

ӘОЖ 62-21474

МРНТИ 44.39.29

DOI 10.56525/RYW5992

ШАҢ МЕН КҮЙЕ ӘСЕРІНЕН ФОТОЭЛЕКТРЛІК ПАНЕЛЬДЕРДІҢ ЖЫЛУЛЫҚ ЖӘНЕ ЭЛЕКТРЛІК КӨРСЕТКІШТЕРІНІҢ ӨЗГЕРУІ: ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ

Б.С.Умаров¹, Ш.М.Есемуратова²¹Есенов университеті, Ақтау, Қазақстан²Бердах атындағы Қаракалпақ мемлекеттік университеті, Нүкіс, Өзбекстан

e-mail: baigazy.umarov@yu.edu.kz, e_shiyrin@karsu.uz

Аннотация: Бұл мақалада Ақтау қаласының климаттық жағдайында шаң мен күйенің фотоэлектрлік (PV) панельдердің жылулық және электрлік көрсеткіштеріне әсері эксперименттік түрде зерттелді. Зерттеудің негізгі мақсаты – атмосфералық ластанушы бөлшектердің күн панельдерінің жұмыс тиімділігіне ықпалын кешенді түрде бағалау. Эксперименттік зерттеу Ш. Есенов атындағы Каспий технологиялар және инжиниринг университетінің зерттеу алаңында жүргізілді. Тәжірибе барысында оңтүстік бағытта 35° көлбеу бұрышпен орнатылған үш фотоэлектрлік панель пайдаланылды. Олардың біреуі күн сайын тазартылып, эталон ретінде қолданылды, ал қалған екі панель төрт және алты апта бойы табиғи атмосфералық ластану жағдайында қалдырылды. Панельдердің жұмыс көрсеткіштері күн радиациясының қарқындылығы, температура, ток, кернеу және шығу қуаты сияқты параметрлерді өлшеу арқылы бағаланды. Сонымен қатар, панель бетінде жиналған шаңның массасы анықталып, оның химиялық құрамы рентгендік дифракция (XRD) және рентгендік флуоресценция (XRF) әдістері арқылы талданды. Зерттеу нәтижелері шаң мен күйенің панель бетінде жиналуы олардың энергетикалық тиімділігін айтарлықтай төмендететінін көрсетті. Таза панельмен салыстырғанда ластанған панельдердің шығу қуаты шамамен 21,9%-ға дейін азайып, жұмыс температурасының жоғарылауы байқалды. Сонымен қатар күйе бөлшектерінің жиналуы панель бетінде «ыстық нүктелердің» пайда болуына әкеліп, жылулық және электрлік өнімділікке теріс әсер етеді. Алынған нәтижелер шаңды және өнеркәсіптік аймақтарда фотоэлектрлік жүйелердің тұрақты әрі тиімді жұмысын қамтамасыз ету үшін панельдерді жүйелі түрде тазалау мен техникалық қызмет көрсетудің маңызды екенін көрсетеді.

Түйін сөздер: Фотоэлектрлік панельдер (PV), шаң, күйе, атмосфералық ластану, ластану тығыздығы, күн радиациясы, ыстық нүктелер (hot spots), электр энергиясын өндіру, тиімділік төмендеуі, метеорологиялық факторлар.

Кіріспе

Күн қуатын кәдеге жаратудың сан алуан әдістері бар: фотоэлектрлік қондырғыларға тікелей қаржы құюдан бастап, электр тогын өндіруге дейін, сонымен қатар күн мұнаралары, күндік су жылу алмастырғыштар және күндік ауа жылытқыштар секілді түрлі гелио-жүйелер арқылы күн энергиясын жылу қуатына айналдыру. Фотоэлектрлік қондырғылардың қолдану ауқымы кейінгі жылдары айтарлықтай ұлғайып, жеке модульдерде, телекоммуникация тетіктерінде, жол бойы жарық шамдарында, құрылыс нысандарында, агро-өнеркәсіп жабдықтарында, тасымал құралдарында және өзге де бағыттарда іске асырылуда. Бұған қоса, фотоэлектрлік жүйелермен түзілетін электр қуаты – табиғатқа залал келтірмейтін, улы шығарындылар бөлмейтін, үздіксіз әрі сенімді жасыл энергия көзі. [1, 2].

Фотоэлектрлік қондырғылардың қызмет нәтижелілігіне бірқатар жайттар ықпал етеді: шикізаттың санаты, қызу деңгейі, күн сәулеленуінің пәрмені, тасалануы, ауа ағымының екпіні, шартты ылғал мөлшері және тозаң түйіршіктері. Сонымен қатар, күйе түйірлері де күн панельдерінің қуат өндіру көрсеткішіне едәуір әсер ететін негізгі себептердің қатарынан саналады. [3, 4].

Бұрынғы ғылыми еңбектерге сүйенсек, күн сәулесінің ықпалынан модуль бетінде температураның шоғырлануы әрі кір-коқыстың (шаң-тозаңның) түзілуі — фотоэлектрлік кешендердің қуат беру қарқынын бәсеңдететін басты факторлардың қатарына жатады [5, 6]. Күн модульдерінің жұмыс қабілетін қайта орнына келтіру мақсатында кейінгі уақытта фотоэлектрлік/жылу гибриді (PV/T) кешендер іске қосылуда [7]. Бұдан бөлек, PV модуль бетінде ластанудың жиналуы және оның жағымсыз салдары турасында әртүрлі жаңа-замандық ізденістер атқарылды [8]. Ластанудың құрылымдық (механикалық) әрі құрамы бойынша (элементтік, химиялық) ерекшеліктерін айқындау — түйткілді еңсерудегі бастапқы баспалдақ. Осы мәліметтерге сүйене отырып, модуль сыртқы қабатын тазартудың ұтымды амалдары мен тазарту жиілігінің ең қолайлы мерзім аралығы белгіленуі ықтимал [9].

Ластану жиналымы тек қана қатаң қатты түйіршіктермен шектеліп қалмайды — оның құрамына кірленген жұғындылар, ыстан, қанатты жануарлардың нәжіс қалдықтары, отын жануынан түзілген қалдықтар, табиғи органикалық қатпарлар, гүл-тозаң тіндері, өсімдік тозаңы, теңіздік немесе топырақ тұздары секілді элементтер де қосылады [10]. Ауа кеңістігінде қалықтап қозғалатын шаң-тозаң мен ыстан бөлшектері күн шуағының PV жасушаларына жету мөлшерін тасалау көлеңкесі тәрізді кемітіп, олардың қызметіне жағымсыз ықпал тудырады [11]. Бұдан бөлек, шаң мен ыстанның фотоэлектрлік модуль бетінде шоғырлануы модульдің жекелеген бөліктерінде шамадан тыс қызу аймақтарының, яғни «жоғары қызу ошақтарының» (hot spots) түзілуіне соқтырады. Аталған үрдіс электр қуатын түзу көлемін елеулі дәрежеде құлдыратады [12].

