӣ мебошад. Ғайр аз ин, (I_d) ва (V_d) мутаносибан ҷараён аз диоди дорои ғечиши мустақим гузаранда ва шиддати қутбҳои (p-n)-гузаришро ифода мекунад [34], [83], [101]. Қимати ҷараёни фотоэлектрикӣ (I_{ph}), пеш аз

ҳама, бо шиддатнокии афканишоти офтобии афтидаистода ва хосиятҳои оптикии маводи фотоэлектрикӣ муайян карда мешавад.

Шиддати ЭФЭ бо ҷараёни фотоэлектрикӣ вобастагии логарифмӣ дошта, аз қимати он ва ҳарорати корӣ ба таври назаррас вобаста мебошад, ки бо баробарии зерин ифода карда мешавад [83], [102].

$$U_{ЭФЭ} = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \cdot \left(\frac{I_{ph} - I_{ЭФЭ}}{I_d} \right) + 1, \quad B \tag{4.1}$$

“Ин ҷо $k = 1{,}380649 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – доимии Болсман; T – ҳарорати мутлақи элементи фотоэлектрикӣ, K; $q = 1{,}60217662 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряди электрикии элементарӣ; I_{ph} – фототоҷараён, А; $I_{ЭФЭ}$ – ҷараёни элементи фотоэлектрикӣ, А; I_d – ҷараёни сершавии диод, А” [83].

Ҷараёни сершавии диод (I_d)-и элементи офтобӣ аз хосиятҳои физикии маводи нимноқилӣ, навъи барандагони заряд ва механизмҳои рекомбинатсияи онҳо дар сохтори ЭФЭ вобаста мебошад. Қимати он инчунин аз ҳарорати кории ЭФЭ ба таври назаррас вобаста аст.

Мувофиқи ифодаи (4.1) шиддати ($U_{ЭОФ}$) аз вобастагии логарифмии фарқи байни фотоҷараён (I_{ph}) ва ҷараёни ЭФЭ ($I_{ЭФЭ}$), инчунин аз ҷараёни диод (I_d) муайян карда мешавад. Дар ин ҳолат, баланд шудани ҳарорат боиси тағйирёбии параметрҳои диод ва дар натиҷа, тағйирёбии шиддати истеҳсолии ЭФЭ мегардад [34], [83]. Фотоҷараён (I_{ph}) асосан бо шиддатнокии афканишоти офтобии афтидаистода ва ҳарорати кории ЭФЭ муайян карда мешавад. Ҳангоми зиёд шудани шиддатнокии афканишоти офтобӣ қимати фотоҷараён меафзояд, дар ҳоле ки таъсири ҳарорат ба ҷараён нисбат ба таъсири он ба шиддати ЭФЭ хеле камтар мебошад [34], [83].

Бо дарназардошти таъсири ҳарорат ва тағйирёбии зичии иқтидории афканишоти офтобӣ, фотоҷараёни ЭФЭ бо формулаи зерин муайян карда мешавад.

$$I_{ph} = (I_{ph.STC} + K_i \Delta T) \frac{E}{E_{STC}}, \quad A \tag{4.2}$$

Дар ин ҷо $I_{ph.STC}$ – фотоҷараёни ЭФЭ дар шароити стандартии санҷиш (STC), ки бо ҳарорати ЭФЭ 25 ºС ва зичии иқтидори афканишоти офтобӣ 1000 Вт/м^2 мувофиқат мекунад; K_i – зариби ҳароратии фотоҷараён, А/ºС; $\Delta T = T_{мух.атр.} - T_{STC}$ – тағйирёбии ҳарорати ЭФЭ нисбат ба ҳарорати стандартии 25 ºС; E – зичии ҷории иқтидори афканишоти офтобӣ, Вт/м^2; E_{STC} – зичии ҷории иқтидори афканишоти офтобӣ дар шароити стандартии санҷиш, ки ба 1000 Вт/м^2 баробар аст. Ҷараёни сершавии диод (I_d) низ инчунин аз ҳарорат вобастагӣ дорад [34], [83], [103].

Вобастагии ҳароратии ҷараёни баръакси сершавии диоди ЭФЭ бо ифодаи зерин муайян карда мешавад:

$$I_d = I_{d,STC} \cdot \left(\frac{T_{STC}}{T} \right) \cdot \exp\left[\frac{q \cdot \Delta W}{a \cdot k_B} \cdot \left(\frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T} \right) \right], \ A \qquad (4.3)$$

Дар ин ҷо ΔW – энергияи минтақаи манъшудаи маводи нимноқилии ЭФЭ, Ҷоул; a = 1,3 – зариби идеалии диод, ки инҳирофи (отклонение) тавсифоти воқеии волтампериро аз модели идеал ба назар мегирад; $I_{d,STC}$ – ҷараёни сершавии диод дар шароити стандартии санҷиш (STC), А; T_{STC} = 298,15 К – ҳарорати мутлақи ЭФЭ дар шароити стандартии санҷиш; T – ҳарорати мутлақи ҷории ЭФЭ, К; q – заряди электрикии элементарӣ, Кл; k_B – доимии Болсман, Ҷ/К.

«Аз ифодаи 4.3 бармеояд, ки ҳангоми баланд шудани ҳарорати элементи фотоэлектрикӣ ЭФЭ ҷараёни сершавии диод меафзояд. Ин ҳолат бо вобастагии ҳароратии параметрҳои маводи нимноқилӣ ва пеш аз ҳама, бо зиёд шудани шиддати элементи фотоэлектрикӣ ЭФЭ ва дар натиҷа, кам шудани иқтидори максималии истеҳсолии он мегардад» [8].

Ҷараёни сершавии диод бо формулаи зерин муайян карда мешавад:

$$I_{d,STC} = \frac{I_{sc,STC}}{\exp\left(\frac{U_{oc,STC}}{a \cdot U_{t,STC}} \right) - 1}, \ A \qquad (4.4)$$

Дар ин ҷо $I_{sc,STC}$ – ҷарайни расиши кӯтоҳи элементи фотоэлектрикӣ ҳангоми STC, А; $U_{oc,STC}$ – шиддати кори бебори элементи фотоэлектрикӣ ҳангоми STC, В; $U_{t,STC}$ – шиддати ҳароратии элементи фотоэлектрикӣ ҳангоми STC, В.

Дар ин ҳолат шиддати ҳароратиро бо ифодаи зерин муайян кардан мумкин аст:

$$U_{t,STC} = \frac{n_s k T_{STC}}{q}, \quad B \tag{4.5}$$

Ин ҷо n_s – шумораи элементҳои фотоэлектрикии пайдарпай пайвастшуда дар модул.

Барои арзёбии қобилияти кории МФЭ дар ҳарорати баланди корӣ таъсири ҳарорат ба тавсифоти волтамперӣ (I-V) ва тавоӣ (P-V)-и он бояд ба назар гирифта шавад. Тибқи маълумоти ҷадвали 2.4, зариби ҳароратии шиддат K_V ба -0,29%/°С баробар аст. Қимати манфии ин зариб аз паст шудани шиддати МФЭ ҳангоми баланд шудани ҳарорати ЭФЭ шаҳодат медиҳад.

Ҳамзамон, модули дар таҳқиқоти диссертатсионӣ истифодашуда аз 60 элементи пайдарпай пайвастшуда иборат буда, бинобар ин тағйирёбии ҳароратии шиддати элементҳои алоҳида ҷамъ шуда, ба шиддати умумии модул таъсири ҷиддӣ мерасонад.

Бар хилофи зариби ҳароратии шиддат, зариби ҳароратии ҷараён K_I қимати мусбат дошта, тақрибан ба 0,05 %/°С баробар аст. «Дар ин маврид, ҳангоми иҷрои ҳисобҳои амалии муҳандисӣ диққати асосиро бояд ба тағйирёбии ҳарорати шиддат равона кард, зеро таъсири ҳарорат ба ҷараён нисбат ба таъсири он ба шиддат хеле камтар мебошад» [4], [83], [104].

Зариби ҳароратии иқтидори максималии МФЭ-и дар кори диссертатсионии истифодашуда тақрибан ба -0,40 %/К баробар аст. Қимати манфии ин зариб маънои онро дорад, ки ҳангоми баланд шудани ҳарорати ЭФЭ иқтидори максималии истеҳсоли модул паст мешавад. Бояд қайд намуд, ки тавсифоти электрикии модули фотоэлектрикӣ асосан бо ҳарорати кории элементи фотоэлектрикии он муайян карда мешавад, на бевосита бо ҳарорати

муҳити атроф. Дар шароити воқеии истифодабарӣ ҳарорати элементҳо метавонад дар натиҷаи фӯрубарии афканишоти офтобӣ ва ба гармӣ табдил ёфтани қисми он аз ҳарорати муҳити атроф ба таври назаррас баландтар бошад [34], [83].

Ҷараён расиши кӯтоҳи МФЭ дар наздикшавии якум бевосита аз зичии иқтидори афканишоти офтобии афтидаистода вобаста мебошад. Аз ин сабаб, қимати он дар давоми шабонарӯз мутобиқи тағйирёбии шиддатнокии афканишоти офтобӣ тағйир меёбад. Баръакс, шиддати модул бо вобастагии логарифмӣ аз шиддатнокии афканишот тавсиф мешавад, бинобар ин тағйирёбии он ҳангоми тағйир ёфтани равшанӣ нисбат ба тағйирёбии ҷараён хеле камтар ба назар мерасад [34], [83].

Барои истифодаи самараноки неруи барқи истеҳсолшавандаи модули фотоэлектрикӣ нуқтаи кории он бояд дар наздикии нуқтаи максималии иқтидор (MPP) нигоҳ дошта шавад. Яке аз хусусиятҳои хоси тавсифоти волтамперӣ вобастагии нисбатан сусти шиддат дар нуқтаи максималии мқтидор (U_{MP}) аз тағйирёбии шиддатнокии афканишоти офтобӣ дар муқоиса бо тағйирёбии мувофиқи ҷараён мебошад. Дар шароити стандартии санҷиш (STC) қимати (U_{MP}) барои модулҳои фотоэлектрикии кремнӣ одатан тақрибан 80% аз шиддати кори бебор (U_{oc})-ро ташкил медиҳад [34], [83].

Ҳангоми таҳлили тавсифоти волтамперии МФЭ инчунин ҳарорати номиналии кории ЭФЭ (NOCT)-ро бояд ба назар гирифт. NOCT нишондиҳандаи меъёрие мебошад, ки ҳарорати элементҳои фотоэлектрикиро дар шароити стандартии муайяни истифодабарии модул тавсиф мекунад ва за шароити стандартии санҷиш (STC) фарқ мекунад. Истифодаи NOCT имкон медиҳад, ки ҳарорати кории ЭФЭ дар шароити истифодабарӣ воқеитар арзёбӣ карда шавад, зеро таъсири ҳарорати муҳити атроф, афканишоти офтобӣ ва суръати шамолро (бод) ба назар мегирад [34], [104]:

- радиатсияи афканишоти (инсолятсия) офтобӣ 800 Вт/м^2;
- спектри нурафканӣ AM 1,5;
- ҳарорати муҳити атроф 20 ^oC, суръати бод (шамол) зиёда аз 1 м/с.

«Дар шароити зикршуда ҳарорати номиналии кории ЭФЭ (NOCT) одатан 42-46 ^{o}C-ро ташкил дода, барои арзёбии ҳарорати кории онҳо дар шароити воқеии истифодабарӣ истифода мешавад» [83]. «Ҳамзамон, дар ҳисобкуниҳои муҳандисӣ аксар вақт вобастагии хаттии ҳарорати элементҳои фотоэлектрикӣ аз зичии иқтидори афканишоти офтобӣ нисбат ба ҳарорати муҳити атроф қабул карда мешавад» [32], [83].

Ҳангоми баланд шудани ҳарорат шиддат ва иқтидори максималии истеҳсоли модул паст шуда, дар натиҷа самаранокии табдил додани энергияи офтоб ба неруи барқ кам мегардад. Дар асоси хусусиятҳои техникии модули дар диссертатсия таҳқиқшаванда бо мақсади баҳодиҳии миқдории таъсири омили ҳароратӣ ба нишондиҳандаҳои энергетикии модул, тавсифоти волтамперӣ (I-V) ва тавонӣ (P-V)-и он дар қиматҳои гуногуни ҳарорати муҳити атроф таҳлил карда шуданд [131-133].

Ҳангоми сохтан ва таҳлили тавсифоти волтамперӣ (I-V) ва тавонӣ (P-V) параметрҳои асосии зерин ба назар гирифта шуданд:

1. Ҷараёни расиши кӯтоҳ ($I_{рк}$), ки ба зичии ҷории иқтидори афканишоти офтобӣ мувофиқат мекунад.

$$I_{PK} = I_{SC} \cdot \frac{E}{E_{STC}}, \quad A \tag{4.6}$$

«Дар ин ҷо ($I_{рк}$) – ҷараёни ҳисобии расиши кӯтоҳи модули фотоэлектрикӣ ҳангоми зичии ҷории иқтидори афканишоти офтобӣ, А; (I_{sc}) – ҷараёни расиши кӯтоҳи модули фотоэлектрикӣ дар шароити стандартии санҷиш (STC)» [4], ки барои модули дар кори диссертатсионӣ таҳқиқшавандаи SOLARMODUL Aleo S19 HE бо иқтидори номиналии 300 Вт ба 9,97 А баробар аст; E – зичии ҷории иқтидори афканишоти офтобӣ, Вт/м^2; E_{STC} – зичии ҷории иқтидори афканишоти офтобӣ дар шароити стандартии санҷиш, ки ба 1000 Вт/м^2 баробар аст. Мувофиқи муодилаи (4.6), ҷараёни ҳисобии расиши кӯтоҳ ($I_{рк}$) мутаносибан ба зичии иқтидори афканишоти офтобии афтидаистода тағйир меёбад.

Дар модели содакардашудаи баррасишаванда вобастагии ҳароратии ҷараёни расиши кӯтоҳ ба назар гирифта намешавад, зеро зариби ҳароратии ҷараён (K_I) нисбат ба зариби ҳароратии шиддат қимати нисбатан хурд дорад.

2. Ҳарорати элементи офтобӣ.

$$T_{ЭОФ.} = T_{мух.атр.} + E \cdot \left(\frac{T_{NOCT} - 20}{800} \right), \quad {}^{O}C \tag{4.7}$$

Дар ин ҷо $T_{ЭОФ}$ – ҳарорати кории ҳисобии элементи фотоэлектрикӣ, ºС; $T_{мух.атр.}$ – ҳарорати муҳити атроф, ºС; 20 ºС – ҳарорати муҳити атроф, ки ба шароити муайян кардани NOCT мувофиқат мекунад; E – зичии ҷории иқтидори афканишоти офтобӣ, Вт/м^2; 800 Вт/м^2 – зичии ҳисобии иқтидори афканишоти офтобӣ, ки ба шароити NOCT мувофиқат мекунад [34], [83].

Ҳарорати кории ЭФЭ ҳам аз ҳарорати муҳити атроф ва ҳам аз зичии иқтидори афканишоти офтобии афтидаистода вобаста мебошад.

Мувофиқи муодилаи (4.7), ҳангоми баланд шудани ҳарорати муҳити атроф ва шиддатнокии афканишоти офтобӣ ҳарорати кории элементи фотоэлектрикӣ меафзояд.

3. Шиддати кори бебори элементи фотоэлектрикӣ (ё модули фотоэлектрикӣ).

$$U_{КБ} = U_{OC,STC} + K_U \cdot Z_{МГМ} (T_{эл.офт.} - 25), \quad B \tag{4.8}$$

Ин ҷо $U_{КБ}$ – шиддати ҳисобии кори бебори модули фотоэлектрикӣ, В; $U_{ос,STC}$ – шиддати кори бебори модули фотоэлектрикӣ дар шароити стандартии STC, В; K_U = -0,29%/ºС ё -0,114В/ºС – зариби ҳароратии шиддати модул, В/ºС ё %/ºС вобаста ба шакли қабулшудаи ҳисоб; $Z_{МГМ}$ – зариби муҳофизати гармии модул (МГМ), ºС; $T_{эл.офт.}$ – ҳарорати кории ҳисобии элементи фотоэлектрикӣ, ºС; 25 ºС – ҳарорати элемент дар шароити стандартӣ.

$Z_{МГМ}$ – зариби муҳифати гармии моду, ки қиммати он ҳамеша аз воҳид 1 хурд буда таҳияи он дар асоси натиҷаҳои тадқиқоти саҳроӣ ба даст омадааст.

Ҳарорати кории ЭФЭ ($T_{эл.офт.}$), ки тибқи муодилаи (4.7) муайян карда мешавад, барои ҳисоб намудани тағйирёбии ҳароратии шиддати кори бебор

нисбат ба ҳарорати стандартии элемент 25 ^{o}C, ки дар шароити STC қабул шудааст, истифода мегардад [34], [83].

Муодилаи (4.8) таъсири муҳофизати ҳароратии модули фотоэлектрикиро ба тағйирёбии ҳароратии шиддати кори бебор ба назар мегирад. Ҳангоми ($Z_{МГМ}$ = 1: зариби муҳофизати гармии модул) будан модел ба вобастагии стандартии ҳароратии шиддати модул мувофиқат мекунад, дар ҳоле ки ҳангоми ($0<Z_{МГМ}<1$) коҳиши таъсири ҳароратӣ дар натиҷаи истифодаи зариби муҳофизати гармии модул ба назар гирифта мешавад. Аз ин сабаб, паст шудани фарқи ҳарорати корӣ нисбат ба ҳарорати STC боиси коҳиши талафоти ҳароратии шиддат ва нигоҳ доштани қимати баландтари шиддати кори бебор мегардад.

4. Иқтидори максималии истеҳсолии модули фотоэлектрикӣ бо дарназардошти ҳарорати элементҳои офтобӣ ва зичии иқтидори афканишоти офтобӣ.

$$P_{макс} = I_{РК} \cdot U_{КБ} \cdot F_{ММ}, \quad Вт \tag{4.9}$$

Ин ҷо $F_{ММ}$ – зариби пуршавии модули фотоэлектрикӣ мебошад.

Дар доираи модели математикии қабулшуда зариби пуршавии $F_{ММ}$ доимӣ қабул шуда, аз ҳарорати элементҳои фотоэлектрикӣ ва зичии иқтидори афканишоти офтобӣ вобастагӣ надорад.

«Ҳамзамон, иқтидори максималии истеҳсолии модули фотоэлектрикӣ бо дарназардошти тағйирёбии ҷараёни расиши кӯтоҳ ва шиддати кори бебор, ки дар натиҷаи тағйирёбии шароити истифодабарӣ ба вуҷуд меоянд, муайян карда мешавад» [4].

$$F_{ММ} = \frac{P_{макс}}{U_{КБ} \cdot I_{РК}} \tag{4.10}$$

«Ин ҷо $P_{макс}$ – иқтидори максималии номиналии истеҳсолии МФЭ, ки аз ҷониби истеҳсолкунанда дар шароити стандартии санҷиш STC дода шуда ба зичии иқтидори афканишоти офтобӣ 1000 Вт/м^2, ҳарорати ЭФЭ 25 ^{o}C ва тақсимоти спектралии афканишоти офтобӣ AM 1,5 мувофиқат мекуанд» [83].

Муодилаи 4.9 имкон медиҳад, ки иқтидори максималии истеҳсоли модули фотоэлектрикӣ ҳангоми қиматҳои додашудаи зичии иқтидори афканишоти офтобӣ ва ҳарорати кории ЭФЭ муайян карда шавад.

Барои коҳиш додани ҳарорати кории МФЭ дар шароити иқлими гарм сохтори муҳофизати гармии модул МГМ, (ТРМ термомуҳофизат) дар ҳарорати баланди муҳити атроф пешниҳод ва ба таври таҷрибавӣ таҳқиқ карда шудааст [34], [83]. Термомуҳофизат (ТРМ) ё муҳофизати гармии модули пешниҳодшуда барои инъикоси намудани ташкилдиҳандаи инфрасурхи афканишоти офтобӣ пешбини шудааст, ки имкон медиҳад сарборii ҳароратӣ ба модули фотоэлектрикӣ коҳиш дода шуда, ҳамзамон гузариши асосии қисми намоёни спектри офтобӣ нигоҳ дошта шавад.