PV панельдерінің сыртқы қабатында шаң мен күйенің жиналу үдерісінің қарқындылығына бірнеше фактор ықпал етеді: атмосферадағы бөлшектердің концентрациясы, панельдердің кеңістікте бағытталуы және климаттық жағдайлар. Ғылыми дереккөздердің басым бөлігінде осы әсер етуші алғышарттар жан-жақты талданған. Мәселен, Hassan Z. Al Garni Сауд Арабиясының қуаң климаты жағдайында шаңның PV панельдер өнімділігіне әсерін және шаң бөлшектерінің өлшемдері мен құрамын талқылайды [13]. Алынған нәтижелерге сәйкес, шаң түйіршіктерінің өлшемі кішірейген сайын фотоэлектрлік жүйелердің энергия өндіру тиімділігі төмендейтіні анықталды.

Shaik және әріптестері [14] жүргізген зерттеуде құс нәжісінің және топырақпен ластанудың фотоэлектрлік (PV) модульдердің жұмыс тиімділігіне тигізетін әсері эксперименттік түрде қарастырылған. Әртүрлі көлбеу бұрыштарда (0° – 90°) орындалған тәжірибелер нәтижесінде, құс саңғырығымен ластанған және көлбеу бұрышы 0° болатын панельдердің электр қуатын өндіру деңгейі шамамен 46–89%-ға дейін төмендейтіні анықталған. Бұл құбылыс панель бетінің көлеңкеленуі мен сәуле өткізгіштігінің күрт төмендеуімен түсіндіріледі.

Mustafa және әріптестері [15] PV жүйелерге әртүрлі экологиялық факторлардың әсерін зерттеген. Ақтау қаласының жағдайында, шаңның жиі жинақталуы мен ауаның шаңды-бұршақты болуы, сондай-ақ құс нәжісінің түсуі панельдердің жұмыс тиімділігін төмендетуі мүмкін. Эксперименттік деректерге сәйкес, құс нәжісі PV модульдердің өнімділігін шамамен 7,4%-ға, ал шаңның жиналуы қуат шығуды 8,8%-ға төмендеткен. Осыдан шығатын қорытынды: Ақтау қаласында күн батареяларын тиімді пайдалану үшін оларды белгілі бір мерзімде жүйелі түрде тазалау қажет, бұл PV жүйелердің ұзақ мерзімді және тұрақты жұмысын қамтамасыз етеді.

Ақтаудағы құрғақ климат пен желді ауа райы әсерінен құм, цемент және құрылысқа байланысты бөлшектер ауаға ірі түйіршіктер түрінде көтеріледі де, шаңның құрамына енеді.

Ұсақ түйіршікті құрылымға ие цемент және гипс бөлшектері фотоэлектрлік модульдер бетінде тығыз қабат түзіп, тазалауды қиындататын ластанушы материалдар қатарына жатады. Abderrezek және әріптестері [16] жүргізген зерттеу нәтижелері көрсеткендей, мұндай минералдық шаң түрлерінің панель бетінде жиналуы күн сәулесінің өтімділігін төмендетіп, энергия өндіру деңгейінің едәуір азаюына алып келеді. Өсіресе шаң массасының артуымен PV модульдерінің қуат шығыны ең жоғары деңгейге жететіні анықталған. Осыған байланысты, фотоэлектрлік модульдердің бетінде құрылыс материалдарынан тұратын шаңның ұзақ уақыт

жиналуын болдырмау және олардың жұмыс тиімділігін сақтау мақсатында жүйелі тазалау шараларын қолдану қажеттілігі көрсетіледі.

Екі айлық кезең ішінде жиналған шаң үлгілері құрамдық талдаудан өткізілді. Зерттеу барысында табиғи жолмен жиналған шаңмен салыстыру негізінде үш негізгі құрамдас бөліктің PV модульдерінің жұмыс көрсеткіштеріне ықпалы жеке-жеке қарастырылды. Алынған нәтижелер PV панельдерінің өнімділік деңгейінің төмендеу жылдамдығы жиналған шаңның құрамдық ерекшеліктеріне тікелей байланысты екенін көрсетті.

Сонымен қатар, зерттеуде әртүрлі тазалау тәсілдері сыналып, олардың ішіндегі ең тиімдісі натрий ерітіндісі екені дәлелденді — ол панельдер бетінде табиғи шаң мен қатты бөлшектер жиналған кезде жоғалған қуатты қалпына келтіруде ең жоғары нәтиже берді.

Кальций карбонатына бай шаңның PV панельдерінің жұмыс тиімділігіне тигізетін ықпалы салыстырмалы түрде төмен екені анықталды. Мұндай ластануды жою үшін әдетте жоғары қысымды су ағынын пайдалану талап етіледі. Алайда панель бетінің қорғаныш қабатына бөгде материалдардың жабысып қалуын болдырмау мақсатында тазалау жұмыстары тек жұмсақ шүберек немесе қылшақ (щетка) көмегімен жүзеге асырылуы тиіс.

Қазақстан Республикасында, соның ішінде Ақтау қаласында, күн фотоэлектрлік технологияларын қоса алғанда, жаңартылатын энергия көздерін дамыту стратегиялық маңызға ие. Маңғыстау өңірінің жоғары күн радиациясы мен ашық күндердің көптігі күн энергетикасын кеңінен қолдануға қолайлы жағдай жасайды.

Ақтау қаласы мен оған жақын аумақтарда электр энергиясына деген сұраныстың артуына байланысты бірқатар күн фотоэлектрлік қондырғылар орнатылып, жеке тұрғын үйлер мен өндірістік нысандардың шатырларына автономды күн жүйелері орналастырылуда.

Алайда, аймақтың шөлейтті климаты, желдің жиі соғуы, теңіз жағалауындағы тұзды аэрозольдер, сондай-ақ құрылыс жұмыстары мен өнеркәсіптік қызмет нәтижесінде ауада шаң-тозаң мөлшері жоғары болып отыр. Соңғы жылдары антропогендік және табиғи факторлардың әсерінен қалыптасқан бұл жағдайлар күн панельдерінің бетінде шаң мен кірдің жиналуына әкеліп, олардың электрлік және жылулық өнімділігін айтарлықтай төмендетуі мүмкін.

Осыған байланысты, аталған зерттеу Ақтау қаласының жағдайында шаң мен кірдің аралас түрі жиналғаннан кейін күн фотоэлектрлік панельдерінің жылулық және электрлік сипаттамаларының өзгеруін зерттеуге бағытталған.

Зерттеу барысында Ақтау қаласының әртүрлі экологиялық жағдайдағы қала аймағы қарастырылды.

Алынған нәтижелер шаң, тұзды бөлшектер мен құрылыс тектес ластағыштардың күн фотоэлектрлік модульдерінің тиімділігіне елеулі кері әсер ететінін көрсетеді, бұл Ақтау қаласы жағдайында күн энергетикалық жүйелерінің тұрақты жұмысын қамтамасыз ету үшін жүйелі тазалау мен техникалық қызмет көрсетудің маңыздылығын дәлелдейді.

2. Әдістеме (Methodology)

Бұл эксперименттік зерттеуде шаңның күн энергетикалық жүйелердің жұмысына әсерін бағалау мақсат етілді. Тестілеу Ақтаудағы екі түрлі ауданда жүргізілді. Екі аймақтың негізгі айырмашылығы — бірінде шаң құрамында электр станцияларының мұржаларынан шыққан күйе көп болса, екіншісінде мұндай әсер жоқ, бірақ құрылыс материалдарының дұрыс сақталмауы салдарынан ұшпа бөлшектер мөлшері жоғары.

2.1 Зерттеу орны

Ақтау қаласы Қазақстан Республикасының батыс бөлігінде, 43°39'00.9"N және 51°10'01.1"E орналасқан. Қала Каспий теңізінің жағалауында орналасуына қарамастан, климаттық тұрғыдан құрғақ, шөлейт аймаққа жатады. Жаз мезгілінде ауа температурасы жоғары болып, жауын-шашын мөлшері азаяды, ал желдің жиі соғуы ауада шаң-тозаңның көтерілуіне қолайлы жағдай жасайды [17].

Ақтау қаласында классикалық мағынадағы күшті шаңды дауылдар сирек кездескенімен, шаңды күндер мен көтеріңкі аэрозоль концентрациясы жиі байқалады. Бұған келесі факторлар әсер етеді:

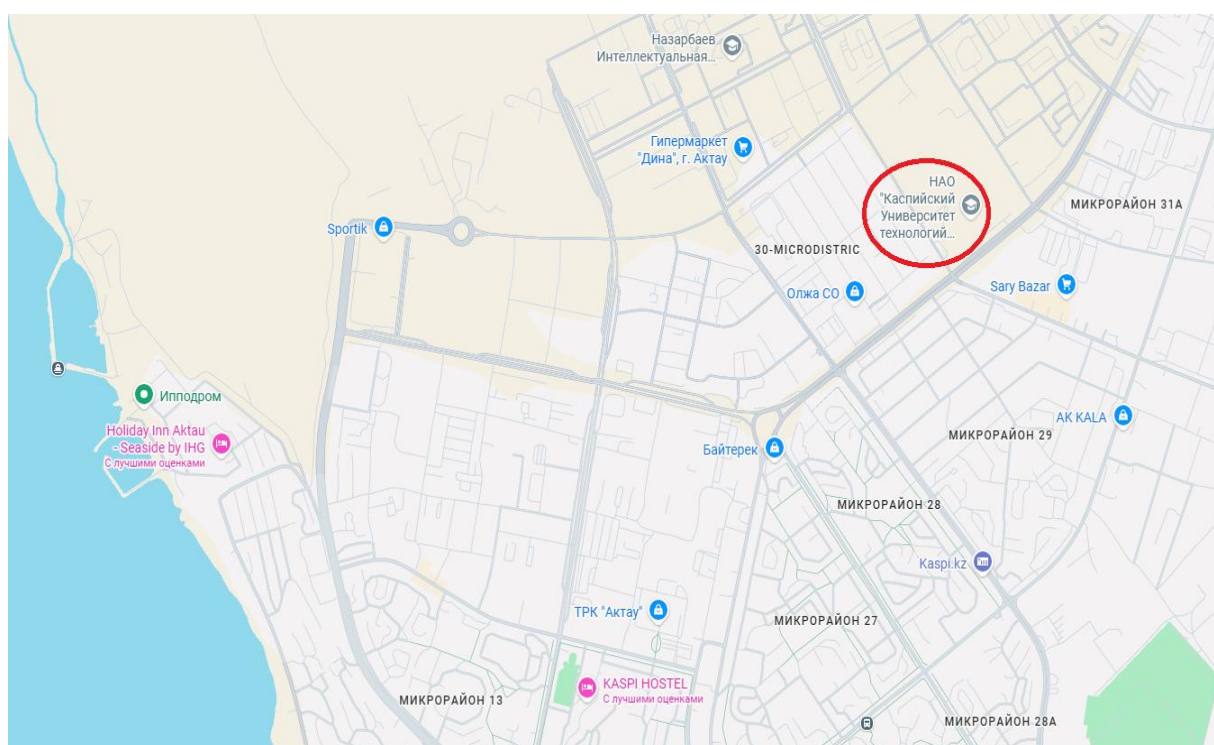
- табиғи құрғақшылық пен шөлейт ландшафт,

- жел эрозиясына бейім борпылдақ топырақ қабаты,
- қала аумағындағы қарқынды құрылыс жұмыстары,
- өнеркәсіптік нысандар мен инфрақұрылымның дамуы.

Сонымен қатар, Ақтау қаласының атмосферасы жылу электр станциялары, мұнай-газ саласына тиесілі өндірістік нысандар, резервтік дизель генераторлары нәтижесінде бөлінетін шығарындылармен де ластанады. Қалалық көлік санының артуы да ауадағы күйе, күл және ұсақ қатты бөлшектердің (РМ) мөлшерін көбейтіп отыр.

Аталған табиғи және антропогендік факторлардың жиынтық әсері Ақтау қаласы жағдайында күн фотоэлектрлік панельдерінің бетінде шаң мен кірдің жиналуына, соның салдарынан олардың электрлік және жылулық тиімділігінің төмендеуіне әкелуі мүмкін. Осы себепті аймақтық климаттық ерекшеліктерді ескере отырып, күн энергетикалық жүйелерінің жұмысын зерттеу және оңтайландыру өзекті мәселе болып табылады.

Зерттеу орны — 32-шағын ауданында Ш.Есенов атындағы Каспий мемлекеттік технологиялар және инжиниринг университетінде орналасқан (1-сурет).



1-сурет. Сынақ жүргізілген орын

2.2 Эксперименттік орнатылым

Шаң мен ластаушы шығарындылардың фотоэлектрлік жүйелерге ықпалын тәжірибелік тұрғыда бағалау үш күн панелінен құралған қондырғы негізінде жүзеге асырылды. 2-суретте бейнеленгендей, панельдер оңтүстік бағытқа бағдарланып, 35° көлбеу бұрышпен орналастырылды. Осы зерттеу аясында пайдаланылған фотоэлектрлік панельдердің техникалық параметрлері 2-кестеде келтірілген.