«Дар асоси муодилаҳои (4.6-4.10) ҳисоби тавсифоти электрикии модули фотоэлектрикии SOLARMODUL Aleo S19 HE бо иқтидори 300 Вт дар ҳарорати муҳити атрофи 25, 35, 45 ва 55 ^{o}C бо дарназардошти таъсири термомуҳофизат анҷом дода шуд» [3]. Дар ин ҳолат ҳарорати кории ЭФЭ тибқи муодилаи (4.7) муайян карда шуда, таъсири термомуҳофизати ба тағйирёбии ҳарорати шиддати кори бебор тавассути зариби ($Z_{МГМ}$) дар муодилаи (4.8) ба назар гирифта шуд. Барои муқоисаи натиҷаҳои ҳисобӣ бо тавсифоти шиносномавӣ ҳамчун шароити ибтидоӣ шароити стандартии санҷиш (STC) қабул карда мешаванд.

Реҷаҳои ҳисобӣ ҳангоми ҳарорати муҳити 25, 35, 45 ва 55 ^{o}C барраси карда мешаванд. Дар ин ҳолат ҳарорати кории ЭФЭ мувофиқи муодилаи (4.7) муайян карда шуда, дар натиҷаи гармшавии модул зери таъсири афканишоти офтобӣ аз ҳарорати муҳити атроф баландтар мебошад.

Натиҷаҳои ҳисобӣ барои сохтани тавсифоти электрикии модули фотоэлектрикии навъи SOLARMODUL Aleo S19 HE истифода шудаанд. Дар асоси натиҷаҳои ҳисобӣ тавсифоти волтамперӣ ва вобастагии иқтидори истеҳсолии модул аз шиддат муайян гардида, барои арзёбии тағйирёбии параметрҳои электрикӣ дар шароити гуногуни истифодабарӣ истифода мешаванд. Натиҷаҳои мазкур инчунин барои муқоисаи нишондиҳандаҳои

ҳисобӣ бо маълумоти таҷрибавӣ ва минбаъд баҳодиҳии таъсири омилҳои ҳароратӣ ба кори модули фотоэлектрикӣ аҳамияти муҳим доранд. Маълумоти асосии ҳисобӣ, ки барои сохтани тавсифоти электрикии модули мавриди таҳқиқ истифода шудаанд, дар ҷадвали 4.1 оварда шудаанд.

Ҷадвали 4.1. – Маълумотҳои ҳисобӣ барои сохтани тавсифотҳои электрикии модули фотоэлектрикии SOLARMODUL Aleo S19 HE [4].

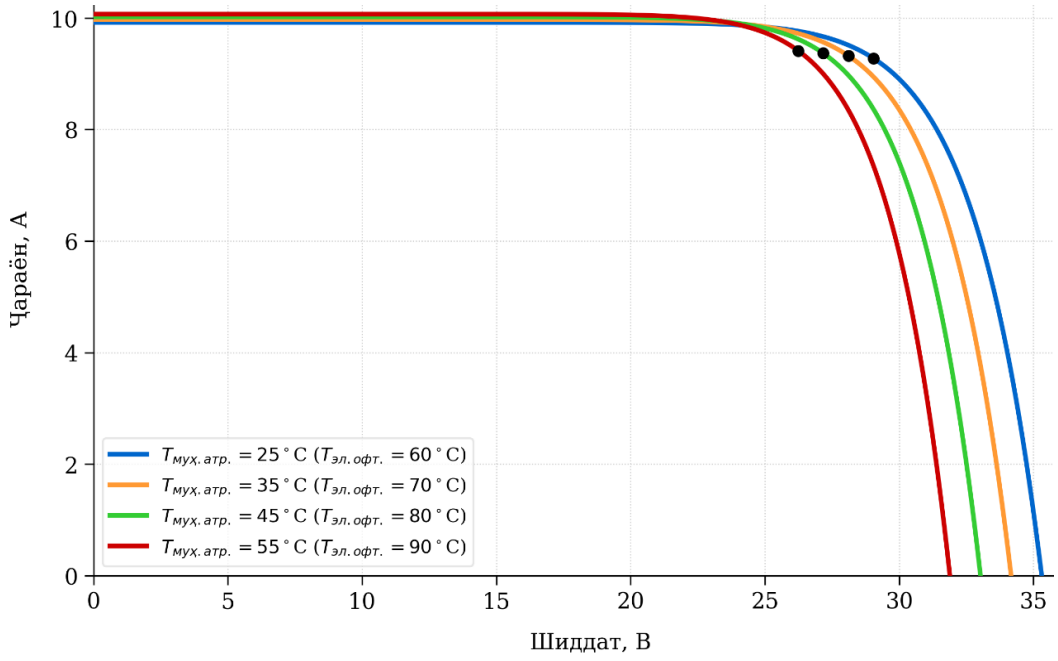
Шартҳо	Ҳарорати муҳити атроф ($T_{муҳ.атр.}$, °C)	Ҳарорати кории эл. офтобӣ (ячейкаҳо), бе истифодаи термомуҳофизат ($T_{э.оф}$, °C)	Ҳарорати кории эл. офтобӣ (ячейкаҳо), бо истифодаи термомуҳофизат ($T_{э.оф}$, °C)	Ҷараёни расиши кӯтоҳ (I_{sc}, A)	Шиддати кори бебор бе истифодаи термомуҳофизат (U_{oc}, B)	Шиддати кори бебор бо истифодаи термомуҳофизат (U_{oc}, B)	Иқтидори максималии истеҳсолӣ бе истифодаи термомуҳофизат (P_{max}, Bm)	Иқтидори максималии истеҳсолӣ бо истифодаи термомуҳофизат (P_{max}, Bm)
Шароити (STC)	-	25	25	9,97	39,4	39,4	300	300
Реҷаҳои ҳисобӣ	25	60,0	55,0	9,92	35,31	35,88	274,0	278,01
	35	70,0	65,0	9,97	34,17	34,74	266,58	270,5
	45	80,0	75,0	10,02	33,03	33,60	259,0	262,91
	55	90,0	85,0	10,07	31,89	32,46	251,39	255,23

«Натиҷаҳои ҳисобҳо тасдиқ мекунанд, ки баланд шудани ҳарорати кории ЭФЭ ба тавсифотҳои электрикии модули фотоэлектрикӣ таъсири манфӣ расонанд, пеш аз ҳама, ба шиддат ва иқтидори максималии истеҳсолии он» [8].

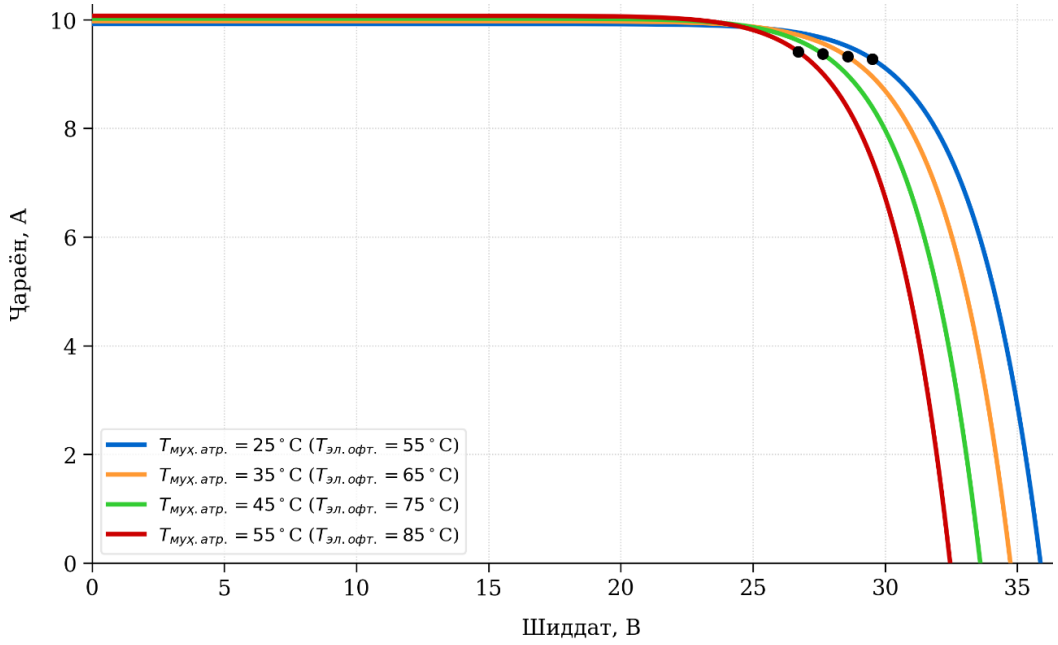
Ҳангоми зиёд шудани ҳарорати нуқтаи корӣ иқтидори максималии истеҳсолӣ дар натиҷаи асосан паст шудани шиддати кори бебор ва шиддат дар нуқтаи максималии иқтидор паст мегардад. Истифодаи термомуҳофизати пешниҳодшуда имкон медиҳад, ки ҳарорати кории ЭФЭ паст карда шуда, мутаносибан, талафоти ҳароратии иқтидори истеҳсолӣ кам карда шавад.

«Дар расмҳои 4.5 ва 4.6 тавсифоти ҳисобии волтамперӣ (V-I) ва тавоноӣ (P-V)-и модули фотоэлектрикии SOLARMODUL Aleo S19 HE ҳангоми ҳароратҳои гуногуни муҳити атроф бо дарназардошти таъсири термомуҳофизати пешниҳодшуда ва бе он оварда шудаанд» [4], [34], [83].

Муқоисаи тавсифотҳои электрикии ҳисобӣ нишон медиҳад, ки ҳангоми истифодаи термомуҳофизат дар натиҷаи паст шудани ҳарорати кории ЭФЭ қисман барқарор шудани шиддат ва зиёд шудани иқтидори максималии истеҳсолӣ дар муқоиса бо реҷаи бе термомуҳофизат ба амал меояд [34], [83].

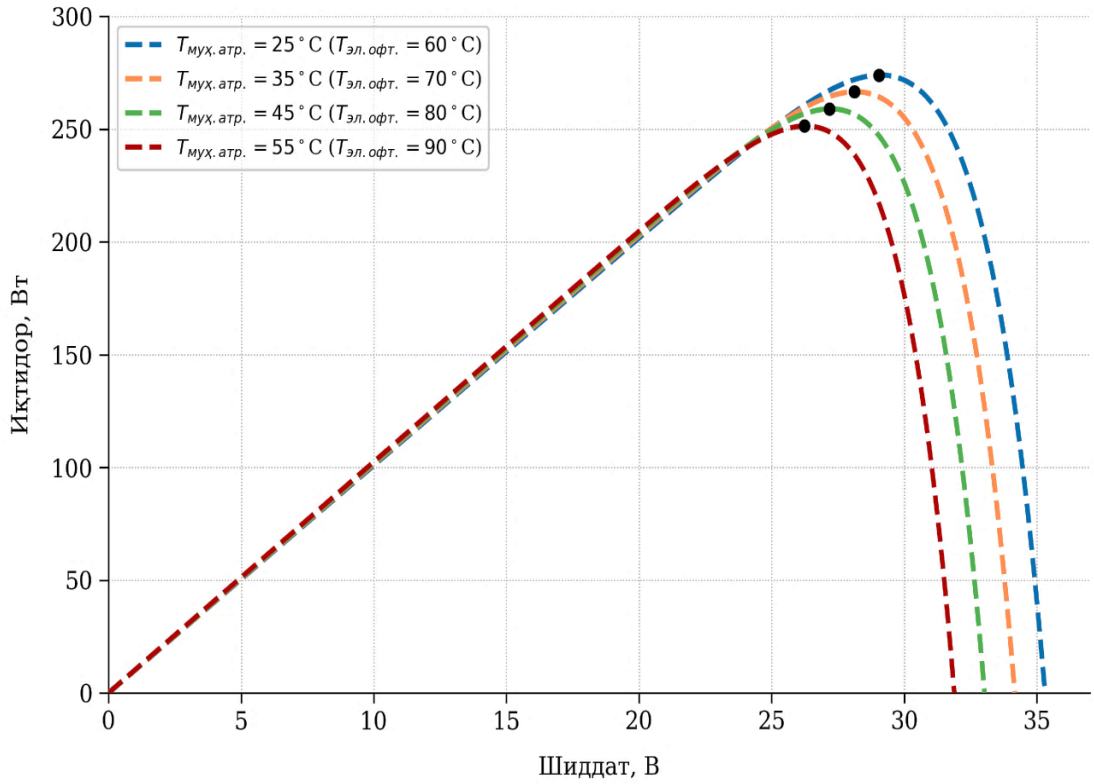


а)

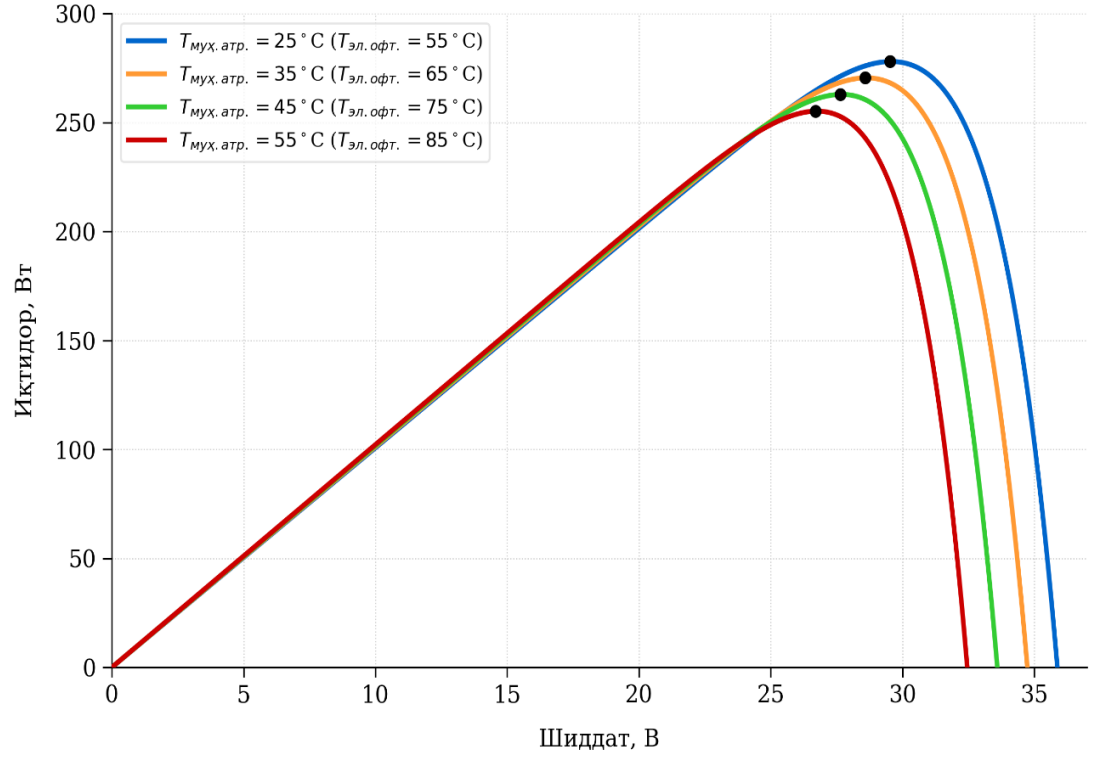


б)

Расми 4.5. – Тавсифоти волтамперии МФЭ навъи SOLARMODUL Aleo S19 HE: (а) бе истифодаи термомуҳофизати пешниҳодшуда ва (б) бо истифодаи термомуҳофизат ҳангоми ҳароратҳои гуногуни муҳити атроф ва элементҳои он



а)



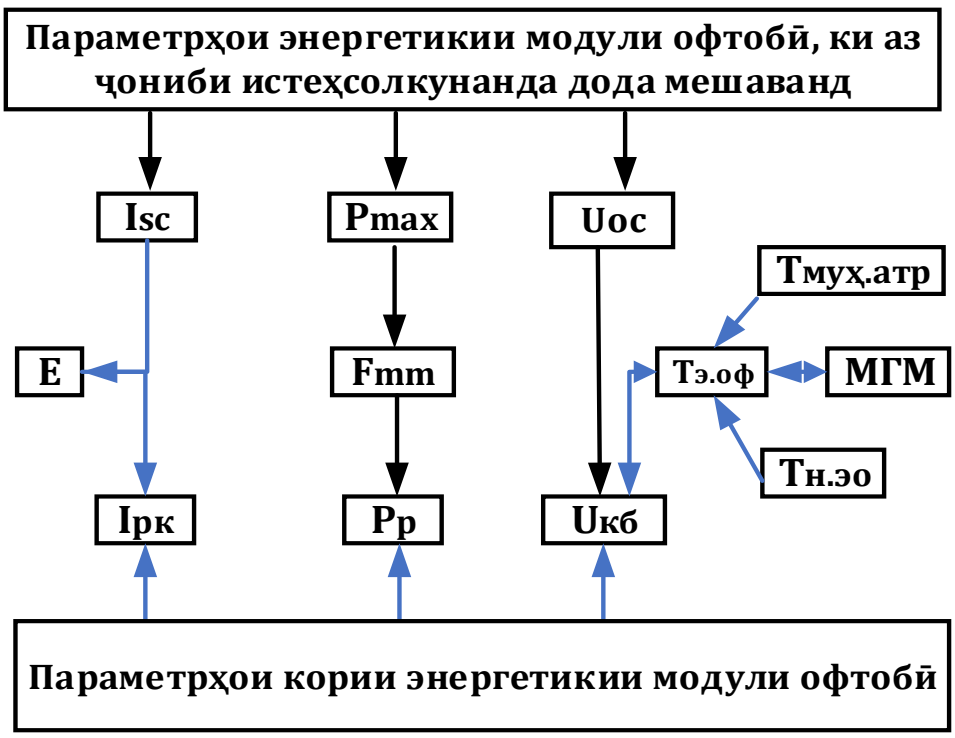
б)

Расми 4.6. – Тавсифоти тавоноии МФЭ навъи SOLARMODUL Aleo S19 HE: (а) бе истифодаи термомуҳофизати пешниҳодшуда ва (б) бо истифодаи термомуҳофизат ҳангоми ҳароратҳои гуногуни муҳити атроф ва элементҳои он

«Натиҷаҳои бадастомада нишон медиҳанд, ки тавсифоти электрикии аз ҷониби истеҳсолкунанда дар шароити стандартии санҷиш (STC) пешниҳодгашта аз тавсифоте, ки дар шароити воқеии истифодабарӣ ба даст оварда шудаанд, ба таври муайян фарқ мекунанд» [8], [48].

«Барои то ҳадди ақал расонидани ин номувофиқт ва таъмини фаъолияти самараноки МФЭ дар назди нуқтаи максималии иқтидор (MPP), зарур аст, ки системаи муҳофизати ҳароратӣ (термомуҳофизат) барои паст намудани гармшавии барзиёди модул насб карда шавад» [8]. Термомуҳофизати пешниҳодгашта на танҳо ҳарорати кории модули фотоэлектрикро коҳиш медиҳад, балки инчунин муҳофизати иловагӣ аз таназзулро таъмин карда, ба эътимоднокии истифодабарӣ ва муҳлати хизмати онро каме ҳам бошад зиёд мекунад [34], [83].

Нақшаи сохтории муайян кардани тавсифоти электрикии модули фотоэлектрикӣ дар шароити истифодабарӣ бо термомуҳофизати пешниҳодшуда дар расми 4.7 оварда шудааст.