2-сурет. Сынақтан өткен үш күн панелі

2-кесте. Күн панельдерінің техникалық сипаттамалары

Элемент	Сипаттамалар
Модуль түрі	JKM415M-72H-V
Өндіруші	Jinko Solar Co., Ltd
Шың қуаты (P_{max})	415 W
Максималды қуат тогы (I_{mp})	9.75 A
Максималды қуат кернеуі (V_{mp})	42.6 V
Қысқа тұйықталу тогы (I_{sc})	10.82 A
Ашық тізбек кернеуі (V_{oc})	50.6 V
Жүйенің максималды кернеуі (VDC)	1500 V
Габарит өлшемдері	2008 × 1002 × 40 мм
Желге төзімділігі	2400 Па

Салыстырмалы талдау жүргізу мақсатында, сызбаның сол жағында орналасқан панель өлшеу жұмыстарының алдында күн сайын мұқият тазартылып отырды. Қалған екі панель үшін экспозициялау режимі келесі тәртіппен ұйымдастырылды: №2 панель төрт апта бойы табиғи атмосфералық жағдайлардың ықпалында қалдырылып, содан соң тазалау процедурасынан өткізілді. Ал №3 панель алты апта көлемінде сыртқы орта әсеріне ұшырағаннан кейін ғана тазартылды. №1 панельдің шығыс қуатының орташа көрсеткіші сол панель бойынша апталық жиынтық мәндерді анықтаудың негізі ретінде алынды. Қалған панельдер үшін де дәл осы әдіс арқылы орташа өлшеу нәтижелері есептелді. Аталған деректерге сүйене отырып, панельдердің жұмыс тиімділігі алты апта аралығында (яғни үш өлшеу кезеңі ішінде) өндірілген электр

энергиясының көлемі бойынша бағаланды. Соның нәтижесінде, зерттеліп отырған аймақта панельдерді ластанудан кейін тазалау кезінде қуаттың қайта қалпына келу динамикасын ескере отырып, тазалаудың ең оңтайлы мерзімін анықтауға мүмкіндік туды.

Панель бетінде шаң бөлшектерінің жабысу деңгейін төмендету мақсатында, ластанған панель арнайы жоғары температуралы зертханалық ортаға орналастырылды. Аталған зертхана Ш. Есенов атындағы Каспий мемлекеттік технологиялар және инжиниринг университетінің Энергетика кафедрасының қарамағында орналасқан. Зертханалық жағдай 40 °C температурада 8 сағат бойы тұрақты ұсталып, панель бетінде қалған ылғалдың толық булануын және шаң қабатының толықтай кебуін қамтамасыз етті. Одан кейін панель жұмсақ талшықты қылшақ көмегімен тазартылып, алынған шаң арнайы ыдысқа жиналды да, жоғары дәлдікке ие сезімтал электронды таразыда өлшенді. Жиналған шаң үлгілері рентгендік дифракция (XRD) және рентгендік флуоресценциялық (XRF) талдау әдістері арқылы сапалық әрі сандық зерттеуден өткізілді, мұнда негізгі назар күл мен күйе құрамдық үлестерін айқындауға бағытталды. Тазалау аяқталған соң, панель келесі экспозициялық кезеңді өткізу үшін қайтадан тәжірибелік жүйеге орнатылды.

2.3 Өлшеу құралдары

Тәжірибелік зерттеу жұмыстары 2025 жылғы 8 қыркүйектен бастап Ақтау қаласының ашық дала жағдайындағы сынақ алаңында жүргізілді. Қыркүйек айының таңдалу себебі — бұл кезеңде өзге айлармен салыстырғанда шаңды дауылдардың белсенділігі төмен деңгейде байқалады. Өлшеу үдерісі үш негізгі бағыт аясында іске асырылды: панельдердің жұмыс тиімділік параметрлері, модуль бетінде шоғырланған шаңның жалпы массасы және шаң құрамындағы күл мен күйе үлесінің пайыздық арақатынасы. Аталған өлшеулер 3-кестеде келтірілген арнайы өлшеу аспаптарының көмегімен орындалды.

3-кесте. Өлшеу құралдары, сипаттамалары және статистикалық ауытқу

Өлшеу құрылғысы	Өндіруші ел	Өлшенетін параметрлер	Статистикалық ауытқу (Uncertainty)
TSI DustTrak II құрылғысы	АҚШ	PM1, PM2.5, PM4, PM10, және жалпы қалқыма бөлшектер (TSP)	±0.23
GM1010 (жарық қарқындылығын өлшеуіш)	Қытай	Күн радиациясының қарқындылығы	± 1,150 %
Цифрлық мультиметр (TOTAL TMT47503)	Қытай	PV жүйесіндегі ток және кернеу	±1%
K типті термопаралар (Thermocouple Type-K)	Германия	Температура	±0.15%
HD31 Multifunction дерек тіркеу құрылғысы (data logger)	Италия	Өзгермелі жүктемедегі PV ток пен кернеуі	±0.2%
Testo 174H	Германия	Ауаның ылғалдылығы және температура	±0.3%
Жоғары дәлдікті сезімтал таразы (EJ610-E)	Жапония	Масса (шаң салмағы)	±0.02%
X-сәулелік дифракция (XRD) құрылғысы (Rigaku Corporation)	Жапония	Шаң құрамын сапалық талдау (qualitative analysis)	±0.1%
X-сәулелік флуоресценция (XRF) құрылғысы (Olympus)	Жапония	Шаң құрамын сандық талдау (quantitative analysis)	±0.07%

TSI DustTrak II құрылғысы сыртқы атмосферадағы ұшпа нанобөлшектердің құрамына сәйкес ауа ластану деңгейін бағалау үшін қолданылды. Бұл аспап АҚШ-та өндірілген және атмосферадағы PM₁, PM_{2.5}, PM₄, PM₁₀ фракцияларын, сондай-ақ жалпы ілінген қалқыма бөлшектерді (TSP — Total Suspended Particles) өлшеуге мүмкіндік береді. Өлшеудің ықтимал қателігі $\pm 0,23$ болып есептеледі. Күн сәулесінің қарқындылығын анықтау үшін GM1010 типті жарық қарқындылығы өлшеуіш (Light Intensity Meter) пайдаланылды. Бұл құрал сәулелену тығыздығы бойынша 0–1500 Вт/м² (W/m²) диапазонында жұмыс істейді және өлшеу ықтимал қателігі $\pm 1,150\%$ құрайды. Фотоэлектрлік (PV) панельдегі ток пен кернеу мәндерін анықтау үшін дәлдігі $\pm 1\%$ болатын Қытайда жасалған цифрлық мультиметр (TOTAL TMT47503) қолданылды. PV панельдегі ток пен кернеу көрсеткіштері өзгермелі жүктеме режимінде HD31 Multifunction деректер тіркеу құрылғысы (Data Logger) арқылы өлшенді, оның өлшеу ықтимал қателігі $\pm 0,2\%$ құрайды. Әр панельдің артқы бетінде К типті екі термопара (Thermocouple Type-K) орнатылды. Термопаралар панельдің геометриялық ортасына (центрлік бөлікке), сонымен қатар панельдің жоғарғы және төменгі шеттерінен 10 мм қашықтықта бекітіліп, панельдің жұмыс температурасын үздіксіз бақылау үшін қолданылды.

Панельдердің артқы бетіне орнатылған К типті термопаралар арқылы алынған температуралық деректер $\pm 0,15\%$ дәлдікке ие цифрлық термометр көмегімен тіркелді. Сонымен қатар, осы аспап арқылы PV панельдерінің жұмыс температуралары да бақылауға алынды. Қоршаған орта температурасын және ауадағы салыстырмалы ылғалдылықты анықтау үшін Testo 174H типті температура және ылғалдылық сенсоры пайдаланылды. Бұл құрылғының температура және ылғалдық өлшеулеріндегі дәлдігі $\pm 0,3\%$ деңгейінде бағаланады.

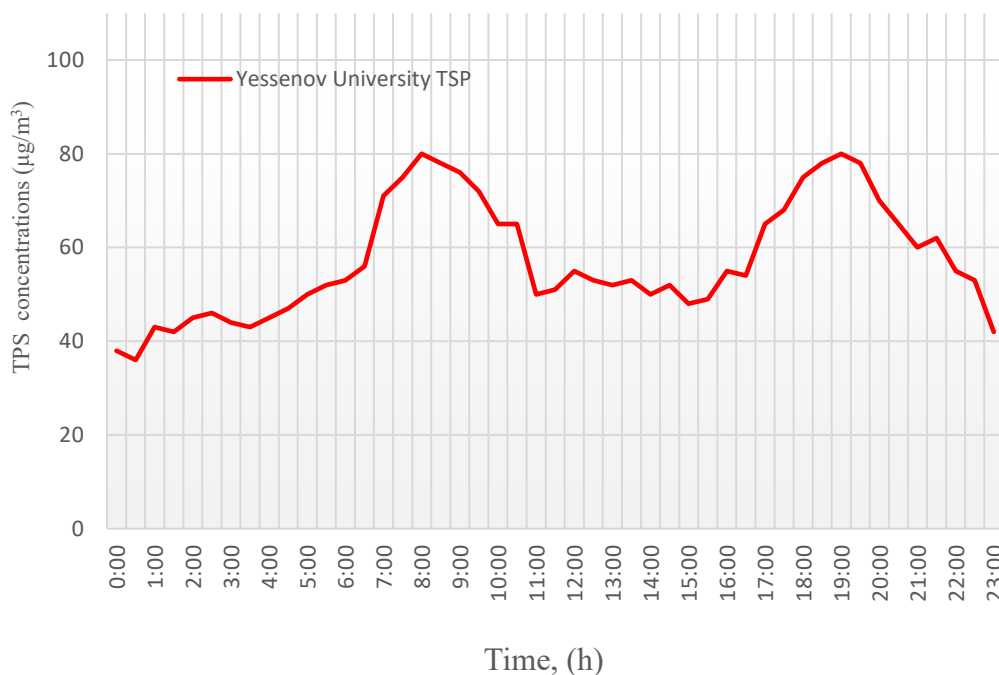
Қосымша ретінде, PV панельдерінің жылулық (thermal) бейнелері жылулық камера көмегімен түсірілді. Панель бетіне жиналған шаң қабатының массасы өлшеу дәлдігі $\pm 0.02\%$ болатын сезімтал таразыда (*EJ610-E модели*) өлшенді. Шаң бөлшектерінің құрамын сапалық және сандық тұрғыда сипаттау үшін рентгендік дифракция (*XRD — X-ray Diffraction*) және рентгендік флуоресценция (*XRF — X-ray Fluorescence*) талдаулары жүргізілді. Бұл құрылғылардың өлшеу дәлдігі жоғары және мүмкіндік қателігі өте төмен: XRD үшін $\pm 0.1\%$, XRF үшін $\pm 0.07\%$. Shaik және әріптестері ұсынған әдіске негізделген теңдеуді пайдаланып, эксперименттердің жалпы жинақталған мүмкіндік қателігі 2.14% болып есептелді. Практикалық өлшеу нәтижелері өте жоғары дәлдікке ие, ал қателік деңгейі шектеулі болғандықтан (2.14%), зерттеудегі алынған деректер сенімді әрі нақты болып саналады.

3. Нәтижелер және талқылау

3.1 Ауа құрамындағы жалпы ілінген қалқыма бөлшектер (TSP)

3-суретте зерттеу нысаны ретінде алынған екі аумақта атмосфералық ауадағы TSP концентрациясының тәуліктік өзгеріс динамикасы көрсетілген. Өлшеу үдерісі түнгі 00:00-ден басталып, келесі тәуліктің дәл осы уақытына дейін жалғасып, 24 сағаттық толық өлшеу циклін қамтыды. Алынған нәтижелер зерттелген екі аймақ арасында TSP деңгейлерінің айқын айырмашылығы бар екенін көрсетті. III. Есенов атындағы университет маңындағы өлшеу нүктесінде тәулік бойы күйе (soot) бөлшектерінің концентрациясы жоғары деңгейде тұрақты сақталғаны байқалды. Түнгі уақыт аралығында (22:00–05:00) ең төмен мәндерге дейін азайғаны анықталды.

Ресми жұмыс уақыты мен кешкі қарбалас кезеңде (evening peak period) екі аумақта да TSP концентрациясының өсуі тіркелді. Мұның негізгі себебі — аталған аймақтардың жүк көліктері, жеңіл автокөліктер және автобустар тығыз жүретін халықаралық маңызы бар автомагистральға жақын орналасуы, өйткені бұл көлік құралдары атмосфераға айтарлықтай мөлшерде ілінген бөлшектерді шығарады. Атмосфералық ауа массалары панельдер орналасқан аймақтан алыстаған сайын TSP концентрациясын таратып, оның сұйылу және дисперсиялану әсерін (dispersion and dilution effect) күшейтеді. Алынған нәтижелер зерттеу аймағының дұрыс таңдалғанын және жүргізілген өлшеулердің ғылыми тұрғыдан негізді екенін растайды.