Расми 4.7. – Нақшаи сохтории муайян намудани тавсифоти электрикии модули фотоэлектрикӣ дар шароити истифодабарӣ бо дарназардошти термомуҳофизати пешниҳодшуда

Дар модели пешниҳодшуда системаи муҳофизати ҳароратӣ бо блоки муҳофизати гармии модул, ки дар нақша ҳамчун (МГМ) ишора шудааст, муаррифӣ гардида, ҳамчун параметри иловагӣ, ки ба ҳарорати самараноки кории элементи фотоэлектрикӣ таъсир мерасонад, ворид карда шудааст.

Таъсири МГМ тавассути ислоҳи ҳарорати кории ҳисобии элемент бо дарназардошти шароити муҳити атроф ва самаранокии термомуҳофизати пешниҳодшуда ба ҳисоб гирифта мешавад. Қимати ҳарорати самараноки бадастомада барои муайян кардани параметрҳои асосии электрикии МФЭ, аз ҷумла ҷараёни расиши кӯтоҳ ($I_{рк}$), шиддати кори бебор ($U_{кб}$) ва иқтидори максималии ҳисобӣ ($P_р$), истифода мегардад. Истифодаи МГМ имкон медиҳад, ки таъсири термомуҳофизати пешниҳодшуда ҳангоми арзёбии тавсифоти электрикии модули фотоэлектрикӣ дар шароити гуногуни истифодабарӣ ба назар гирифта шавад [34], [83].

4.4. Моделсозии математикии кори дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ бо дарназардошти истифодаи муҳофизати ҳароратии модулҳо (термомуҳофизат) дар муҳити барномавии MATLAB/Simulink

«Ба кори неругоҳҳои барқи офтобӣ ҳолати ҳароратии МФЭ, махсусан дар шароити зичии баланди радиатсияи офтобӣ ва ҳарорати баланди муҳити атроф, таъсири ҷиддӣ мерасонад. Моделсозии математикӣ воситаи самараноки таҳлили таъсири ҳарорат ба тавсифоти электрикӣ ва самаранокии энергетикии низомҳои фотоэлектрикӣ мебошад» [3].

Дар таҳқиқоти мазкур дар барномаи MATLAB/Simulink модели тақлидии неругоҳи фотоэлектрикӣ таҳия карда мешавад, ки хусусиятҳои ҳароратии МФЭ-ро ба назар мегирад. Модели пешниҳодшуда имкон медиҳад, ки тавсифоти электрикии дастгоҳи фотоэлектрикӣ ҳангоми қиматҳои гуногуни зичии иқтидори радиатсияи офтобӣ ва ҳарорати муҳити атроф арзёбӣ карда шаванд. Диққати махсус ба татбиқи усули пешниҳодгаштаи термомуҳофизат, ки барои коҳиш додани ҳарорати кории МФЭ пешбинӣ шудааст, равона карда мешавад [105].

«Барои арзёбии самаранокии низоми пешниҳодшудаи термомуҳофизат таҳқиқоти таҷрибавӣ гузарорнида шуд, ки ба муқоисаи ҳарорати кории модулҳои фотоэлектрикӣ бо қабати термомуҳофизат муҷаҳҳазшуда ва модули ҳаммонанди бе термомуҳофизат асос ёфтааст» [3]. Ченкунии ҳарорати сатҳи модулҳо ҳангоми қиматҳои гуногуни ҳарорати муҳити атроф ва зичии иқтидори радиатсияи офтобии афтидаистода дар давоми рӯз гузаронида шуд.

Натиҷаҳои ченкуниҳои таҷрибавии бадастомада дар расмҳои 4.8 ва 4.9 оварда шудаан.

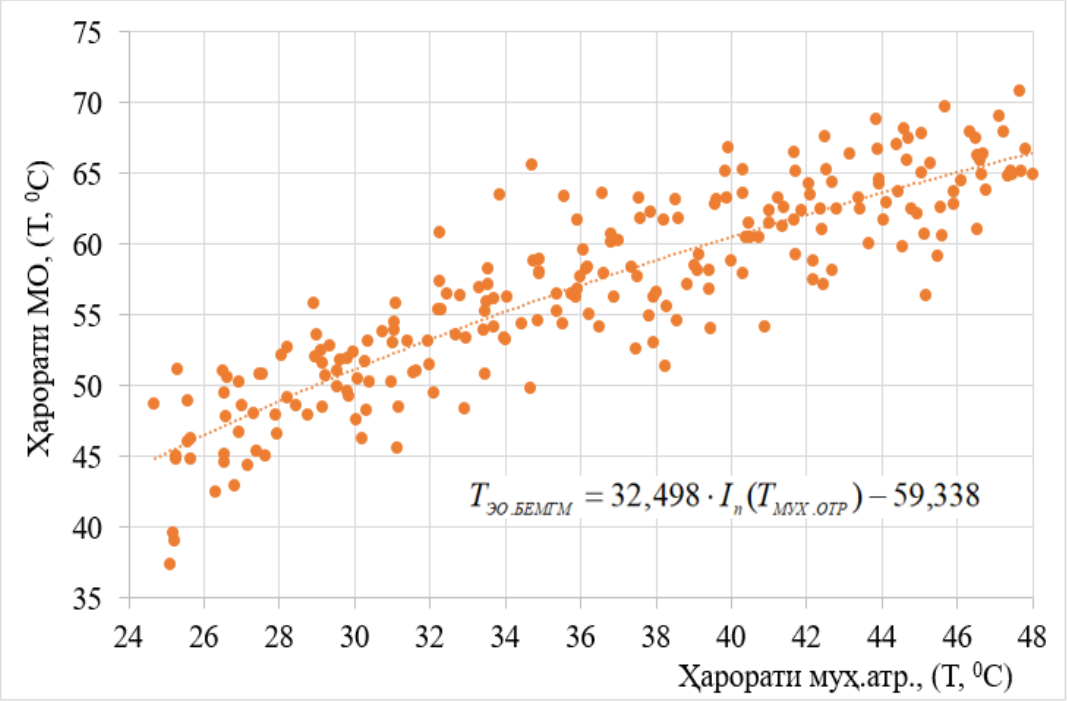
Дар расми 4.8 ҳароратҳои ченшудаи сатҳи пеши модули фотоэлектрикӣ бе истифодаи термомуҳофизат ҳангоми қиматҳои гуногуни ҳарорати муҳити атроф нишон дода шудаанд. Маълумоти таҷрибавӣ вобастагии возеҳи ҳолати ҳароратии модулро аз параметрҳои муҳити атроф нишон медиҳад. «Ҳангоми баланд шудани ҳарорати муҳити атроф ҳарорати кории МФЭ низ меафзояд. Дар ин ҳолат қиматҳои баландтарини ҳарорат дар даврaҳои радиатсияи шадиди офтобӣ мушоҳида карда мешавад» [3].

«Маълумотҳои таҷрибавии бадастомада барои таҳияи модели математикӣ, ки вобастагии ҳарорати кории МФЭ-ро аз ҳарорати муҳити атроф тавсиф мекунад, истифода шудаанд. Параметрҳои модел бо усули таҳлили регрессионӣ дар асоси усули хурдтарини квадратҳо бо истифода аз барномаи Microsoft Excel муайян карда шуданд» [83]. Муодилаи регрессияи бадастомада ва хати тамоюли мувофиқ ба он дар расми 4.8 нишон дода шудааст.

Модели таҳияшуда наздиксозии (аппроксиматсия) маълумоти таҷрибавиро таъмин карда, метавонад барои арзёбии ҳарорати кории модулҳои фотоэлектрикӣ дар шароити иқлими ҳаммонанд истифода шавад.

Вобастагии математикии бадастомада барои таҳлили минбаъдаи реҷаи ҳароратии МФЭ замина гузошта ва имкон медиҳад, ки таъсири миқдории термомуҳофизати пешниҳодшуда ба ҳарорати кории онҳо дар шароити воқеии истифодабарӣ арзёбӣ карда шавад. Дар расми 4.9 натиҷаҳои ченкунии ҳарорати сатҳи модули фотоэлектрикӣ бо истифода аз термомуҳофизати пешниҳодшуда оварда шудааст. Муқоисаи маълумоти таҷрибавии

бадастомада бо натиҷаҳои модули стандартии маъмулӣ бе истифодаи термомуҳофизат имкон медиҳад, ки таъсири ҳароратии ҳалли техникии пешниҳодшуда дар шароити гуногуни муҳити атроф ва сатҳҳои гуногуни радиатсяи офтобӣ арзёбӣ карда шавад [134].



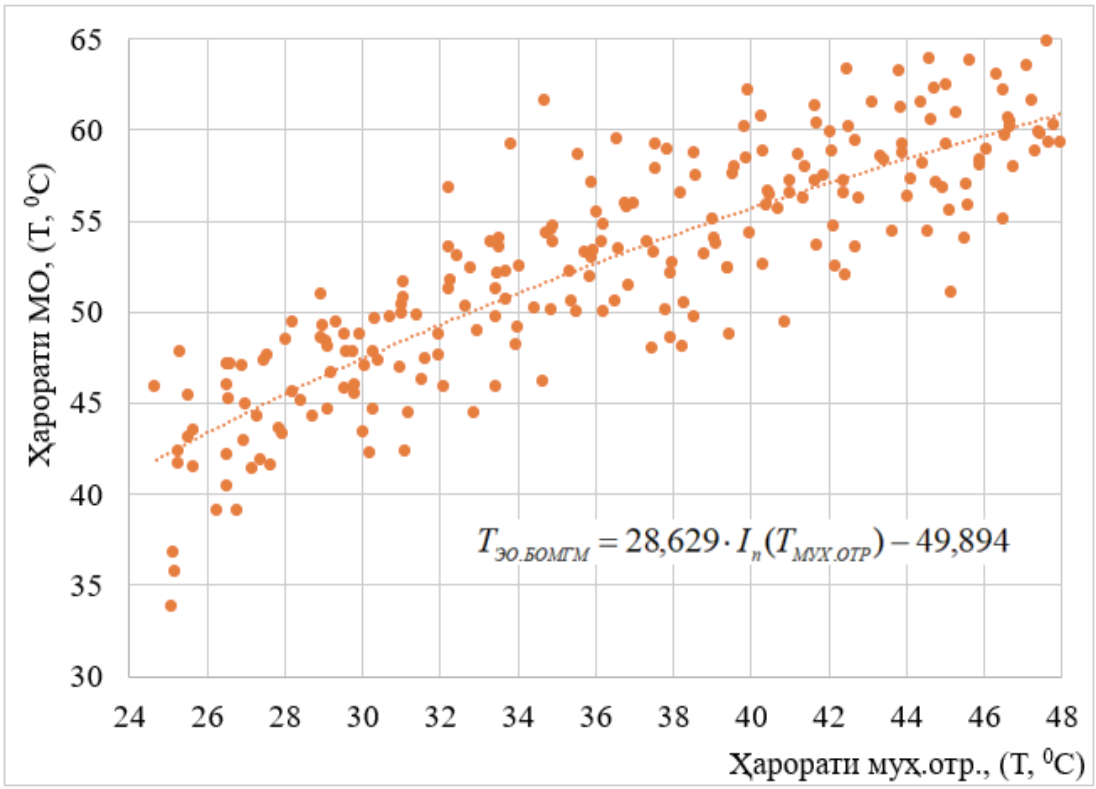
Расми 4.8. – Вобастагии ҳарорати гармшавии сатҳи МФЭ бе истифодаи термомуҳофизат аз ҳарорати муҳити атроф

«Дар расми 4.9 натиҷаҳои ченкуниҳои таҷрибавии ҳарорати сатҳи модули фотоэлектрикӣ, ки бо термомуҳофизати сотории пешниҳодшуда муҷаҳҳаз шудааст, ҳангоми қиматҳои гуногуни ҳарорати муҳити атроф оварда шудааст» [32].

Маълумотҳои таҷрибавии бадастомада барои таҳияи модели математикӣ, ки вобастагии ҳарорати кории модули фотоэлектрикиро аз ҳарорати муҳити атроф тавсиф мекунад, истифода шудааст. Модел тавассути таҳлили регрессионӣ дар асоси усули хурдтарин квадратҳо бо истифодаи барномаи Microsoft Excel таҳия карда шуд [32].

Муодилаи регрессионии бадастомада ва хати тамоюли (тренд) мувофиқ ба он дар расми 4.9 нишон дода шуда, тавсифи аналитикии маълумоти

таҷрибавиро барои арзёбии минбаъдаи хусусиятҳои ҳароратии модули фотоэлектрикӣ таъмин менамоянд [34], [83], [106], [135-137].

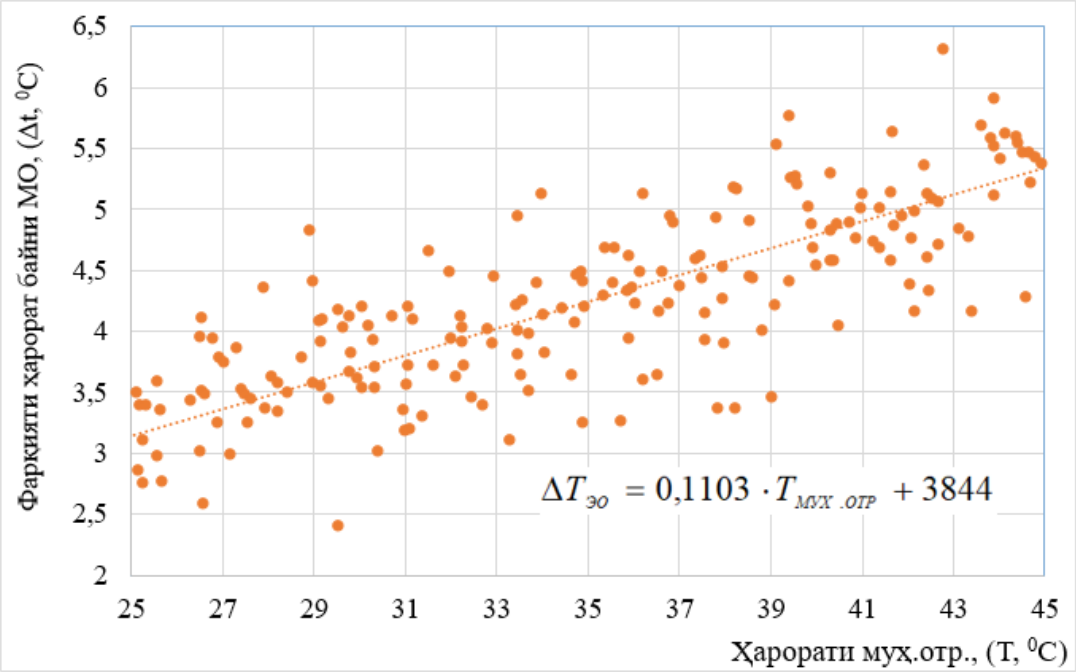


Расми 4.9. – Вобастагии ҳарорати гармшавии сатҳи МФЭ бо истифодаи термомуҳофизат аз ҳарорати муҳити атроф

«Дар асоси натиҷаҳои ченкуниҳои таҷрибавӣ барои баҳодиҳии миқдории самаранокии сохтори пешниҳодшудаи термомуҳофизат модели регрессионӣ таҳия карда шуд» [3]. Модел бо усули хурдтарин квадратҳо тавассути наздиксозии қиматҳои таҷрибавии фарқи ҳарорат байни модулҳои фотоэлектрикии дорои термомуҳофизат ва бе он ҳангоми қиматҳои гуногуни ҳарорати муҳити атроф ба даст оварда шуд [32].

Муодилаҳои регрессионии бадастомад ки дар дохили графикҳои 4.7-4.9 дарҷ гардидаанд вобастагии қимати пастшавии ҳароратро, ки тавассути низоми термомуҳофизат таъмин карда мешавад, аз ҳарорати муҳити атроф ба таври математикӣ тавсиф мекунанд.

Маълумоти таҷрибавӣ, каҷхатаи мувофиқи регрессионӣ ва муодилаи регрессия дар расми 4.10 оварда шудаанд.



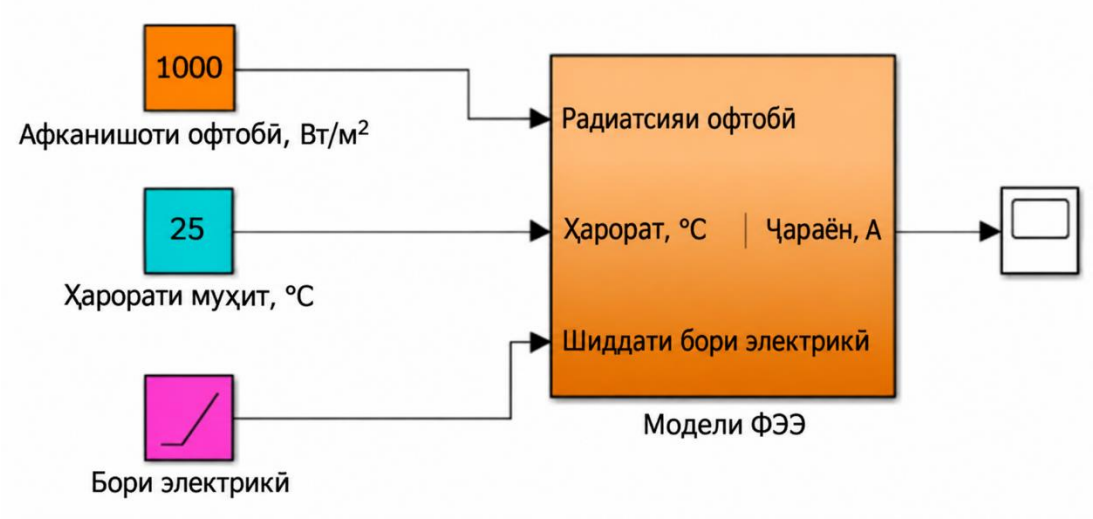
Расми 4.10. – Модели регрессионии вобастагии фарқи ҳарорати байни МФЭ-и дорои термомуҳофизат ва бе термомуҳофизат аз ҳарорати муҳити атроф [32].

Муодилаи регрессионии бадастомада модели математикии низоми пешниҳодшудаи термомуҳофизатро дар асоси плёнкаи голографӣ ифода мекунад [32]. Модели таҳияшуда ба модели тақлидии модули фотоэлектрикӣ дар муҳити MATLAB/Simulink ҳамгиро карда шуд, то таъсири термомуҳофизат ба тавсифоти электрикии он дар шароити гуногуни истифодабарӣ таҳқиқ карда шавад.

Барои арзёбии самаранокии усули пешниҳодшуда модели регрессионии таҳияшудаи вобастагии пастшавии ҳарорат аз ҳарорати муҳити атроф ба модели тақлидии модули фотоэлектрикӣ, ки дар барномаи MATLAB/Simulink амалӣ карда шудааст, ҳамгиро карда шуд. Ин имкон дод, ки таҳлили муқоисавии тавсифоти электрикии модулҳои фотоэлектрикии дорои термомуҳофизати пешниҳодшуда ва бе термомуҳофизат ҳангоми қиматҳои якхелаи зичии иқтидори радиатсияи офтобӣ ва дигар параметрҳои моделсозӣ гузаронида шавад. Модели модули фотоэлектрикӣ, ки дар муҳити барномаи MATLAB/Simulink амалӣ карда шудааст, дар расми 4.11 оварда шудааст. «Ҳангоми моделсозӣ параметрҳои ибтидоӣ ва фарзияҳои (допушения) зерин истифода карда шудаанд» [32]:

- зичии иқтидори радиатсияи офтобӣ 1000 Вт/м^2;
- муқовимати сарбории тағйирёбанда дар вақт;
- муқовимати дохилии модули фотоэлектрикӣ 0,5 Ом;
- ҳарорати назоратии элементи фотоэлектрикӣ 25 ^{o}C;
- “ҳарорати кории сатҳи модули фотоэлектрикӣ 45 ^{o}C” [4], [32], [83].

Параметрҳои қабулшуда шароити ягонаеро барои таҳлили муқоисавии тавсифоти электрикии МФЭ бо термомуҳофизати пешниҳодшуда ва бе он таъмин менамоянд. Модели тақлидии таҳияшуда имкон медиҳад, ки таъсири пастшавии ҳарорати корӣ ба тавсифоти асосии электрикии модул арзёбӣ гардида, самаранокии термомуҳофизати пешниҳодшуда дар шароити истифодабарии неругоҳи фотоэлектрикӣ муайян карда шавад [83], [106], [107].

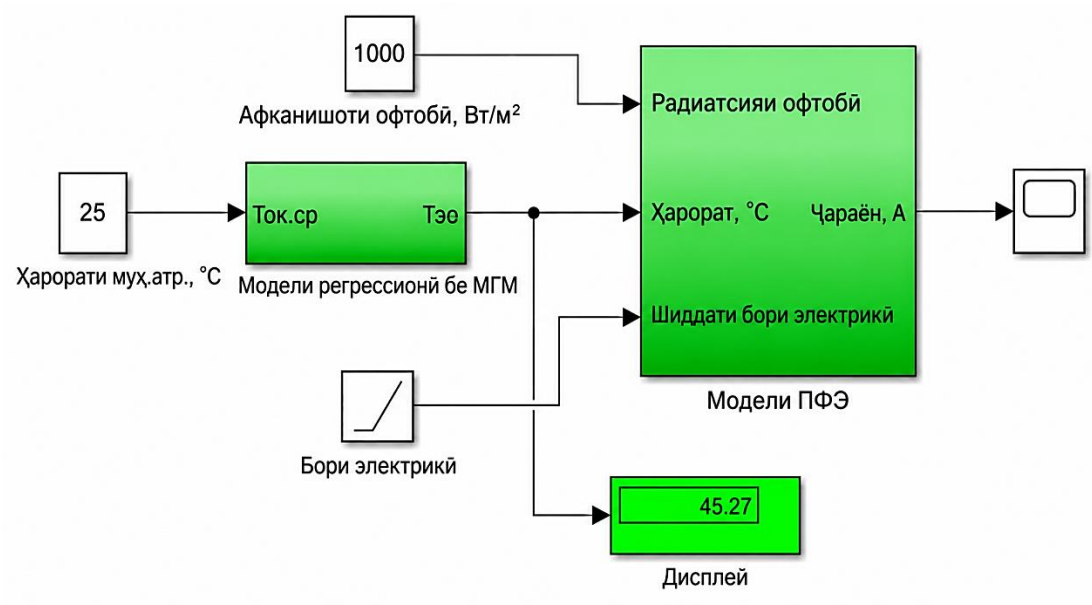


Расми 4.11. – Модели модули фотоэлектрикӣ дар муҳити MATLAB/Simulink

«Таҳлили муқоисавии ду модели неругоҳи фотоэлектрикӣ, ки дар шароити ҳарорати баланд фаъолият мекунанд, гузаронида шуд» [49]. Дар модели якум МФЭ бе термомуҳофизат истифода шуданд, дар ҳоле ки дар модели дуюм сохтори пешниҳодшудаи термомуҳофизат татбиқ карда шуд.

Муқоисаи натиҷаҳои моделсозӣ имкон дод, ки таъсири термомуҳофизати пешниҳодшуда ба ҳарорати корӣ ва тавсифоти электрикии неругоҳи фотоэлектрикӣ дар шароити якхелаи истифодабарӣ арзёбӣ карда шавад [83], [106], [107].

Модели неругоҳи фотоэлектрикӣ бе истифодаи термомуҳофизат. «Чи гунае, ки дар расми 4.12 нишон дода шудааст, блоки модели регрессионӣ ҳарорати кории элементи фотоэлектрикиро вобаста ба ҳарорати муҳити атроф арзёбӣ менамояд. Мувофиқи модели регрессионии таҳияшуда, ҳангоми ҳарорати муҳити атроф 25 °C ҳарорати ҳисобии элементи фотоэлектрикӣ 45,27 °C-ро ташкил медиҳад» [32]. Аз ин сабаб, реҷаи истифодабарии баррасишаванда бо ҳарорати элементе тавсиф мешавад, ки аз қимати стандартии 25 °C, ки дар шароити STC қабул шудааст, баландтар мебошад ва ин боиси коҳиши мувофиқи ҳароратии иқтидори истеҳсолии МФЭ мегардад.



Расми 4.12. – Модели дастгоҳи фотоэлектрикӣ дар муҳити MATLAB/Simulink бе истифодаи термомуҳофизат

Ҳангоми баланд шудани ҳарорати муҳити атроф дар давоми рӯз ҳарорати сатҳи модули фотоэлектрикӣ низ меафзояд. Баланд шудани ҳарорати кории элементи фотоэлектрикӣ боиси коҳиши самаранокии табдили фотоэлектрики мегардад, ки асосан ба паст шудани шиддати истеҳсолӣ ва иқтидори максималии модул вобаста мебошад. Дар натиҷа, бо афзоиши ҳарорати кории элемент талафоти ҳароратии иқтидор зиёд мешавад. Ин зарурати ба ҳисоб гирифтани реҷаи ҳароратӣ ва истифодаи термомуҳофизати пешниҳодшударо ҳангоми моделсозӣ ва таҳлили нишондиҳандаҳои истифодабарии низомҳои фотоэлектрикӣ тасдиқ менамояд.

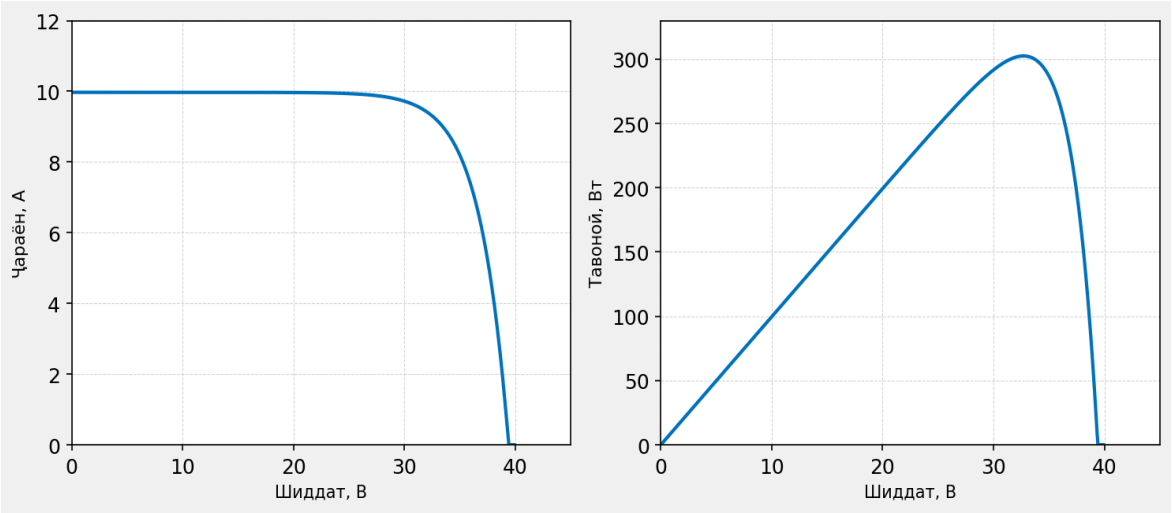
Барои МФЭ дар асоси кремнии кристаллӣ иқтидори истеҳсолӣ одатан тақрибан 0,4 % ҳангоми ҳар 1 ^{o}C зиёд шудани ҳарорати элементи фотоэлектрикӣ аз 25 ^{o}C, ки дар шароити стандартии санҷиш (STC) қабул шудааст, коҳиш меёбад. «Бояд қайд кард, ки ин нишондиҳандаи ҳароратӣ ба ҳарорати воқеии элементи фотоэлектрикӣ, на ба ҳарорати муҳити атроф, дахл дорад. Дар шароити воқеии истифодабарӣ, махсусан ҳангоми радиатсияи шадиди офтобӣ, ҳарорати сатҳи МФЭ метавонад ба 45 ^{o}C ва аз ин ҳам баландтар расад» [3].

Ҳангоми ҳарорати элементҳои модул 45 ^{o}C шудан, МФЭ дорои иқтидори номиналии 300 Вт аз рӯйи назария метавонад тақрибан 276 Вт иқтидорро тавлид намояд. Ин ба коҳишёбии иқтидори электрикӣ тақрибан 24 Вт ё 8 % нисбат ба иқтидори номиналии модул дар шароити стандартии санҷиш (STC, 25 ^{o}C) мувофиқат мекунад [83], [108], [109].

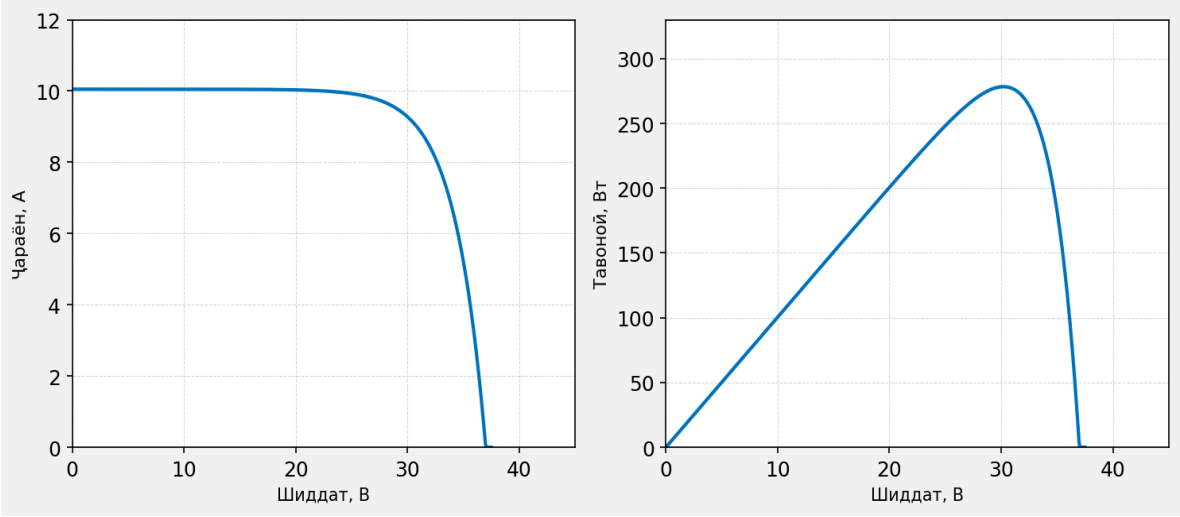
Таъсири талафоти ҳароратӣ бо истифода аз модели таҳияшудаи MATLAB/Simulink арзёбӣ карда шуд. Натиҷаҳои моделсозӣ, ки тағйирёбии параметрҳои электрикии модули фотоэлектрикиро бе низоми пешниҳодшудаи термомуҳофизат тавсиф мекунанд, дар расмҳои 4.13 ва 4.14 дар шакли тавсифоти волтамперӣ (I-V) ва тавсифоти тавоноӣ (P-V) пешниҳод шудаанд.

Ҳисобҳо барои шароити стандартии санҷиш (STC) ва ҳарорати баланди кории МФЭ 45 ^{o}C анҷом дода шуданд, ки имкон медиҳад таъсири омили ҳароратӣ ба тавсифоти электрикӣ ва иқтидори максималии истеҳсолии МФЭ ба таври возеҳ арзёбӣ карда шавад.

Ҳамин тавр, натиҷаҳои моделсозӣ нишон медиҳанд, ки баланд шудани ҳарорати кории ЭФЭ яке аз омилҳои муайянкунандаи коҳиши иқтидори истеҳсолии МФЭ мебошад. Аз ин рӯ, ба назар гирифтани таъсири ҳароратӣ дар арзёбии нишондиҳандаҳои энергетикӣ ва ҳангоми моделсозии реҷаҳои истифодабарии низомҳои фотоэлектрикӣ зарур буда, истифодаи термомуҳофизати пешниҳодшуда ҳамчун воситаи коҳиш додани таъсири ҳарорати баланд ба параметрҳои электрикӣ ва иқтидори истеҳсолии МФЭ асоснок мегардад.



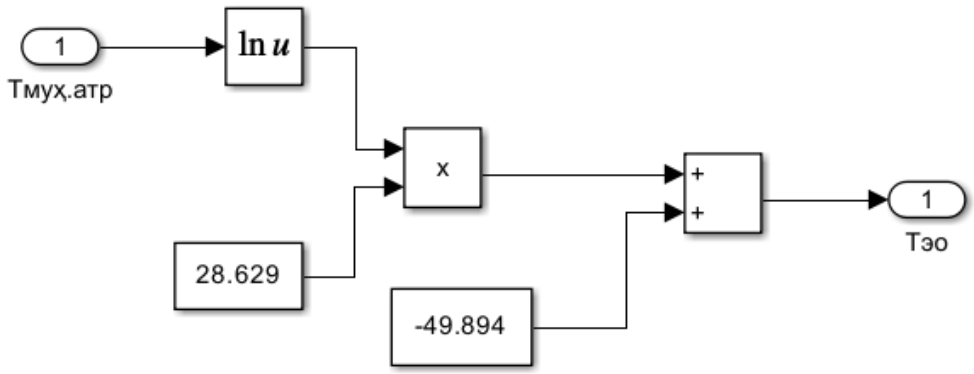
Расми 4.13. – Тавсифотҳои волтамперӣ ва тавоноии МФЭ дар шароити STC



Расми 4.14. – Тавсифотҳои волтамперӣ ва тавоноии МФЭ ҳангоми ҳарорати кории 45 °C ва бе истифодаи термомуҳофизат

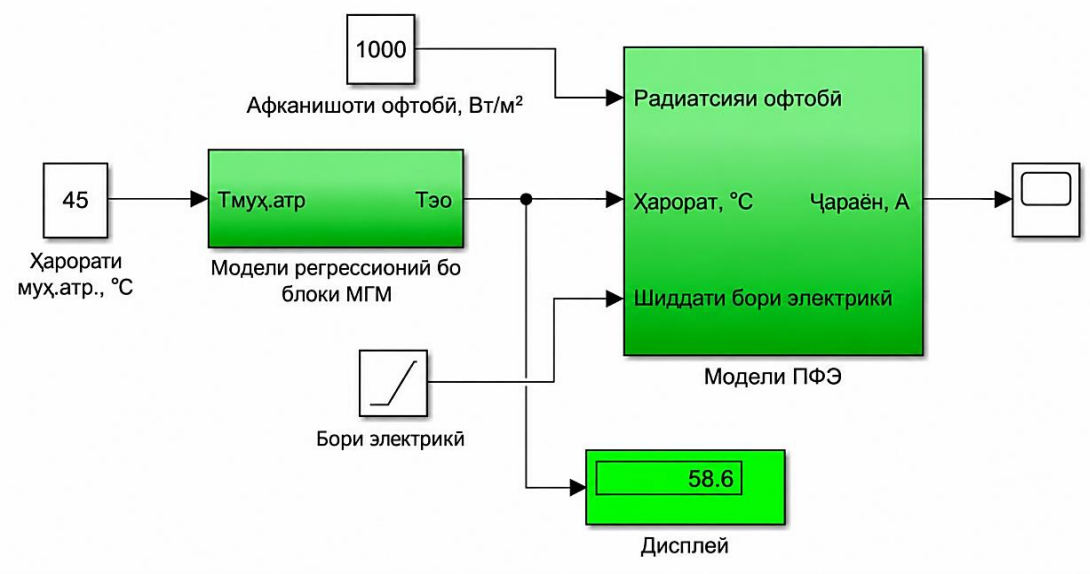
Модели неругоҳи фотоэлектрикӣ бо истифодаи термомуҳофизат. Барои моделсозии неругоҳи фотоэлектрикӣ бо блоки термомуҳофизат муҷаҳҳазшуда ҳамон модели қаблан таҳияшуда истифода гардид. Арзёбии таъсири термомуҳофизати пешниҳодшуда ба тавсифоти энергетикии дастгоҳи фотоэлектрикӣ бо дарназардошти қобилияти он барои коҳиш додани ҳарорати кории МФЭ ва дар натиҷа кам кардани талафоти ҳароратии иқтидор анҷом дода шуд [32].

Сохтори блоки таҳияшудаи МГМ, ки дар муҳити MATLAB/Simulink амалӣ карда шудааст, дар расми 4.15 пешниҳод шудааст.



Расми 4.15. – Модель блоки термомуҳофизати дастгоҳи фотоэлектрикӣ

Модел бо дарназардошти параметрҳои ибтидоии зерин таҳия карда шудааст. «Ҳарорати муҳити атроф 25 ва 45 ºС инчунин коҳиши таҷрибавии муқарраршудаи ҳарорати кории модули фотоэлектрикӣ ба андозаи 3,54 ºС ҳангоми истифодаи термомуҳофизати истифодашуда» [32].



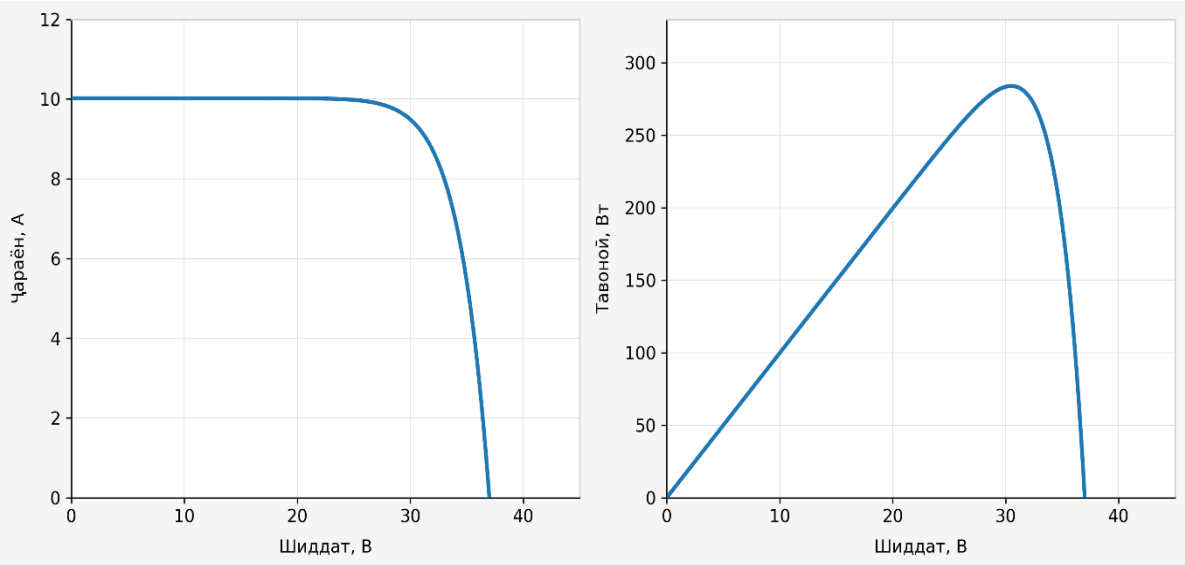
Расми 4.16. – Модели дастгоҳи фотоэлектрикӣ дар муҳити MATLAB/Simulink бо истифодаи блоки муҳофизати гармии модул

Натиҷаҳои моделсозӣ, ки дар расми 4.17 оварда шудаанд, самаранокии термомуҳофизати пешниҳодшударо дар коҳиш додани ҳарорати кории МФЭ нишон медиҳанд. Мувофиқи натиҷаҳои ҳисобӣ, ҳангоми ҳарорати муҳити атрофи 45 ºС, ҳарорати кории модул бо термомуҳофизат 58,6 ºС-ро ташкил медиҳад, дар ҳоле ки дар ҳолати набудани термомуҳофизат ин нишондиҳанда ба 62,13 ºС мерасад. Ҳамин тавр, истифодаи термомуҳофизати пешниҳодшуда

ҳарорати кории модулро 3,53 °С ё тақрибан 5,7 % нисбат ба ҳолати бе термомуҳофизат коҳиш медиҳад.