3-сурет. Сынақ жүргізілген аймақтағы ауа құрамындағы ілінген бөлшектер концентрациясының өлшенген көрсеткіштері

3.2 Шаң құрамының сипаттамалары

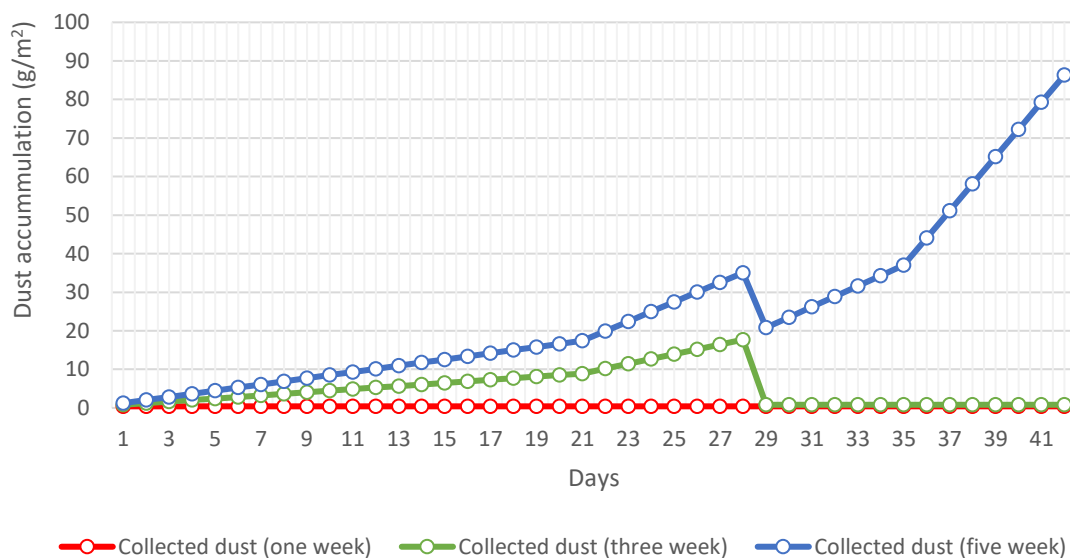
4-суретте зерттелген PV панельдерінің бетінде шаңның шоғырлану қарқындылығы бейнеленген. Күн сайын тазартылып отырған №1 панельде ластанудың жиналу деңгейі төмен болып тіркелді. Ал күйе бөлшектерінің (soot particles) жинақталу жылдамдығы панельдер тазаланбай, табиғи атмосфералық әсерге ұшырау мерзімі артқан сайын біртіндеп өсе түскені байқалды және №3 панельде 42 тәуліктік экспозициядан кейін ең жоғары көрсеткішке жеткені анықталды.

Ш. Есенов университеті маңындағы өлшеу аймағында аталған көрсеткіштер салыстырмалы түрде төмен деңгейде тіркелді: 3-аптада – 8,5 г/м², 4-аптада – 17,3 г/м², 5-аптада – 36,2 г/м² және 6-аптада – 85,5 г/м² (4(b)-сурет деректері бойынша).

4 - суретінің салыстырмалы талдауы Ш. Есенов университеті аумағындағы панельдер тазаланғаннан кейін де шаңның қайта жиналу жылдамдығының жоғары болатынын көрсетеді.

Күйе басым шаң қабаты (soot-dominant dust layer) дәстүрлі, яғни конвенциялық тазалау тәсілдерімен оңай жойылмайды және панель бетінде жабысқақ адгезиялық қабат түзіп, кейінгі шаң бөлшектерінің тез әрі тығыз түрде қайта шөгуіне жағдай жасайды. Осыған байланысты, МАЭК аумағындағы панель беттерін ластанудан тазарту анағұрлым күрделі болып табылады, ал шаң қайтадан жиналған кезде оның жинақталу жылдамдығы да айтарлықтай жоғары деңгейде байқалады.

At Yessenov University area



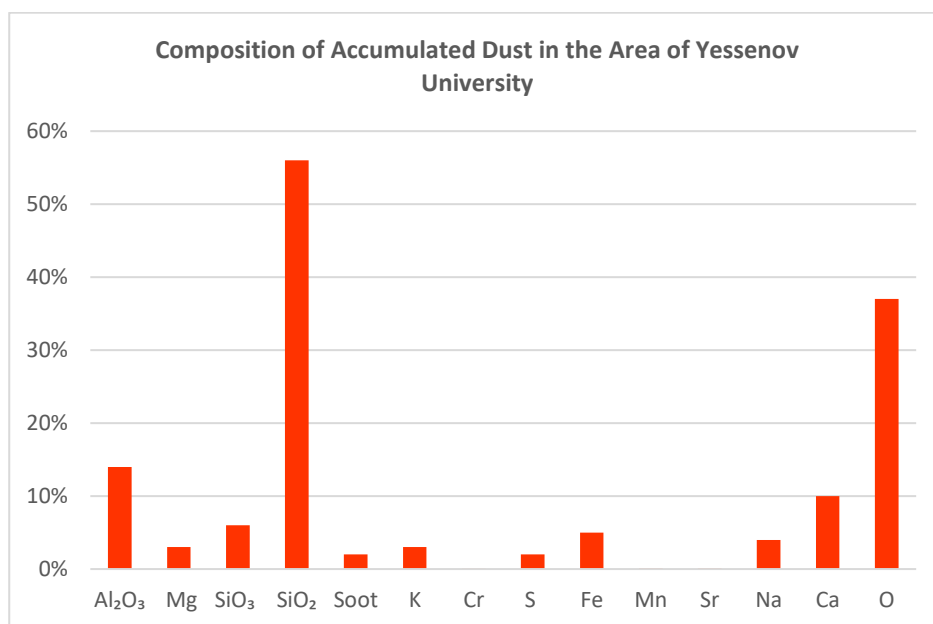
4 – сурет. Сынақтан өткен PV панельдеріндегі шаң жинақталу қарқынының өлшенген көрсеткіштері

5-суреттерінде Ақтау қаласының аймағында орналасқан №3 PV панельдерінің бетінде 6 апта бойы тазартусыз, табиғи ауа райы жағдайында жиналған шаңның элементтік құрамын талдау нәтижелері көрсетілген. Зерттеу жүргізілген аймақ: Есенов университеті аумағы.

Есенов университеті аумағында жиналған шаңның құрамы. Мұнда да негізгі компонент SiO_2 (56%), бұл табиғи шаңның басымдығын дәлелдейді. Күйе мөлшері 2%, ал Cr, Mn және Sr элементтері анықталмаған, бұл аймақта ауыр өнеркәсіп көздерінің жоқтығын көрсетеді. Сонымен қатар, шаң құрамында Al_2O_3 (14%), Ca (10%), Fe (5%) және Na (4%) мөлшерде кездесіп, олардың негізгі көзі құрылыс тозаңы мен қалалық орта факторлары екені байқалады.

Университет аумағында шаңның басым бөлігі табиғи және құрылыс тектес минералдық сипатқа ие. Бұл айырмашылықтар күн фотоэлектрлік панельдерінің оптикалық қасиеттеріне, бет температурасына және электрлік тиімділігіне тікелей әсер етуі мүмкін, сондықтан Ақтау қаласы жағдайында PV жүйелеріне арналған тазалау режимін аймақтық ерекшелікке сай ұйымдастыру қажеттігін көрсетеді.