Коҳиши ҳарорати корӣ боиси кам шудани талафоти ҳароратии иқтидор ва беҳтар шудани параметрҳои электрикии МФЭ мегардад. Аз ҷумла, паст шудани ҳарорати ЭФЭ барои нигоҳ доштани сатҳи нисбатан баландтари шиддати кори бебор ва шиддат дар нуқтаи максималии иқтидор мусоидат карда, дар натиҷа иқтидори максималии истеҳсолии модулро зиёдтар мекунад.

Натиҷаҳои бадастомада таъсири мусбати термомуҳофизатро ба реҷаи ҳароратӣ ва нишондиҳандаҳои энергетикии МФЭ тасдиқ намуда, самаранокии истифодаи онро барои коҳиш додани талафоти вобаста ба ҳарорати баланд асоснок менамоянд. Тавсифоти волтамперӣ ва тавоноии МФЭ бо термомуҳофизати пешниҳодшуда дар ҳарорати муҳити атрофи 45 °С дар расми 4.17 оварда шудааст.



Расми 4.17. – Тавсифоти волтамперӣ (I-V) ва тавоноии (P-V) модули фотоэлектрикӣ бо термомуҳофизат ҳангоми ҳарорати муҳити атрофи 45 °С

«Таҳлили тавсифотҳои энергетикии бадастомадаи МФЭ нишон медиҳад ки коҳиши ҳарорати кории он ба андозаи 3,54 °С боиси беҳтар шудани параметрҳои электрикии модул мегардад» [4]. «Паст шудани сарбории ҳароратӣ ба коҳиши талафоти ҳароратии иқтидор, ки дар натиҷаи баланд шудани ҳарорати кории модул ба вуҷуд меоянд, мусоидат карда, дар натиҷа

боиси афзоиши иқтидори максималии истеҳсолӣ ва беҳтар шудани шароити табдили фотоэлектрикӣ мегардад» [3].

Натиҷаҳои бадастомада самаранокии системаи пешниҳодшудаи термомуҳофизатро дар коҳиш додани таъсири омили ҳароратӣ ба кори МФЭ дар шароити ҳарорати баланди муҳити атроф тасдиқ мекунанд.

Илова бар ин, модели таҳияшуда дар муҳити барномаи MATLAB/Simulink ҳамчун воситаи ҳисобӣ барои арзёбии самаранокии термомуҳофизати пешниҳодшуда ва таҳлили тавсифоти электрикии МФЭ дар реҷаҳои гуногуни ҳароратӣ истифода мешавад. Равиши пешниҳодшуда имкон медиҳад, ки талафоти ҳароратии иқтидор арзёбӣ гардида, реҷаҳои кории МФЭ-и бо термомуҳофизат ва бе он муқоиса карда шаванд, инчунин таъсири омили ҳароратӣ ба нишондиҳандаҳои энергетикии низомҳои фотоэлектрикӣ муайян карда шавад. Равиши таҳияшуда метавонад ҳангоми лоиҳакашӣ ва арзёбии самаранокии низомҳои фотоэлектрикии дар шароити ҳарорати баланди муҳити атроф истифодашаванда, аз ҷумла дар минтақаҳои ҷанубии Ҷумҳурии Тоҷикистон, мавриди истифода қарор гирад.

Хулосаҳои боби 4

Дар асоси таҳқиқоти анҷомдодашуда, ҳисобҳо ва таҳлили натиҷаҳои бадастомада дар боби чоруми кори диссертатсионӣ хулосаҳои асосии зерин ба даст оварда шуданд:

1. Муайян карда шуд, ки баланд шудани ҳарорати кории МФЭ, яке аз омилҳои асосии коҳишёбии самаранокии электрикии онҳо ба ҳисоб меравад. Ҳангоми баланд шудани ҳарорати ЭФЭ пеш аз ҳама коҳиши шиддат ба амал омада, дар натиҷа иқтидори максималии истеҳсолии модул кам мешавад.

2. Таҳлили усулҳои коҳиш додани талафоти ҳароратии низомҳои фотоэлектрикӣ анҷом дода шуд. Усулҳои ғайрифаъол ва фаъоли хунуккунии модулҳои фотоэлектрикӣ баррасӣ гардида, барои таҳқиқоти минбаъда истифодаи сохтори пешниҳодшудаи термомуҳофизат дар асоси плёнкаи голографӣ асоснок карда шуд.

3. Методикаи ҳисоб намудани тавсифотҳои электрикии модули фотоэлектрикӣ бо дарназардошти таъсири термомуҳофизат таҳия карда шуд, ки муайян намудани ҳарорати кории элементи фотоэлектрикӣ, ҷараёни расиши кӯтоҳ, шиддати кори бебор, зариби пуркунӣ ва иқтидори максималии истеҳсолиро дар бар мегирад. Ба модели ҳисобӣ блоки термомуҳофизат (МГМ) ворид карда шуд, ки имкон медиҳад ҳарорати кории элементи фотоэлектрикӣ бо дарназардошти таъсири термомуҳофизат коҳиш дода шавад.

4. Дар асоси натиҷаҳои ченкуниҳои таҳқиқоти таҷрибавӣ вобастагиҳои регрессионии ҳарорати кории модулҳои фотоэлектрикӣ аз ҳарорати муҳити атроф барои реҷаҳои бо истифодаи термомуҳофизат ва бе он таҳия карда шуданд, инчунин вобастагии коҳиши ҳарорати модул аз ҳарорати муҳити атроф муайян карда шуд. Ин имкон дод, ки таъсири термомуҳофизати пешниҳодшуда дар ҳисобҳои минбаъда ба таври миқдорӣ ба назар гирифта шавад.

5. Дар муҳити MATLAB/Simulink модели тақлидии неругоҳи фотоэлектрикӣ таҳия гардид, ки истифодаи он имкон медиҳад, таъсири термомуҳофизат ба тавсифоти электрикии МФЭ дар шароити якхелаи истифодабарӣ арзёбӣ ва натиҷаҳои модулҳои бо термомуҳофизат ва бе он муқоиса карда шавад. Ҳангоми ҳарорати муҳити атрофи 45 ^{o}C истифодаи термомуҳофизат ҳарорати кории модулро аз 62,13 ^{o}C то 58,6 ^{o}C, яъне ба андозаи 3,53 ^{o}C, коҳиш дод.

6. Натиҷаҳои моделсозӣ самаранокии термомуҳофизати пешниҳодшударо тасдиқ намуданд. Коҳиши ҳарорати корӣ боиси кам шудани талафоти ҳароратӣ ва беҳтар шудани тавсифоти электрикии МФЭ, пеш аз шама, аз ҷиҳати шиддат ва иқтидори максималии истеҳсолӣ мегардад. Равиши таҳияшуда метавонад барои арзёбии талафоти ҳароратӣ ва баланд бардоштани самаранокии низомҳои фотоэлектрикӣ дар шароити ҳарорати баланди муҳити атроф истифодашаванда мавриди истифода қарор гирад.

ХУЛОСАҲО

1. Омӯзиши таҳқиқоти мавҷуда ва таҳлили омилҳои таъсиррасон ба кори неругоҳҳои фотоэлектрикӣ нишон дод, ки ҳолати ҳароратии модулҳо дар ташаккули нишондиҳандаҳои энергетикии система нақши муҳим дорад. «Баландшавии ҳарорати корӣ боиси тағйирёбии параметрҳои асосии электрикӣ гардида, пеш аз ҳама коҳиши шиддати кори бебор ва иқтидори максималии модулро ба вуҷуд меорад. Аз ин рӯ, ба инобат гирифтани таъсири ҳарорат ҳангоми арзёбӣ ва моделсозии истеҳсоли неруи барқ зарур мебошад» [4-М, 5-М, 6-М, 8-М, 14-М, 16-М].

2. «Қонуниятҳои таъсири ҳарорат ба параметрҳои электрикӣ ва энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ аз ҷиҳати назариявӣ ва таҷрибавӣ муайян карда шуданд». «Нишон дода шуд, ки бо баланд шудани ҳарорати кории элементи фотоэлектрикӣ шиддати кори бебор ва иқтидори максималии истеҳсолӣ паст шуда, тағйирёбии ҷараёни расиши кӯтоҳ нисбатан кам мебошад. Зариби ҳароратии иқтидори модули дар таҳқиқот истифодашуда «тақрибан -0,40%/°C» буда, таъсири назарраси ҳарорат ба истеҳсоли неруи барқро тасдиқ мекунад» [8-М, 8-М, 16-М].

3. «Модели тақлидии низоми автономии фотоэлектрикӣ дар муҳити барномаи PVsyst барои шароити ноҳияи Кӯшониёни Ҷумҳурии Тоҷикистон таҳия гардида, параметрҳои иқлимӣ, ҳароратӣ, сарбории электрикӣ ва техникии низоми автономӣ ба ҳисоб гирифта шуданд. Барои сатҳи моил бо кунҷи майлкунии 45° ва азимути 0° воридшавии солонаи радиатсияи офтобӣ 1946 кВт·соат/м^2 муайян гардид, ки нисбат ба сатҳи уфуқӣ 11,86 % зиёд мебошад» [1-М, 4-М, 6-М].

4. Конфигуратсияи техникии низоми автономии фотоэлектрикӣ асоснок карда шуд. Барои сарбории электрикии насбшудаи 7 кВт, сарбории максималии 6573 Вт ва истеъмоли шабонарӯзии 10,483 кВт·соат/шабонарӯз дастгоҳи фотоэлектрикии иқтидораш 13,50 кВтр, захиракунандаи аккумулятории литий-ионии дорои зарфияти 65,6 А·соат ва шиддати 48 В, инчунин генератори захиравии 3 кВт интихоб карда шуданд [1-М, 4-М, 6-М].

5. Таъсири ҳарорат ба тавозуни энергетикии низоми фотоэлектрикӣ миқдоран арзёбӣ карда шуд. Ҳангоми баланд шудани ҳарорати муҳити атроф аз 25 то 55 °C, бо назардошти баланд шудани ҳарорати кории элементи фотоэлектрикӣ, иқтидори максималии модули меъёриаш 300 Вт то 248,7 Вт, яъне тақрибан 17,1 % коҳиш ёфт. Дар тавозуни солонаи энергетикӣ энергияи ҳисобии низоми автономӣ 24180 кВт·соат/сол, зариби кори фоиданоки умумӣ 14,8 %, зариби истеҳсолнокии низом (PR) 16,5 % ва ҳиссаи энергияи офтобӣ дар пӯшонидани сарбории электрикӣ (SF) 98,5 % муайян карда шуд [4-М, 6-М, 8-М, 17-М].

6. Методикаи ҳисоб намудани параметрҳои электрикии модули фотоэлектрикӣ бо дарназардошти таъсири термомуҳофизат таҳия карда шуд. Методикаи муайян намудани ҳарорати кории элементи фотоэлектрикӣ, ҷараёни расиши кӯтоҳ, шиддати кори бебор, зариби пуркунӣ ва иқтидори максималии истеҳсолиро дар бар мегирад. Ба модели ҳисобӣ блоки муҳофизати гармии модул (МГМ) ворид карда шуд, ки имкон медиҳад таъсири термомуҳофизат ба ҳарорати кории элементи фотоэлектрикӣ ба таври миқдорӣ ба ҳисоб гирифта шавад [8-М, 17-М].

7. Натиҷаҳои таҳқиқоти таҷрибавӣ имкон доданд, ки хусусиятҳои тағйирёбии ҳарорати МФЭ вобаста ба ҳарорати муҳити атроф барои ду ҳолати истифода бо термомуҳофизат ва бе он ба таври миқдорӣ тавсиф карда шавад. Дар асоси маълумотҳои бадастомадаи таҳқиқоти таҷрибавии саҳроӣ, муодилаҳои регрессионӣ барои ду ҳолат муайян гардида, инчунин робитаи байни дараҷаи пастшавии ҳарорати модул ва ҳарорати муҳити атроф муқаррар карда шуд. Барои муайян намудани параметрҳои ин робита усули хурдтарин квадратҳо истифода гардид. Ин модели регрессионӣ ба модели тақлидӣ дар муҳити барномаи MATLAB/Simulink ҳамгиро карда шуд [8-М].

8. Модели математикии кори модули фотоэлектрикӣ дар муҳити барномаи MATLAB/Simulink таҳия ва барои муқоисаи ду реҷаи истифодабарӣ истифода карда шуд. Ҳангоми ҳарорати муҳити атрофи 45 °C ҳарорати кории модули бе термомуҳофизат 62,13 °C ва ҳангоми истифодаи термомуҳофизати

пешниҳодшуда 58,6 ^{o}C-ро ташкил дод. Ҳамин тавр, истифодаи термомуҳофизат ҳарорати кории модулро ба андозаи 3,53 ^{o}C, ё тақрибан 5,7 % нисбат ба ҳолати бе термомуҳофизат паст намуд [5-М, 8-М].

Тавсияҳо оид ба татбиқи амалии натиҷаҳои таҳқиқот

– Ҳангоми лоиҳакашии неругоҳҳои барқи фотоэлектрикии автономӣ ва шабакавӣ, инчунин ҳангоми интихоби модулҳои фотоэлектрикӣ ва таҷҳизоти ҳисобии зарурӣ барои объектҳое, ки дар шароити иқлими Ҷумҳурии Тоҷикистон ҷойгир мебошанд, таъсири ҳарорати кории модулҳо ба параметрҳои электрикӣ ва энергетикии онҳо ба назар гирифта шавад. Методикаи пешниҳодшуда метавонад ҳангоми муайян намудани иқтидори насбшудаи низоми фотоэлектрикӣ, арзёбии ҳаҷми солонаи истеҳсоли неруи барқ ва муайян кардани талафоти иқтидор вобаста ба ҳарорат истифода шавад.

– Модели таҳияшуда дар муҳити MATLAB/Simulink ва вобастагиҳои таҷрибавию регрессионии бадастомада барои истифода дар таҳқиқоти илмӣ, ҳисобҳои лоиҳавӣ ва раванди таълимӣ ҳангоми таҳлили таъсири ҳарорат ба параметрҳои электрикии модулҳои фотоэлектрикӣ тавсия карда мешаванд. Натиҷаҳои моделсозӣ метавонанд дар якҷоягӣ бо маҷмуи барномавии PVsyst ҳангоми арзёбии талафоти энергетикӣ, муқоисаи вариантҳои гуногуни конфигуратсияи низомҳои фотоэлектрикӣ ва баланд бардоштани дақиқии пешгӯии истеҳсоли неруи барқ дар шароити иқлими гарми Ҷумҳурии Тоҷикистон ва дигар минтақаҳои дорои шароити иқлими монанд истифода шаванд.

РЎЙХАТИ АДАБИЁТИ ИСТИФОДАШУДА

1. Makhsumov I.B., Davlatzoda A.N. Performance Analysis of Autonomous Solar Power Plants Using the PVsyst Software Package Under the Conditions of the Southern Regions of the Republic of Tajikistan // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. – 2025. – Vol. 18, No. 6. – P. 763-777.

2. Рудник, В.Е. Программно-технические средства моделирования в реальном времени фотоэлектрической солнечной электростанции в электроэнергетической системе: дис. … канд. техн. наук: 2.4.3: защищена 28.02.2024 / В.Е. Рудник. – Томск, 2024. – 154 с. https://portal.tpu.ru/portal/pls/portal/!app_ds.ds_view_bknd.download_doc?fileid=11676

3. Ле Винь Тхань. Разработка методов и алгоритмов повышения эффективности фотоэлектрической энергосистемы: автореф. дис. … канд. техн. наук: 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки) / Ле Винь Тхань. – Москва, 2023. – 24 с. – URL: https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01012583268 (дата обращения: 16.09.2026).

4. Махсумов И.Б. Анализ производительности автономных солнечных электростанций с учётом экологических аспектов с применением программного пакета PVsyst в условиях южных регионов Республики Таджикистан / И.Б. Махсумов, А.Н. Давлатзода, М.Б. Холназаров // Окружающая среда и энерговедение. 2025. № 1(25). С. 106-128. 10.24412/2658-6703-2025-1-106-128 https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80582162

5. Hasan A.S.M.M., Kesapabutr P., Möller B. Bangladesh’s pathways to net-zero transition: reassessing country’s solar PV potential with high-resolution GIS data // Energy for Sustainable Development. – 2024. – Vol. 81. – Article 101511. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101511.

6. Dave S., Minampati V.R.R., Prajapati P. Rooftop solar programme and citizens’ perceptions for sustainable lifestyle: a study of Ahmedabad city, Gujarat // Next Energy. – 2025. – Vol. 7. – Article 100287. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.nxener.2025.100287.

7. Renewable Capacity Statistics 2026. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency (IRENA), 2026. 68 p. ISBN 978-92-9260-725-8. URL: https://www.irena.org/Publications/2026/Mar/Renewable-capacity-statistics-2026 (дата обращения: 19.08.2026).

8. Би, Ц. Исследование способов снижения рабочей температуры фотоэлектрических модулей для увеличения реальной выработки электроэнергии / Ц. Би // Экономика строительства. – 2023. – № 11. – С. 148-150. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=55676841

9. Premkumar, M., Kumar C., Sowmya R. Mathematical Modelling of Solar Photovoltaic Cell/Panel/Array based on the Physical Parameters from the Manufacturer's Datasheet // International Journal of Renewable Energy Development. – 2020. – Vol 9, No. 1. – P. 7-22. DOI: https://doi.org/10.14710/ijred.9.1.7-22.

10. IEA. Technology: Solar PV and wind [Электронный ресурс] // Global Energy Review 2026. – Paris: International Energy Agency, 2026. – URL: https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2026/technology-solar-pv-and-wind (дата обращения: 21.09.2026).

11. Ершов Р.Р., Федотов Е.А. Моделирование автономной солнечной электростанции в среде MATLAB Simulink // Universum: технические науки. – 2021. – № 5-5 (86). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-avtonomnoy-solnechnoy-elektrostantsii-v-srede-matlab-simulink (дата обращения: 15.09.2026).

12. Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B. The influence of ambient temperature on the energy characteristics of solar modules // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Sochi, 2020. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112064.

13. Обухов С.Г., Плотников И.А. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 38-51.

14. IEA. Global Energy Review 2026 [Электронный ресурс]. – Paris: International Energy Agency, 2026. – URL: https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2026 (дата обращения: 21.09.2026).

15. Стребков Д.С. Роль солнечной энергии в энергетике будущего / Д.С. Стребков // Теплоэнергетика. – 2006. – № 3. – С. 58-64.

16. Али Н.К. Сравнительный анализ эффективности сетевых фотоэлектрических систем в различных климатических условиях / Н.К. Али, Т.И. Петров, В.А. Манахов, В.В. Новокрещенов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2025. – Т. 17, № 4(68). – С. 3-23. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=87685087

17. Безруких П.П. Состояние, перспективы и проблемы развития возобновляемых источников энергии / П.П. Безруких, Д.С. Стребков // Малая энергетика. – 2005. – № 1-2. – С. 6-12.

18. PV*SOL premium. The trusted software for solar design. URL: https://pvsol.software/ (дата обращения 15.04.2026).

19. HelioScope, an Aurora Inc. Company. URL: https://helioscope.aurorasolar.com/product-2/ (дата обращения 15.04.2026).

20. System Advisor Model™ Version 2025.4.16 (SAM™ 2025.4.16) [Электронный ресурс]. – Golden, CO: National Laboratory of the Rockies, 2025. – URL: https://sam.nlr.gov (дата обращения: 23.05.2025).

21. HOMER® Software – the trusted global standard in hybrid power system modeling. URL: https://homerenergy.com/ (дата обращения 15.04.2026).

22. Makhsumov I.B., Isozoda D.T., Silemonov D.S. The Influence of Solar Insolation Variability on the Efficiency of Photovoltaic Systems in the Conditions of the South of Tajikistan // 2025 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). Magnitogorsk, Russian Federation: IEEE, 2025. P. 658–662. DOI: 10.1109/UralCon67204.2025.11206619.