Күйе (soot) құрамындағы өте ұсақ дисперсті бөлшектердің (PM1.0 және PM2.5), сондай-ақ күкірт қосылыстарының ұзақ мерзімді әсері тірі организмдер үшін, әсіресе балалар ағзасы үшін аса қауіпті болып саналады. Мұндай ластаушы факторлар тыныс алу жүйесінің созылмалы зақымдануына, бронхиалдық демікпенің дамуына, аллергиялық сезімталдықтың күшеюіне және уытты (интоксикациялық) әсерлердің пайда болуына әкелуі мүмкін. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, қарастырылып отырған аймақта PV панельдерінің шаңмен ұзақ уақыт ластануы энергетикалық өнімділіктің төмендеуіне ғана емес, сонымен қатар санитарлық-гигиеналық және экологиялық қауіпсіздік көрсеткіштеріне де тікелей ықпал етеді.



5 – сурет. №3 панельдегі жиналған шаң құрамының талдауы

3.3 Электрлік өнімділік көрсеткіші

3.3.1 Сағаттық шығу қуатын өлшеу

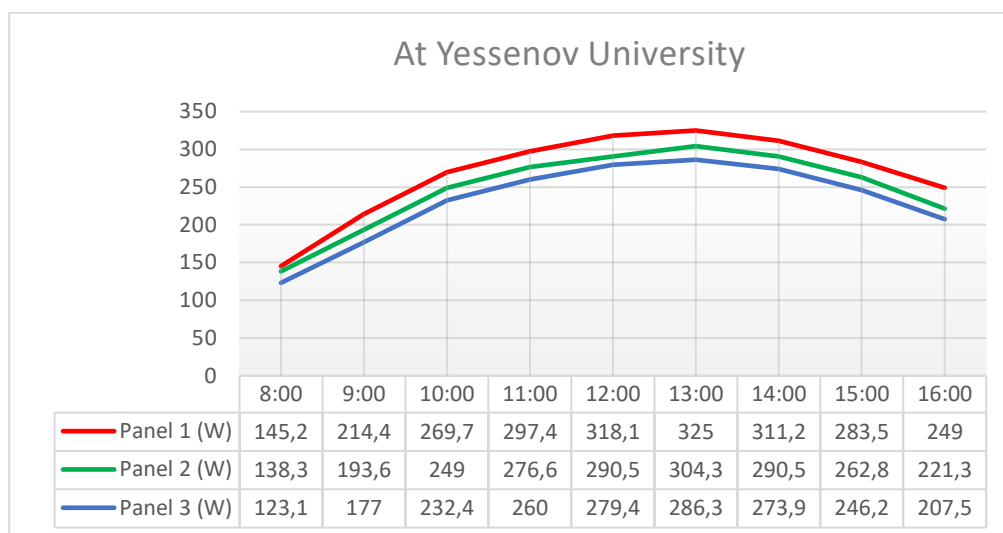
Сағаттық орташа шығыс қуатын өлшеу нәтижелері 6-суретте келтірілген. Нәтижелер панельдер тазартылған жағдайда өндірілетін электр энергиясының мөлшері ластану кезінде айтарлықтай төмендейтінін көрсетті. Тазартылған панельдермен салыстырғанда, шаң қабатымен жабылған панельдердің қуат өндіру деңгейі шамамен 21,95%-ға азайып, орташа айырмашылық 45,65 W-ты құрады (6-сурет). Сонымен қатар, кейбір өлшеу жағдайларында тазартылған панельдерге қатысты ластанған панельдер арасындағы орташа айырмашылық 37,1 W болып, өнімділіктің төмендеуі 17% деңгейінде тіркелді.

Көрсетілген нәтижелерге сәйкес, күйе бөлшектері PV модульдерінің жұмыс тиімділігіне елеулі әсер етіп, олардың энергетикалық өнімділігін төмендетеді. Шаң мен күйенің біріккен қоспасы қара түсті жұқа қабат түзіп, тікелей және шашыраңқы күн сәулесін сіңіру арқылы жарық ағынының фотоэлектрлік элемент бетіне жетуін шектейді. Шаң концентрациясының артуы уақыт өте келе қуат өндірудің төмендеу үдерісін күшейтеді. Қуаттың азаюына қосымша ықпал ететін факторлардың бірі — PV модульдерінің жұмыс температурасының жоғарылауы, ал бұл өз кезегінде шаңның панель бетінде одан әрі жиналуына жағдай жасайды.

Алынған нәтижелер бойынша, тазартылған №1 панельмен салыстырғанда басқа панельдердегі өнімділіктің төмендеу қарқыны төмендегідей сипатталады:

- №2 – 7,7 %
- №3 – 13,5 %

Қуаттың төмендеу шамасының азаюы модуль бетінде жинақталған шаң мен күйе бөлшектерінің концентрациясының салыстырмалы түрде төмен болуымен түсіндіріледі.



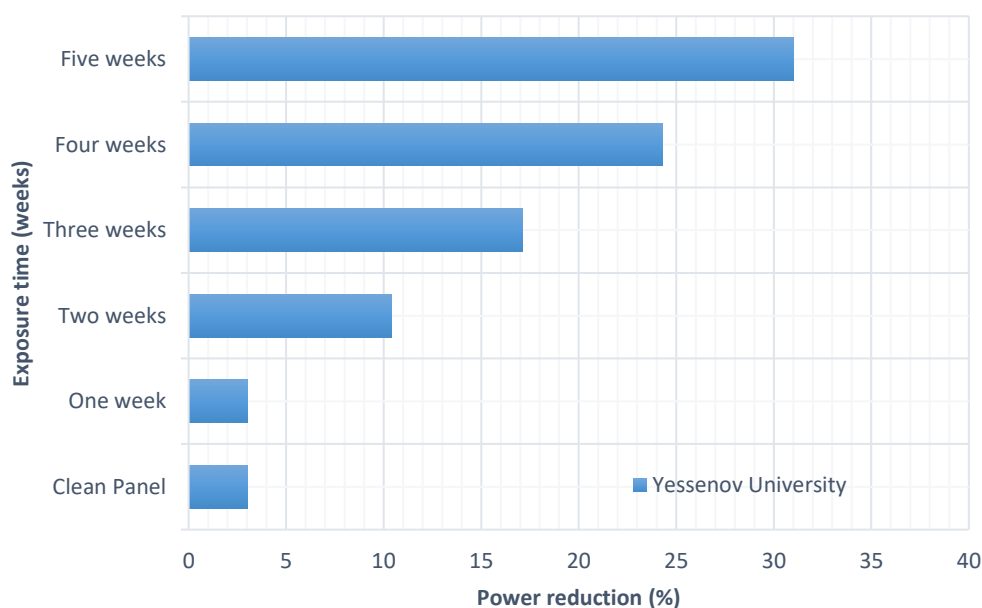
6– сурет. Сынақтан өткен PV панельдерінің сағаттық шығу қуаты

3.3.2 Қуат төмендеу қарқыны

Эксперименттік жағдайда өлшенген электр қуатының мәндері таза (стандартты) PV панельдерінің номинал көрсеткіштерімен салыстырылды. 7-сурет деректеріне сәйкес, панельдердің нақты қуат өндіру деңгейі стандартты мәндерге толық жете алмады, бұл метеорологиялық факторлардың әсерінен электр энергиясын өндіру шамамен 3%-ға төмендеуімен түсіндіріледі.