23. Михалкова Е.Г., Орлеанский С.А. Определение оптимальных параметров сэс и их влияние на вырабатываемую электроэнергию // Научный аспект. 2023. Т. 1. № 10. С. 65-75.

24. Khidolda Y., Asylkhan A. A., Zhonkeshova K. S., Abdikalyk N. Оценка эффективности функционирования солнечной электростанции // Engineering Journal of Satbayev University. – 2021. – Vol. 143, No. 3. – P. 76-84.

25. Символоков, О.А. Договоры в электроэнергетике: проблемы теории и практики: монография / О.А. Символоков. – Москва: Инфотропик Медиа, 2021. – 186 с. http://ivo.garant.ru/#/document/77202273

26. Guan, Y. Accurate Short-term Forecasting for Photovoltaic Power Method Using RBM Combined LSTM-RNN Structure with Weather Factors Quantification / Y. Guan, B. Zhang, X. Yan // 2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). – Beijing, China, 2019. – P. 797–802. – DOI: 10.1109/iSPEC48194.2019.8975309.

27. Перес Москоте, Д.А. Управление распределенными энергосистемами с возобновляемыми источниками энергии и регулируемыми потребителями: автореф. дис. … кан. техн. наук: специальность 05.14.08 / Д.А. Перес Москоте. – Москва, 2022. – 20 с. https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01011179398?page=1&rotate=0&theme=white&inversion=off

28. Кирпичникова И.М. Повышение эффективности работы солнечных электростанций: анализ факторов перегрева, загрязнения и деградации фотоэлектрических модулей / И.М. Кирпичникова, И.Б. Махсумов // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2025. – Т. 10, № 1(39). – С. 116-124. – DOI 10.25744/genb.2025.1.39.016.

29. Махсумов И.Б. Комплексный анализ факторов, влияющих на эффективность солнечных элементов / И.Б. Махсумов // Тепловые электрические станции. – 2025. – № 1(1). – С. 2-9.

30. Кирпичникова И.М. Сравнительный анализ генерации электрической энергии фотоэлектрическими модулями в различных температурных условиях / И.М. Кирпичникова, Д.А. Эвок, И.Б. Махсумов // Электричество. – 2023. – № 11. – С. 34-41. – DOI 10.24160/0013-5380-2023-11-34-41.

31. Кирпичникова И.М. Снижение генерации электрической энергии солнечными модулями в условиях запыленности местности / И.М. Кирпичникова, И.Б. Махсумов, В.В. Шестакова // iPolytech Journal. – 2023. – Т. 27, № 1. – С. 83-93. – DOI 10.21285/1814-3520-2023-1-83-93.

32. Кирпичникова, И.М. Анализ эффективности тепловой защиты фотоэлектрических преобразователей солнечной электростанции / И.М. Кирпичникова, А.С. Мартьянов, И.Б. Махсумов // Промышленная энергетика. – 2021. – № 5. – С. 34-44. – DOI 10.34831/EP.2021.83.85.006.

33. Махсумов, И.Б. Влияние температурных и эксплуатационных факторов на эффективность солнечных модулей / И.Б. Махсумов, А.Н. Давлатзода, З.С. Рахимов // Развитие энергетической отрасли Таджикистана в период независимости: Материалы международной научно-практической конференции, Душанбе, 07 апреля 2025 года. – Душанбе: "Aprint", 2025. – С. 217-224.

34. Кирпичникова, И.М. Построение энергетических характеристик солнечных модулей с учетом условий окружающей среды / И.М. Кирпичникова, И.Б. Махсумов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 34. – С. 56-74. – DOI 10.15593/2224-9397/2020.2.04.

35. Кирпичникова, И.М. Исследование температуры поверхности солнечных модулей с использованием голографической защиты от перегрева / И.М. Кирпичникова, И.Б. Махсумов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2019. – Т. 15, № 4. – С. 19-29. – DOI 10.17122/1999-5458-2019-15-4-19-29.

36. Ковалев, В.З., Парамзин А.О., Архипова О.В. Математическое моделирование фотоэлектрических панелей как составляющей комплекса распределенной генерации // Инженерный вестник Дона. 2022. № 12 (96). – С. 155-169.

37. Ажмухамедов И.М., Лоба И.С., Мачуева Д.А. Прогнозирование и оценка выработки энергии на солнечных станциях: состояние проблемы и тенденции развития // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2024. – Т. 12, № 1 (44). – URL: https://www.moitvivt.ru/journal/pdf?id=1499 (дата обращения: 15.09.2026). – DOI: 10.26102/2310-6018/2024.44.1.008.

38. Махсумов, И.Б. Влияние изменчивости солнечной инсоляции на эффективность фотоэлектрических систем в условиях юга Таджикистана / И.Б. Махсумов, Д.Т. Исозода, А.Н. Давлатзода // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2025. № 3(71). С. 5–13.

39. Елистратов, В.В. Моделирование работы и оптимизация параметров систем автономного электроснабжения на основе ВИЭ / В.В. Елистратов, Е.С. Аронова // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2011. – № 1. – С. 119-127.

40. Бохтар. Годовая информация о климате, выбросах и рисках [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.city-facts.com/q%C5%ADrghonteppa/weather (дата обращения: 15.04.2026).

41. Касобов Л.С. Возобновляемые источники энергии как фактор устойчивого развития сельских территорий Республики Таджикистан / З. Ш. Юлдашев, Л.С. Касобов, Р.З. Юлдашев, А.К. Киргизов // Вестник Таджикского технического университета. – 2014. – № 2(26). – С. 60-63.

42. Vasisht M.S., Srinivasan J., Ramasesha S. Performance of solar photovoltaic installations: Effect of seasonal variations // Solar Energy. – 2016. – Vol. 131. – P. 39-46. – DOI: 10.1016/j.solener.2016.02.013.

43. Щеклеин С.Е., Немихин Ю.Е., Велькин В.И., Власов В.В., Коржавин С.А., Серкова Е.В. Исследование эффективности солнечных фотоэлектрических преобразователей в натурных условиях // Альтернативная энергетика и экология. 2012. № 3. С. 55–58.

44. Shcheklein S.E., Matveev A.V., Beloborodov I.A., Nemikhin Y.E., Vlasov V.V. Study of Photovoltaic Grid-Connected Station Efficiency in the Annual

Cycle // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE). 2016. № 11–12. P. 37–51. DOI: 10.15518/isjaee.2016.11-12.037-051.

45. Photovoltaic Systems and The Sun [Электронный ресурс]. – URL: https://solarschools.net/knowledge-bank/renewable-energy/solar/photovoltaic-systems (дата обращения: 15.04.2026).

46. Чигак А.С. Обоснование электрических параметров и методов управления режимами работы фотоэлектрических установок для электроснабжения сельских потребителей: автореф. дис. … канд. техн. наук: специальность 4.3.2 «Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса». – Троицк, 2024. – 24 с.

47. Micheli L., et al. Modelling photovoltaic soiling losses through optical characterization // Renewable Energy. – 2020. – Vol. 145. – P. 180–189.

48. Ачитуее, С.А. Оценка потенциала солнечной радиации и производительности фотоэлектрических модулей на территории Республики Бурятия / С.А. Ачитуее, Н. Энэбиш // Вестник Бурятского государственного университета. Математика, информатика. – 2015. – № 3. – С. 8-15. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25054130

49. Гимазов, Р.У. Алгоритмы адаптивного управления процессом преобразования энергии в фотоэлектрической системе: дис. … канд. техн. наук: 05.13.06 / Р.У. Гимазов. – Томск, 2019. – 133 с. https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/57800/1/dis00373.pdf

50. Tsanakas I. A., Pilat E., Arbaretaz S., et al. Hybrid Data-Driven Modeling and Prediction of Photovoltaic Soiling Losses: Balancing Accuracy and Simplicity // Solar RRL. – 2025. – Vol. 9, No. 21. – Art. e202500576. – DOI: 10.1002/solr.202500576.

51. Impact of green energy development on climate change mitigation / K.Kh. Khushvakhtzoda, I.B. Makhsumov, M.B. Kholnazarov, I.M. Kirpichnikova // Regional Sustainability. 2026. Vol. 7, No. 1. P. 100292. DOI 10.1016/j.regsus.2026.100292.

52. Али Кайс Аднан Али. Повышение эффективности фотоэлектрической системы с помощью методов отслеживания MPPT на основе искусственного интеллекта применительно к условиям Республики Ирак: автореф. дис. … канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2025. – 28 с. https://www.spbstu.ru/dsb/09a5-thesis.pdf

53. Norde Santos F., Wilbert S., Ruiz Donoso E., El Dik J., Campos Guzman L., Hanrieder N., Fernández García A., Alonso García C., Polo J., Forstinger A., Affolter R., Pitz-Paal R. Cleaning of Photovoltaic Modules through Rain: Experimental Study and Modeling Approaches // Solar RRL. 2024. Vol. 8, No. 24. Art. 2400551. DOI: 10.1002/solr.202400551.

54. Gilman P., Dobos A., DiOrio N., et al. SAM photovoltaic model technical reference update. – Golden, CO, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2018. – 93 p. – (NREL/TP-6A20-67399).

55. Castro R., Teixeira I. Heat Waves and Photovoltaic Performance: Modelling, Sensitivity, and Economic Impacts in Portugal // Sustainability. – 2026. – Vol. 18. – Art. 289. – DOI: 10.3390/su18010289.

56. Sun V., Asanakham A., Deethayat T., et al. A new method for evaluating nominal operating cell temperature (NOCT) of unglazed photovoltaic thermal module // Energy Reports. – 2020. – Vol. 6. – P. 1029–1042. – DOI: 10.1016/j.egyr.2020.04.026.

57. Koehl M., Heck M., Wiesmeier S., et al. Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2011. – Vol. 95, No. 7. – P. 1638–1646. – DOI: 10.1016/j.solmat.2011.01.020.

58. Sun X., Silverman T., Garris R.L., et al. An Illumination- and Temperature-Dependent Analytical Model for Copper Indium Gallium Diselenide (CIGS) Solar Cells // IEEE Journal of Photovoltaics. – 2016. – Vol. 6, No. 5. – P. 1298–1307. – DOI: 10.1109/JPHOTOV.2016.2583790.

59. Appelbaum J., Maor T. Dependence of PV module temperature on incident time-dependent solar spectrum // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, No. 3. – Art. 914. – DOI: 10.3390/app10030914.

60. Кирпичникова, И.М. Возможные проблемы эксплуатации солнечной электростанции из-за состояния солнечных модулей / И.М. Кирпичникова, Д.А. Эвок // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2025. – Т. 68, № 2. – С. 76-84. – DOI 10.17213/0136-3360-2025-2-76-84.

61. Юзикова, В.В. Обеспечение эффективной работы солнечных модулей с разработкой высоковольтных устройств защиты от загрязнений: автореф. дис.… канд. техн. наук: специальность 2.4.5 / В.В. Юзикова. – Екатеринбург, 2024. – 22 с. https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=5659

62. Duffie John A., William A. Beckman, and Nathan Blair. Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind. John Wiley & Sons, 2020. DOI:10.1002/9781119540328

63. Кирпичникова, И.М. Определение состояния фотоэлектрических модулей по их вольт-амперным характеристикам / И.М. Кирпичникова, В.А. Заварухин, В.А. Серов, Е.Д. Слетова // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2025. – № 6(282). – С. 60-63.

64. Заварухин, В.А. Разработка алгоритма оценки состояния фотоэлектрических модулей на солнечных электростанциях: автореф. дис.… канд. техн. наук: специальность 2.4.5 / В.А. Заварухин. – Екатеринбург, 2025. – 20 с. https://www.dissercat.com/content/razrabotka-algoritma-otsenki-sostoyaniya-fotoelektricheskikh-modulei-na-solnechnykh-elektros

65. Тихонов П.В. Обоснование параметров фотоэлектрического теплового модуля : дис. … канд. техн. наук : 05.14.08 / П.В. Тихонов. – Москва, 2014. – 142 с.

66. Ang T.-Z., Salem M., Kamarol M., Das H. S., Nazari M. A., Prabaharan N. et al. A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications,

challenges and suggestions // Energy Strategy Reviews. 2022.Vol. 43. Art. 100939. DOI: 10.1016/j.esr.2022.100939.

67. Holechek J.L., Geli H.M.E., Sawalhah M.N., Valdez R.A. A global assessment: Can renewable energy replace fossil fuels by 2050? // Sustainability. 2022. Vol. 14, No. 8. Art. 4792. DOI: 10.3390/su14084792.

68. Местников, Н.П. Разработка и исследование способов повышения энергоэффективности солнечных электростанций в условиях севера: дис. … канд. техн. наук: 2.4.5: защищена 22.05.2024 / Н.П. Местников. – Якутск, 2024. – 226 с.

69. Faiman D. Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2008. Vol. 16, No. 4. P. 307–315.DOI: 10.1002/pip.813.

70. Кирпичникова, И.М. Оценка влияния частичного затенения на мощность фотоэлектрического модуля по вольт-амперной характеристике / И.М. Кирпичникова, В.А. Серов, В.А. Заварухин // Электричество. – 2025. – № 5. – С. 55-61. – DOI 10.24160/0013-5380-2025-5-55-61.

71. Воротынцев Д.В., Тягунов М.Г. Прогноз выработки электроэнергии фотоэлектрическими электростанциями (на сутки вперед) с использованием машинного обучения // Вестник МЭИ. 2018. № 4. С. 53–57. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-53-57.

72. Энгель Е. А., Энгель Н. Е. Методы машинного обучения для задач прогнозирования и максимизации выработки электроэнергии солнечной электростанции // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 223. № 2. С. 146–170. DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2023/2/146-170.

73. Tsanakas I. A., Lokhat I., Jay A., Gregoire C., Rusnak J. State-of-Play and Emerging Challenges in Photovoltaic Energy Yield Simulations: A Multi-Case Multi-Model Benchmarking Study // Solar RRL. 2023. Vol. 7, No. 8. Art. 2200582. DOI: 10.1002/solr.202200582.

74. Кирпичникова, И.М. Методика оценки потенциала солнечной энергетики в Республике Таджикистан / И.М. Кирпичникова, И.Б. Махсумов, Ю. Нуроллахи // Энергобезопасность и энергосбережение. 2020. № 3. С. 25-34. DOI 10.18635/2071-2219-2020-3-25-34.

75. Adekanbi M. L., Alaba E. S., John T. J., Tundealao T. D., Banji T. I. Soiling Loss in Solar Systems: A Review of Its Effect on Solar Energy Efficiency and Mitigation Techniques // Cleaner Energy Systems. 2024. Vol. 7. Art. 100094. DOI: 10.1016/j.cles.2023.100094.

76. Skoplaki E., Palyvos J. A. Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations // Renewable Energy. 2009. Vol. 34, No. 1. P. 23–29. DOI: 10.1016/j.renene.2008.04.009.

77. Махсумов, И.Б. Развитие энергетических комплексов Центральной Азии на основе возобновляемых источников энергии и их вклад в повышение надежности и безопасности энергетики стран / И.Б. Махсумов, И.М. Кирпичникова // Надежность и безопасность энергетики. – 2026. – Т. 19, № 1. – С. 15-24. – DOI 10.24223/1999-5555-2026-19-1-15-24.

78. I. M. Kirpichnikova, I. B. Makhsumov and V. V. Shestakova, "Influence of the Dust Content of the Area on the Generation of Electricity by Solar," 2023 Seminar on Industrial Electronic Devices and Systems (IEDS), Saint Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 123-125, doi: 10.1109/IEDS60447.2023.10425906.

79. Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B. Investigation of Surface Temperature of Solar Modules Using Holographic Overheating Protection // IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). Magnitogorsk. 2019. P. 80–84. https://doi.org/10.1109/PEAMI.2019.8915414

80. Кирпичникова, И.М. Повышение энергетической эффективности работы солнечных модулей за счет снижения температуры поверхности / И.М. Кирпичникова, И.Б. Махсумов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 2. – С. 489-499.

81. Kirpichnikova I.M., Sudhakar K., Makhsumov I.B., et al. Thermal model of a photovoltaic module with heat-protective film // Case Studies in Thermal Engineering. – 2022. – Vol. 30. – Art. 101744. – DOI: 10.1016/j.csite.2021.101744.

82. Solar Panels/S19 HE 300–310 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.enfsolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/28741 (дата обращения: 24.04.2026).

83. Махсумов И.Б. Разработка энергокомплекса на базе возобновляемых источников энергии для электроснабжения труднодоступных районов Республики Таджикистан с использованием термозащиты солнечных модулей: дис. … канд. техн. наук: 05.09.03 / И.Б. Махсумов. – Челябинск, 2021. – 209 с.

84. Кирпичникова И.М. Выбор электрооборудования автономной фотоэлектрической системы с использованием программного обеспечения PVSYST / И.М. Кирпичникова, И.Б. Махсумов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 77-88. – DOI 10.14529/power200207.

85. Кирпичникова, И.М. Выбор параметров вольтамперной характеристики для определения возможных причин деградации фотоэлектрических модулей / И.М. Кирпичникова, В.А. Заварухин, Е.Д. Слетова // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2024. – № 3. – С. 15-21.

86. Dubey S., Sarvaiya J.N., Seshadri B. Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world – a review // Energy Procedia. – 2013. – Vol. 33. – P. 311–321. – DOI: 10.1016/j.egypro.2013.05.072.

87. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. – 5th ed. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2020. – 944 p.

88. Köntges M., Kurtz S., Packard C., Jahn U., Berger K., Kato K., Friesen T., Liu H., Van Iseghem M. Review of Failures of Photovoltaic Modules. – St. Ursen : IEA Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS), 2014. – 144 p. – (Report IEA-PVPS T13-01:2014).

89. Hasan M.A., Parida B., et al. Effects of different environmental and operational factors on the PV performance: A comprehensive review // Energy Science & Engineering. – 2022. – Vol. 10, № 3. – P. 656–675. – DOI: 10.1002/ese3.1043.

90. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. Photovoltaics Report [Электронный ресурс]. – Freiburg: Fraunhofer ISE, 2024. – URL: https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html (дата обращения: 20.07.2026).

91. King D.L., Boyson W.E., Kratochvil J.A. Photovoltaic Array Performance Model. – Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2004. – 41 p. – (SAND2004-3535).

92. PVsyst SA. PVsyst Documentation [Электронный ресурс]. – Geneva: PVsyst SA. – URL: https://www.pvsyst.com/help/ (дата обращения: 20.07.2026).

93. MathWorks. Simscape Electrical Documentation [Электронный ресурс]. – Natick, MA: The MathWorks, Inc. – URL: https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ (дата обращения: 20.07.2026).

94. Skoplaki E., Palyvos J. A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations // Solar Energy. – 2009. – Vol. 83, № 5. – P. 614–624. – DOI: 10.1016/j.solener.2008.10.008.

95. Hasan A., McCormack S. J., Huang M. J., Norton B. Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building-integrated photovoltaics // Solar Energy. – 2010. – Vol. 84, № 9. – P. 1601–1612. – DOI: 10.1016/j.solener.2010.04.017.

96. Faiman D. Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2008. – Vol. 16, № 4. – P. 307–315. – DOI: 10.1002/pip.813.

97. Krauter S. Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2004. – Vol. 82, № 1–2. – P. 131–137. – DOI: 10.1016/j.solmat.2004.01.011.

98. Bahaidarah H., Subhan A., Gandhidasan P., Rehman S. Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions // Energy. 2013. Vol. 59. P. 445–453. DOI: 10.1016/j.energy.2013.07.050.

99. Du B., Hu E., Kolhe M. Performance analysis of water-cooled concentrated photovoltaic system // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2012. – Vol. 16, № 9. – P. 6732–6736. – DOI: 10.1016/j.rser.2012.08.018.

100. Chow T. T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology // Applied Energy. – 2010. – Vol. 87, № 2. – P. 365–379. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.06.037.

101. Bijjargi Y.S., Kale S.S., Shaikh K.A. Cooling techniques for photovoltaic module for improving its conversion efficiency: a review // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. – 2016. – Vol. 7, No. 4. – P. 22–28.

102. Солнечная энергетика. Учеб. пособие для вузов / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин; под ред. В.И. Виссарионова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008 – 276 с.

103. Нян Линн Аунг Разработка солнечной фотоэлектрической системы автономного электроснабжения индивидуальных потребителей в тропических условиях: автореф …канд.техн.наук: спец. 05.19.03 / Нян Линн Аунг. – М., 2015. – 18 с.

104. Solar Electricity / ed. by T. Markvart. – 2nd ed. – Chichester ; New York: John Wiley & Sons, 2000. – 280 p. – (UNESCO Energy Engineering Series).

105. Villalva M.G., Gazoli J.R., Ruppert Filho E. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays // IEEE Transactions on Power Electronics. 2009. Vol. 24, № 5. P. 1198–1208. DOI: 10.1109/TPEL.2009.2013862.

106. Кирпичникова, И.М. Причины сокращения сроков работы солнечных модулей и способы их предотвращения / И.М. Кирпичникова, В.А. Серов, В.А. Заварухин, Е.Д. Слетова // Окружающая среда и энерговедение. – 2025. – № 1(25). – С. 80-88. – DOI 10.24412/2658-6703-2025-1-80-88.

107. Ali Z.H., Ahmed A.K., Saeed A.T. Modeling solar modules performance under temperature and solar radiation of Western Iraq // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. – 2018. – Vol. 9, No. 4. – P. 1842–1850. – DOI: 10.11591/ijpeds.v9.i4.pp1842-1850.

108. Gaughan R. How Does Temperature Affect Solar Panels? [Электронный ресурс]. – URL: https://sciencing.com/temperature-affect-solar-panels-20687.html (дата обращения: 20.06.2020).

109. Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B., Madiyar Z., et al. Study of the Operation of Solar Modules Using Holographic Thermal Protection // E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 140. – Art. 11010. – DOI: 10.1051/e3sconf/201914011010.

110. Khagad D. HJT vs TOPCon Solar Panel 2026: Compare Performance + Cost [Электронный ресурс] // Heaven Green Energy. – 2026. – 6 June. – URL: https://www.heavengreenenergy.com/blog/hjt-vs-topcon (дата обращения: 13.08.2026).

111. Brian. TOPCon or HJT? Key Considerations for Solar Panel Selection in PV Projects [Электронный ресурс] // Maysun Solar. – 2026. – 9 March. – URL: https://www.maysunsolar.com/blog-topcon-hjt-solar-panels-selection-guide/ (дата обращения: 13.08.2026).

112. Interactive Best Research-Cell Efficiency Chart [Электронный ресурс] // National Renewable Energy Laboratory (NREL). – URL: https://www.nrel.gov/pv/interactive-cell-efficiency.html (дата обращения: 13.08.2026).

113. Philipps S., Warmuth W. Photovoltaics Report [Электронный ресурс] / Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, PSE Projects GmbH. – Freiburg, 2026. – Updated: 14 July 2026. – URL: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf (дата обращения: 13.08.2026).

114. Joule Heating [Электронный ресурс] // SciencePedia. Bohrium. – URL: https://scipedia.bohrium.com/en/sciencepedia/feynman/electromagnetism_undergraduate-Joule_heating (дата обращения: 16.08.2026).

115. Segbefia O.K. Temperature profiles of field-aged photovoltaic modules affected by optical degradation // Heliyon. – 2023. – Vol. 9, No. 9. – Art. e19566. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e19566.

116. Irradiance & Insolation [Электронный ресурс] // PV Performance Modeling Collaborative (PVPMC); Sandia National Laboratories. URL: https://pvpmc.sandia.gov/modeling-guide/1-weather-design-inputs/irradiance-insolation/ (дата обращения: 18.08.2026).

117. NASA Science Editorial Team. What Is NASA? [Электронный ресурс] // NASA Science. – 2008. – 23 января. – URL: https://science.nasa.gov/learning-resources/for-kids-and-students/what-is-nasa/ (дата обращения: 15.09.2026).

118. Агьекум, Э.Б. Исследование потенциала ветровой и солнечной энергии в Республике Гана и научное обоснование площадок для размещения ВЭУ и СЭС: дис. … канд. техн. наук: 2.4.5 / Э.Б. Агьекум. – Екатеринбург, 2022. – 224 с. https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01011143534.

119. Bocca, A. Temperature Efficiency Analysis in Photovoltaics Using Basic Geodata: Application to Europe / A. Bocca, L. Bottaccioli, A. Macii // 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). – Amalfi, Italy, 2018. – P. 823–828. – DOI: 10.1109/SPEEDAM.2018.8445279.

120. Сипана, П. Разработка и экспериментальное исследование способов повышения эффективности фотоэлектрических электростанций, работающих в условиях высоких температур окружающей среды (на примере Республики Индия): дис. … канд. техн. наук: 2.4.5 / П. Сипана. – Екатеринбург, 2023. – 175 с. https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01011685404

121. Тухфатуллин, О.Ф. Разработка эффективных солнечных элементов и фотоэлектропреобразователей из кристаллического кремния n- и p-типа проводимости для условий жаркого климата: автореф. дис. … д-ра философии

(PhD) по техн. наукам: 01.04.10 / О.Ф. Тухфатуллин. – Ташкент, 2019. – 27 с. https://diss.natlib.uz/ru-RU/ResearchWork/OnlineView/45728

122. Winchester, B. Lifetime optimisation of integrated thermally and electrically driven solar desalination plants / B. Winchester, G. Huang, H. Beath, P. Sandwell, J. Cen, J. Nelson, C.N. Markides // npj Clean Water. – 2024. – Vol. 7, No. 1. – Article number: 65. – DOI: 10.1038/s41545-024-00335-4.

123. Герра, Д.Д. Оценка статистическими методами генерации электрической энергии электротехническим комплексом с фотоэлектрическими панелями / Д.Д. Герра // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 12. – С. 369-378.

124. Sainthiya, H. Different types of cooling systems used in photovoltaic module solar system: A review / H. Sainthiya, N.S. Beniwal // 2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET). – 2017. – P. 1500–1506. – DOI: 10.1109/WiSPNET.2017.8300012

125. Марьин, Е.В. Финансово-правовое обеспечение охраны окружающей среды и природопользования в Российской Федерации: дис. … д-ра юрид. наук: 5.1.2 / Е.В. Марьин. – Москва, 2026. – 417 с. https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01015613002

126. Piasecka, I. Sustainable and Circular Materials for Photovoltaic Power Plants: A Comparative Life Cycle Assessment of Mono-Crystalline Silicon and Perovskite Module Scenarios / I. Piasecka, P. Bałdowska-Witos, P. Leda, G. Szala, P. Kubiak, A. Leda // Materials. – 2026. – Vol. 19, No. 14. – Article number: 2996. – DOI: 10.3390/ma19142996

127. Akdemir, H. The Experimental Assessment of Different PV Cell Temperature Models Under the Actual Climatic Conditions for Cd-Te PV Modules / H. Akdemir, M. Böcu, I. Nakir // 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT Asia). – Brisbane, Australia, 2021. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/ISGTAsia49270.2021.9715678.
https://ieeexplore.ieee.org/document/9715678

128. Yang, D. A Tutorial Review of the Solar Power Curve: Regressions, Model Chains, and Their Hybridization and Probabilistic Extensions / D. Yang, X. Xia, M.J. Mayer // Advances in Atmospheric Sciences. – 2024. – Vol. 41, No. 6. – P. 1023–1067.

129. Юлдошев, И.А. Комбинированные энергоустановки на основе фотоэлектрических батарей из кристаллического кремния: автореф. дис. … д-ра техн. наук: 05.05.06 / И.А. Юлдошев. – Ташкент, 2016. – 188 с. https://diss.natlib.uz/ru-RU/ResearchWork/_Details?id=90717

130. Кайль А.Н., Коржов В.Ю., Петрусева Н.А. Комментарий к Федеральному закону от 26 марта 2003 г. N 35-ФЗ "Об электроэнергетике" (постатейный). - Специально для системы ГАРАНТ, 2012 г. https://ivo.garant.ru/#/document/58082138

131. Саламов, И. Х. Эффективность сетевой солнечной электростанции в климатических условиях Чеченской Республики / И. Х. Саламов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2020. – Т. 16, № 2(20). – С. 5-14. – DOI 10.34708/GSTOU.2020.14.20.007.

132. Keya, D.R. GIS-Based Analysis of the Solar Radiation Mapping and Potential Assessment for the North Iraq-Kurdistan Region / D.R. Keya, B. Farangis, R. Sirwan, K. Behler // Journal of Engineering Science and Technology. – 2023. – Vol. 18, No. 5. – P. 2269–2280. https://openalex.org/works/W4289835916

133. Food Security and Agro-Industrial Potential of the Eurasian Region / E. Vinokurov (ed.), A. Ahunbaev, S. Chuyev [et al.]. – Almaty: Eurasian Development Bank, 2023. – (Reports and Working Papers; 23/1).

134. Юлдашев, З.Ш. Комплексное использование альтернативных источников энергии / З.Ш. Юлдашев, Л.С. Касобов // Социально-экономическиеи экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики : Материалы 20-ой Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики, Тула - Минск - Донецк, 06–07 ноября 2024 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2024. – С. 360-363.

135. Филюков, А.В. Оценка эффективности фотоэлектрических элементов в климатических условиях г. Томска / А.В. Филюков, М.А. Игнатенко // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: материалы III Всероссийской научно-практической конференции, Кемерово, 13–15 декабря 2017 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2017. – С. 426.

136. Герра, Д.Д. Повышение энергоэффективности работы электротехнического комплекса с использованием солнечных батарей на подстанции Сантьяго-де-Куба: дис. … канд. техн. наук: 05.09.03 / Д.Д. Герра. – Санкт-Петербург, 2021. – 138 с.

137. Al-Zoubi, O.H. Anti-Soiling and Self-Cleaning Properties of Vertically Installed Bifacial PV Modules: Long-Term Field Observations in Arid Climates / O.H. Al-Zoubi // 2025 International Conference on Engineering and Computing Technologies (EngiTek). – 2025. – P. 1–6.

ИНТИШОРОТ АЗ РӮЙИ МАВЗУИ ДИССЕРТАТСИЯ

Мақолаҳои дар маҷаллаҳои тақризшавандае, ки аз ҷониби Комиссияи олии аттестатсионии назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон ва Комиссияи олии аттестатсионии назди Вазорати илм ва таҳсилоти олии Федератсияи Русия эътироф шудаанд, нашршуда:

[1-М]. **Давлатзода А.Н.** Методика расчёта мощности солнечной системы автономного типа на примере электроснабжения частного дома [Текст] / И.Б. Махсумов, Н.Х. Одинаев, **А.Н. Давлатзода,** К.Ш. Шокиров // Журнал «Окружающая среда и энерговедение» (ОСЭ). – 2024. – № 2(22). – С. 79-97. – DOI 10.24412/2658-6703-2024-2-79-97. ISSN 2658-6703.

[2-М]. **Давлатзода А.Н.** Распределенная генерация и её влияние на режим работы электрической сети [Текст] / Д.Т. Исозода, И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода** // Научный журнал «Водные ресурсы, энергетика и экология» Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана № 4(3). – Душанбе, 2024 г. – С. 110-117. – ISSN 2789-0953.

[3-М]. **Давлатзода А.Н.** Анализ производительности автономных солнечных электростанций с учетом экологических аспектов с применением программного пакета PVsyst в условиях южных регионов Республики Таджикистан [Текст] / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** М.Б. Холназаров // Журнал «Окружающая среда и энерговедение» (ОСЭ). – 2025. – № 1(25). – С. 106-128. – DOI: 10.24412/2658-6703-2025-1-106-128. ISSN 2658-6703.

[4-М]. **Давлатзода А.Н.** Влияние изменчивости солнечной инсоляции на эффективность фотоэлектрических систем в условиях юга Таджикистана [Текст] / И.Б. Махсумов, Д.Т. Исозода, **А.Н. Давлатзода** // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2025. – № 3(71). – С. 5-13. – ISSN 2520-2227.

[5-М]. **Davlatzoda A.N.** Performance Analysis of Autonomous Solar Power Plants Using the PVsyst Software Package Under the Conditions of the Southern Regions of the Republic of Tajikistan [Текст] / I.B. Makhsumov, **A.N. Davlatzoda** // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. – 2025. – Vol. 18, No. 6. – P. 763-777. – ISSN 2313-6057.

Мақолаҳои дар маҷаллаҳои илмии шомили пойгоҳҳои наукометрии Scopus ва Web of Science нашршуда:

[6-М]. **Davlatzoda A.N.** Integration of Solar Power Plants into the Power Systems of Central Asia / I.B. Makhsumov, D.S. Silemonov, **A.N. Davlatzoda** // 2026 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Sochi, Russian Federation, 17-23 May 2026. – P. 1-5. DOI:10.1109/ICIEAM69213.2026.11549706.

Мақолаҳои дар дигар маҷаллаҳо нашршуда:

[7-М]. **Давлатзода А.Н.** Влияние деградации на эффективность работы фотоэлектрических модулей / И.Б. Махсумов, У.Х. Джалилов, **А.Н. Давлатзода,** О.Ҷ. Кобулов // Материалы Международной научно-практической конференции: «Инженерные исследования, инновации и инвестиции в области энергетики и промышленности». – Институт энергетики Таджикистана, р-н. Кушониён, 25 апреля 2023 г. – С. 119-124.

[8-М]. **Давлатзода А.Н.** Деградация фотоэлектрических модулей: причины и последствия / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** З.С. Рахимов // Материалы Международной научно-практической конференции: «Энергетика: состояние и перспективы развития». – Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, 20 декабря 2023 г. – С. 241-248.

[9-М]. **Давлатзода А.Н.** Развития малой гидроэнергетики путь к защите окружающей среды и экологии / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** Н.М. Раупов // Материалы Международной научно-практической конференции: «Энергетика: состояние и перспективы развития». – Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, 20 декабря 2023 г. – С. 249-257.

[10-М]. **Давлатзода А.Н.** Понимание деградации солнечных панелей, её причин и последствий / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** С.О. Ибрагимов // Материалы Международной научно-практической конференции: «Энергетика ключевое направление развития национальной экономики». – Институт энергетики Таджикистана, р-н. Кушониён, 22 декабря 2023 г. – С. 51-57.

[11-М]. **Давлатзода А.Н.** Понимание основ систем распределенной генерации и перспектив её развития / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** К.Ш. Шокиров // Материалы IX Международной научно-практической конференции: «Наука – основа инновационного развития». – Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, 18-19 апреля 2024 г. – С. 10-14.

[12-М]. **Давлатзода А.Н.** Влияние распределенной генерации на работу электрической сети / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** К.Ш. Шокиров // Материалы IX Международной научно-практической конференции: «Наука – основа инновационного развития». – Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, 18-19 апреля 2024 г. – С. 14-18.

[13-М]. **Давлатзода А.Н.** Оценка эффективности солнечных панелей на крышах в условиях городской застройки / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,**

Б.В. Худоназаров, Д.С. Силемонов // Булатовские чтения: сборник статей IV Всероссийской с международным участием молодёжной конференции. – Томск, 10-12 декабря 2024 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2024. – С. 482-485.

[14-М]. **Давлатзода А.Н.** Влияние температурных и эксплуатационных факторов на эффективность солнечных модулей / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** З.С. Рахимов // Материалы Международной научно-практической конференции: «Развитие энергетической отрасли Таджикистана в период независимости». – Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, 7 апреля 2025 г. – С. 228-235.

[15-М]. **Давлатзода А.Н.** Комплексный анализ факторов окружающей среды, влияющих на работу солнечных элементов: накопление пыли, температура окружающей среды и влажность / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** Н.Х. Одинаев // Материалы Международной научно-практической конференции: «Развитие энергетической отрасли Таджикистана в период независимости». – Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, 7 апреля 2025 г. – С. 236-245.

[16-М]. **Давлатзода А.Н.** Комплексное исследование факторов окружающей среды, влияющих на эксплуатацию солнечных элементов: пылеобразование, температура и влажность / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** И.С. Носиров // Материалы II Международной научно-практической конференции: «Цифровая индустрия и энергетическое развитие глазами ученых и исследователей». – Институт энергетики Таджикистана, р-н. Кушониён, 25 апреля 2025 г. – С. 62-69.

[17-М]. **Давлатзода А.Н.** Энергетический ландшафт Центральной Азии и роль возобновляемых источников энергии в трансформации региональных энергосистем / И.Б. Махсумов, А.Н. Давлатзода, Б.М. Хасанзода // Научно-технический журнал «Тепловые электрические станции». – 2026. – № 1(5). – С. 10-17. ISSN 3033-5590.

ЗАМИМАҲО

Замимаи 1.

Натиҷаҳои таҳқиқоти таҷрибавии таъсири ҳарорат ва ҷанголудшавӣ ба самаранокии модули фотоэлектрикии навъи SOLARMODUL ALEO S19 HE 300W Supercharged

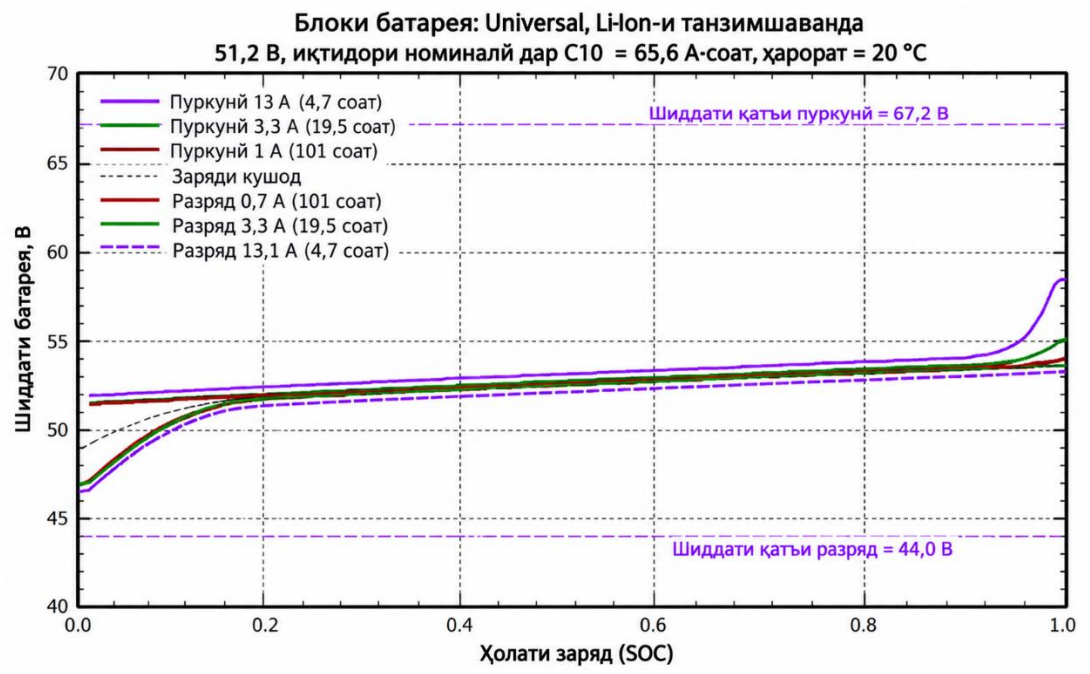
Сана ва вақти гузаронидани таҳқиқот (рӯз/соат)		Ҳолати обу ҳаво	Нишондоди люксметр, (лк)	Табдили равшанноки (лк) ба зичии радиатсияи офтобӣ (Вт·ч/м^2)	Суръати бод (шамол), (м/с)	Намнокии ҳаво, (%)	Ҳарорати ҳавои муҳити атроф, (°С)	Ҳарорати сатҳи пушти модул, (°С)	Ҳарорати сатҳи пушти модул, (°С)	Шиддати кори бебори МФЭ, (В)	Сарбории барқӣ. Лампаҳои галогенӣ (3 х 80) = 240 (Ватт)	Ҷараёни тавлидшаванда, (А)	Шиддати тавлидшаванда, (В)	Иқтидори тавлидшаванда, (Вт)
Модули фотоэлектрикии тоза (тозакардашуда) бо кунҷи майлонии 45^o														
05-09.04.2023	11:00	осмони соф	92000	989	2	25	32	54,3	57	34,9	240	8,01	31,40	251,5
	12:00	осмони соф	103200	1110	2	21	35	55,1	61,7	34,4	240	8,10	31,28	253,4
	13:00	осмони соф	102200	1099	2	14	35	54,6	58,2	34,4	240	8,14	31,28	254,6
	14:00	осмони соф	96200	1034	2	12	37	55,6	65,5	34,6	240	8,16	30,94	252,4
	15:00	осмони соф	74800	804	2	17	37,5	55,2	63,7	34,5	240	7,89	29,56	233,2
	16:00	осмони соф	64400	692	2	12	35	51,5	58	34,9	240	6,64	20,47	135,9
10-15.04.2023	11:00	осмони соф	151300	1627	2	24	32,5	53	58,5	34,9	240	8,01	31,86	255,2
	12:00	осмони соф	115200	1239	2	19	34	60	68	34,3	240	8,01	31,40	251,5
	13:00	осмони соф	98700	1061	2	14	35,5	59,7	67,5	33,6	240	8,11	31,17	252,7
	14:00	осмони соф	89000	957	3	13	36	60	67,6	34	240	7,99	30,71	245,3
	15:00	осмони соф	72700	781	3	13	35	52	59	34,7	240	7,94	30,02	238,3
	16:00	осмони соф	42100	452	3	12	36	44	52,3	34,7	240	6,31	19,55	123,3

17-22.04.2023	11:00	осмони соф	88000	946	3	15	33,6	62	67,4	33,7	240	7,91	30,59	241,9
	12:00	абрнок	86200	927	3	15	36	59	64	33,7	240	7,54	30,02	226,3
	13:00	абрнок	104500	1124	3	15	37	53	59,5	34,8	240	8,28	32,20	266,6
	14:00	абрнок	88200	948	3	15	37,5	54,4	62,2	34,6	240	7,94	30,82	244,7
	15:00	абрнок	28100	302	3	13	33	37	45	34,4	240	3,34	17,67	59
	16:00	абрнок	10800	116	3	14	36	46,5	52,5	35,3	240	3,2	17,7	56,64
24-29.04.2022	11:00	абрнок	83900	902	3	20	26	28	31,5	34,7	240	9,44	18,8	177,4
	12:00	абрнок	90700	975	5	23	32	51	58	34,9	240	8,05	31,63	254,6
	13:00	абрнок	73000	785	3	15	35	52,3	59,6	34,4	240	8,05	31,17	251
	14:00	абрнок	53800	578	3	17	37	44	52	35,4	240	7,91	29,9	236,5
	15:00	абрнок	67000	720	4	14	35	44,4	50,5	35,2	240	6,44	17,83	144,8
	16:00	абрнок	92000	989	4	13	35	40	46	36,3	240	7,59	28,06	212,9
Миқдори миёнаи соатҳо дар мох (05-29).04.2023	11:00	осмони соф	103800	1116	3	21	31	49,3	53,6	34,55	240	8,34	28,16	234,85
	12:00	абрнок	98800	1062	3	19,5	34	56,3	62,92	34,57	240	7,92	31	245,52
	13:00	абрнок	94600	1017	3	14,5	35,6	55	61,2	34,3	240	8,14	31,45	256
	14:00	абрнок	81800	879	3	14,3	36,9	53,5	61,82	34,65	240	8	30,6	244,8
	15:00	абрнок	60500	650	4	14,3	35,1	47,2	54,55	34,7	240	6,4	23,77	152,12
	16:00	абрнок	52300	562	3	12,75	35,5	45,5	49	35,3	240	5,9	21,44	126,5
	Модули фотоэлектрикии чанголуд бо кунҷи майлонии 45º													
05-09.04.2023	11:00	осмони соф	92000	989	2	25	32	52,1	57,2	34,4	240	8,29	24,84	206
	12:00	осмони соф	103200	1110	2	21	35	50,1	56,6	34	240	7,30	28,45	207,68
	13:00	осмони соф	102200	1099	2	14	35	50,4	56,1	34,1	240	7,33	28,47	208,67
	14:00	осмони соф	96200	1034	2	12	37	54,1	57,8	34,2	240	7,57	27,33	206,88
	15:00	осмони соф	74800	804	2	17	37,5	54,2	57,7	34,4	240	7,96	24,0	191,04
	16:00	осмони соф	64400	692	2	12	35	48,4	52,9	34,4	240	8,95	20,14	180,25

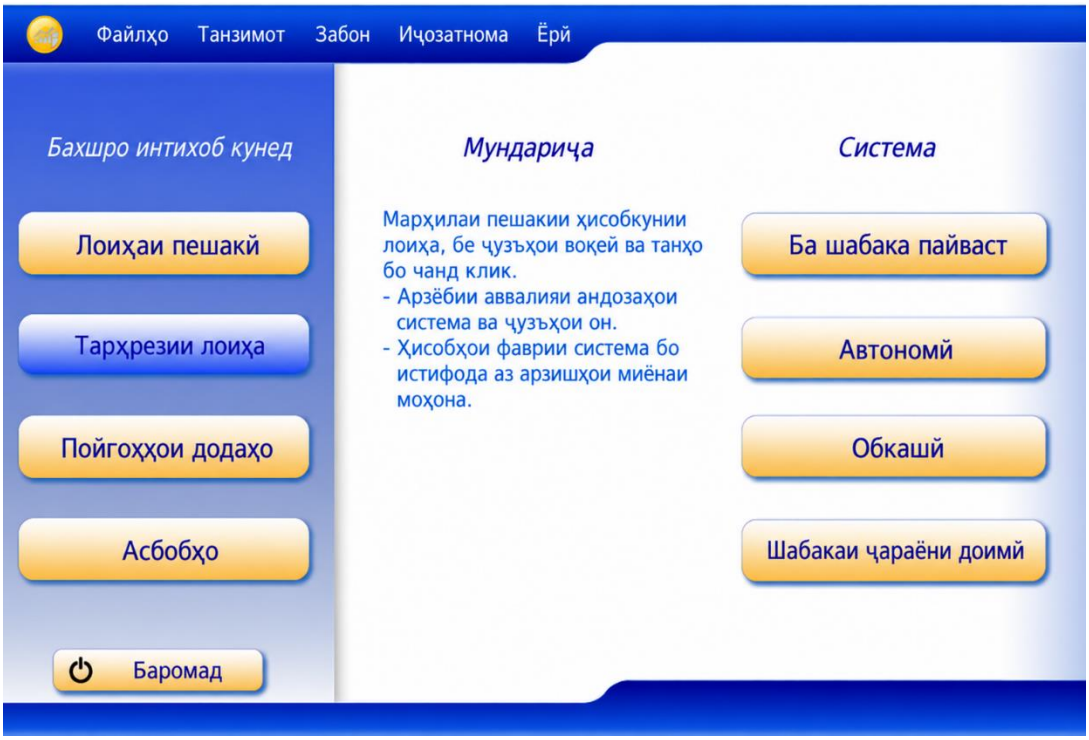
10-15.04.2023	11:00	осмони соф	151300	1627	2	24	32,5	53,2	58	34,5	240	7,39	27,89	206,1
	12:00	осмони соф	115200	1239	2	19	34	59,2	63,7	33,9	240	7,52	27,51	207,87
	13:00	осмони соф	98700	1061	2	14	35,5	59,5	63,5	33,8	240	7,14	28,14	200,91
	14:00	осмони соф	89000	957	3	13	36	60,8	63,9	33,7	240	7,24	26,98	195,33
	15:00	осмони соф	72700	781	3	13	35	51,5	55,5	34,3	240	7,23	23,10	167,03
	16:00	осмони соф	42100	452	3	12	36	42	47,3	34,6	240	7,11	15,71	111,7
17-22.04.2023	11:00	осмони соф	88000	946	3	15	33,6	60	63	33,7	240	7,32	27,06	198,07
	12:00	абрнок	86200	927	3	15	36	57	60	33,3	240	7,18	25,81	185,31
	13:00	абрнок	104500	1124	4	15	37	54,7	58,3	32,4	240	7,46	29,29	218,5
	14:00	абрнок	88200	948	3	15	37,5	55,1	57,6	34,1	240	7,39	27,12	200,41
	15:00	абрнок	28100	302	4	13	33	36	35,6	34,2	240	6,84	7,07	48,35
	16:00	абрнок	10800	116	3	14	36	46,6	50	34,7	240	4,06	11,42	46,36
24-29.04.2022	11:00	абрнок	83900	902	3	20	26	30	32	34,4	240	13,11	11,08	145,25
	12:00	абрнок	90700	975	5	23	32	51,3	54,3	34,7	240	7,98	26,14	208,6
	13:00	абрнок	73000	785	3	15	35	54,3	57,3	34,1	240	7,51	27,39	205,7
	14:00	абрнок	53800	578	3	17	37	50	53,2	34,3	240	8,09	23,95	193,75
	15:00	абрнок	67000	720	4	14	35	44	46,5	34,5	240	6,63	17,88	118,54
	16:00	абрнок	92000	989	4	13	35	44,4	49	35,1	240	8,07	21,6	174,3
Миқдори миёнаи соатҳо дар мох (05-29).04.2023	11:00	осмони соф	103800	1116	3	21	31	48,8	52	34,25	240	9,027	23,71	214,03
	12:00	абрнок	98800	1062	3	19	34	54,4	58,65	34	240	7,495	26,97	202,14
	13:00	абрнок	94600	1017	3	14,5	35,6	54,72	58,8	33,6	240	7,36	28,32	208,43
	14:00	абрнок	81800	879	3	14,3	36,9	55	58,12	34	240	7,57	26,34	199,4
	15:00	абрнок	60500	650	4	14,3	35,1	46,42	48,82	34,35	240	7,16	18,01	128,9
	16:00	абрнок	52300	562	3	12,75	35,5	45,35	49,8	34,7	240	7,04	17,21	121,15

Замимаи 2.

Натиҷаҳои моделсозӣ дар муҳити барномаи PVsyst



Тавсифоти шиддати кори бебори батареяи аккумулятории модели Universal Li-ion бо зарфияти 65,6 А·соат ҳангоми реҷаҳои гуногуни пуркунӣ (заряд) ва холишавии (разряд)



Скриншоти интерфейси барномаи PVsyst



Диаграммаи натиҷавии сохторию тавозунии талафоти солонаи технологӣ, оптикӣ ва ҳароратии неруи барқ дар низоми автономии фотоэлектрикии таҳқиқшаванда

Замимаи 3.

ВАЗОРАТИ ЭНЕРГЕТИКА ВА ЗАХИРАҲОИ ОБИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН
ДОНИШКАДАИ ЭНЕРГЕТИКИИ ТОҶИКИСТОН

735162, вилояти Хатлон, ноҳияи Кӯшониён, тел:935646407. E-mail: det-tj@mail.ru

№ 202/02-26
аз «30» 02 соли 2026

«ТАСДИҚ МЕКУНАМ»
Ректори ДЭТ д.и.т., дотсент
_____ Исозода Д.Т.
«___» _____2026

САНАД

оид ба татбиқи натиҷаҳои кори илмии Давлатзода Абуфазл Нусратулло дар мавзуи **«МОДЕЛСОЗИИ КОРИ НЕРУГОҲҲОИ БАРҚИ ОФТОБӢ БО ДАРНАЗАРДОШТИ ТАЪСИРИ ОМИЛҲОИ ҲАРОРАТӢ»,** барои дарёфти дараҷаи илмии номзади илмҳои техникӣ, аз рӯйи ихтисоси 2.3. Энергетика ва электротехника (2.3.4. Неругоҳҳои барқӣ ва системаҳои электроэнергетикӣ) дар раванди таълимии ихтисосҳои равияи энергетикии Донишкадаи энергетикии Тоҷикистон

Мо, имзокунандагон, тасдиқ менамоем, ки муқаррароти асосии илмӣ, хулосаҳо ва тавсияҳои рисолаи **Давлатзода А.Н.** дар мавзуи **«Моделсозии кори неругоҳҳои барқии офтобӣ бо дарназардошти таъсири омилҳои ҳароратӣ»,** барои дарёфти дараҷаи илмии номзади илмҳои техникӣ, аз рӯйи ихтисоси 2.3. Энергетика ва электротехника (2.3.4. Неругоҳҳои барқӣ ва системаҳои электроэнергетикӣ), дар раванди таълимии ихтисосҳои равияи энергетикии Донишкадаи энергетикии Тоҷикистон аз рӯйи фанҳои **«Истифодабарии энергияи офтоб», «Лоиҳакашии таҷҳизотҳои манбаъҳои барқароршавандаи энергия» ва «Реҷаи кори таҷҳизоти асосии манбаъҳои барқароршавандаи энергия»** барои донишҷӯёни зинаҳои бакалавриат ва магистратура истифода мегарданд, аз ҷумла:

– **Методикаи ҳисоб ва арзёбии таъсири омилҳои** ҳароратӣ ба самаранокии энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ, ки муайян намудани ҳарорати элементи фотоэлектрикӣ, шиддат, ҷараён ва иқтидори максималии модулро бо дарназардошти таъсири ҳарорат имкон медиҳад, дар гузаронидани машғулиятҳои назариявӣ ва амалӣ;

– **Модели тақлидии низоми автономии фотоэлектрикӣ** дар муҳити барномавии PVsyst, ки имконияти ҳисоб намудани истеҳсоли неруи барқ, талафоти ҳароратӣ, самаранокии энергетикӣ ва таъсири параметрҳои иқлимиро ба кори низоми фотоэлектрикӣ фароҳам меорад, дар иҷрои корҳои амалӣ ва озмоишӣ;

– **Модели математикии кори модули фотоэлектрикӣ** бо дарназардошти реҷаи ҳароратӣ ва термомуҳофизат дар муҳити MATLAB/Simulink, ки барои таҳлили муқоисавии параметрҳои электрикии модул ҳангоми мавҷуд будан ва набудани термомуҳофизат истифода мешавад, дар таҳлил ва моделсозии реҷаҳои кори модулҳои фотоэлектрикӣ.

Раиси комиссия:
Муовини ректор оид ба таълим ва
идораи сифати таҳсилот н.и.п. Зувайдуллозода Ф.З.

Аъзоёни комиссия:
Декани факултети электромеханика
ва зеҳни сунъӣ н.и.т., дотсент Одиназода Н.Х.

Мудири кафедраи манбаъҳои
алтернативии энергия н.и.т., дотсент Бурҳонзода И.Б.

Имзоҳои раиси комиссия, н.и.п. Зувайдуллозода Ф.З., аъзоёни комиссия, н.и.т., дотсент Одиназода Н.Х. ва н.и.т., дотсент Бурҳонзода И.Б.-ро тасдиқ мекунам.

Сардори шуъбаи кадрҳо
ва корҳои махсуси ДЭТ *Каримов З.А.*

Ҷамъияти дорои масъулияти маҳдуди «РУФТОБ»

Общество с ограниченной ответственностью «РУФТОБ»

ш. Душанбе, кӯч. А. Навоӣ 5/1. +992 411 00 11 11 info@rooftob.tj www.rooftob.tj

“ТАСДИҚ МЕКУНАМ”
Директори генералии Ҷамъияти дорои масъулияти маҳдуди «РУФТОБ»
_____ Г.Х. Убайдуллозода
«____»_____2026

САНАД

оид ба татбиқи натиҷаҳои кори илмии Давлатзода Абуфазл Нусратулло дар мавзуи **«Моделсозии кори неругоҳҳои барқи офтобӣ бо дарназардошти таъсири омилҳои ҳароратӣ»,** барои дарёфти дараҷаи илмии номзади илмҳои техникӣ, аз рӯйи ихтисоси 2.3. Энергетика ва электротехника (2.3.4. Неругоҳҳои барқӣ ва системаҳои электроэнергетикӣ), дар раванди истеҳсолот.

Мо, имзокунандагон, тасдиқ менамоем, ки натиҷаҳои асосии илмӣ, хулосаҳо ва тавсияҳои рисолаи Давлатзода А.Н. дар мавзуи **«Моделсозии кори неругоҳҳои барқии офтобӣ бо дарназардошти таъсири омилҳои ҳароратӣ»,** барои дарёфти дараҷаи илмии номзади илмҳои техникӣ, аз рӯйи ихтисоси 2.3. Энергетика ва электротехника (2.3.4. Неругоҳҳои барқӣ ва системаҳои электроэнергетикӣ), дар раванди истеҳсолот ҳангоми банақшагирӣ, лоиҳакашӣ ва сохтмони неругоҳҳои барқи офтобии автономӣ ва шабакавии иқтидорҳои хурду бузург истифода мегарданд, аз ҷумла:

− **Натиҷаҳои таҳқиқоти таҷрибавии таъсири ҳарорат ба нишондиҳандаҳои энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ** барои арзёбии талафоти ҳароратӣ ва

муайян намудани реҷаи кори модулҳо ҳангоми банақшагирӣ ва лоиҳакашии неругоҳҳои офтобӣ дар шароити ҳарорати баланди муҳити атроф;

– **Натиҷаҳои моделсозии неругоҳи фотоэлектрикии автономӣ дар муҳити PVsyst** барои банақшагирӣ ва лоиҳакашии неругоҳҳои офтобӣ, аз ҷумла ҳисобкунии тавозуни энергетикӣ, талафоти ҳароратӣ ва электрикӣ ва арзёбии истеҳсоли эҳтимолии неруи барқ бо дарназардошти шароити иқлимӣ ва маҳалли сохтмон;

– **Натиҷаҳои моделсозии математикии модули фотоэлектрикӣ дар муҳити MATLAB/Simulink** бо дарназардошти термомуҳофизат барои арзёбии реҷаи ҳароратӣ ва нишондиҳандаҳои электрикӣ, инчунин асоснок намудани қарорҳои техникӣ оид ба коҳиш додани талафоти ҳароратӣ ҳангоми лоиҳакашӣ ва сохтмони неругоҳҳои офтобӣ.

Директори техникӣ-истеҳсолӣ **Силемонов Д.С.**

Сардори шуъбаи кадрҳо **Ташрифзода Д.**

Замимаи 4.



ETU THE FIRST ELECTROTECHNICAL UNIVERSITY

IEEE Advancing Technology for Humanity

SAINT PETERSBURG ELECTROTECHNICAL UNIVERSITY «LETI»
and
IEEE RUSSIA NORTH WEST SECTION

present this

CERTIFICATE
of Participation

to

Abufazl N. Davlatzoda

for attending the 2025 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2025 ElCon)

Prof. Victor A. Tupik
Conference Chair

January 28-29, 2025
Saint Petersburg, Russia


ICIE
СЕРТИФИКАТ
Настоящим удостоверяется, что
Давлатзода Абуфазл
Нусратулло
принял(а) очное участие в Международной научно-технической конференции
«Пром-Инжиниринг»
17-23 мая 2026 г.
г. Сочи, Россия
Председатель оргкомитета,
доктор техн. наук, профессор
А.А. Радионов



ДОНИШКАДАИ ЭНЕРГЕТИКИ ТОҶИКИСТОН
ДЭТ
ИЭТ
ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ ТАДЖИКИСТАНА

СЕРТИФИКАТ

настоящий сертификат удостоверяет,что

Давлатзода Ибуфади

принял(а) участие в **III** Международной научно - практической конференции

«Цифровая индустрия и развитие энергетики глазами ученых и исследователей»

30 апреля 2026 года р. Кушониён, Республика Таджикистан

Ректор Института энергетики Таджикистана
Д.Т. Исозода