Ш. Есенов университеті орналасқан аймақта PV панельдерінің өнімділігі стандартты пиктік мәндермен салыстырғанда 26,6% және 31% төмендеу деңгейін көрсетті.

Қуат көрсеткіштерінің төмендеуін өтеу және бастапқы деңгейге жақындату үшін панельдерді жүйелі түрде тазалап отыру қажет. Әсіресе күйе мен күл бөлшектерінің үлесі жоғары ортада тазалау аралықтары қысқа болуы тиіс, себебі шаңның жоғары адгезиялық қасиеттері панель бетінде ластанудың тез жиналуына және өнімділіктің жылдам құлдырауына алып келеді.

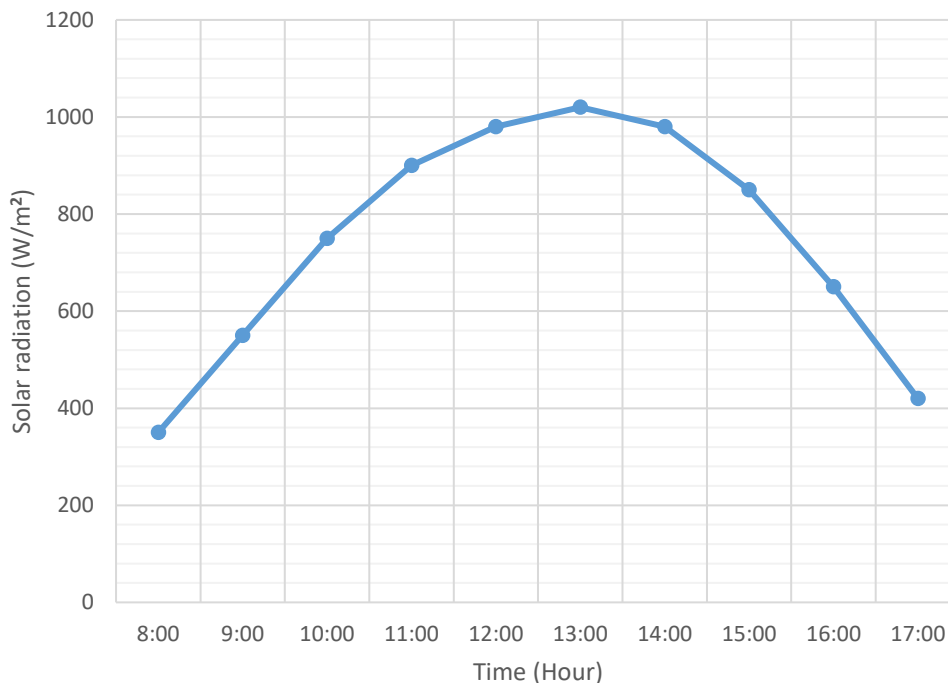


7– сурет. Зерттелген PV панельдерінің қуат төмендеу қарқыны

3.4 Жылулық өнімділік көрсеткіші

3.4.1 Сағаттық күн радиациясының өзгерісі

8-суретте күндізгі уақыт аралығында күн сәулесінің жарықтандыру қарқындылығының өзгеру динамикасы көрсетілген. График деректеріне сәйкес, күн радиациясының деңгейі уақыттың өтуімен біртіндеп өсіп, түске таяу кезеңде ең жоғары мәніне жетеді, ал одан кейін төмендеу үрдісі байқалады.



8 - сурет. Күндізгі сағаттар бойынша күн радиациясының өзгерісі

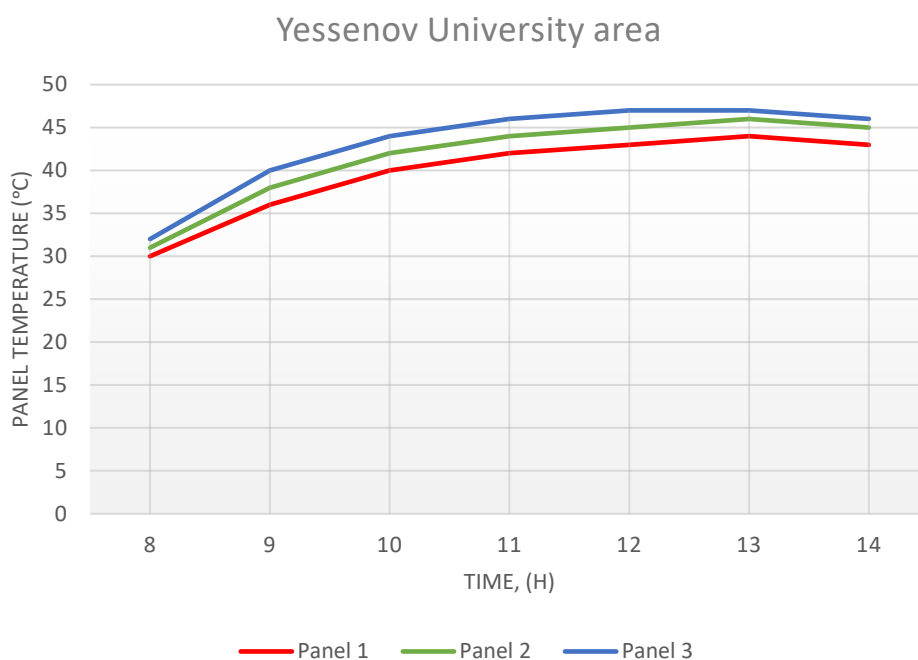
3.4.2 Сағаттық PV жылулық өзгеріс (Hourly PV thermal behavior)

PV панельдердің жылулық өнімділігіне байланысты жіктелуі 9-суретте көрсетілген, мұнда таза панельдер мен шаңмен ластанған панельдердің температуралық айырмашылықтары салыстырылды. Шаң концентрациясы төмен жағдайларда панель бетінің температурасы салыстырмалы түрде төмен болып сақталады. Ал панельдің алдыңғы бетіне шаңның көп мөлшерде жиналуы PV модуль температурасының айтарлықтай жоғарылауына әкеледі. Шаңның жинақталу көлемі мен панель температурасының артуы арасында тікелей пропорционал тәуелділік байқалды.

Сонымен қатар, шаң құрамындағы күйе үлесі артқан сайын (әсіресе өнеркәсіптік және айналым аймақтарында) панель температурасының көтерілуі күшейе түседі, және бұл әсер шаңның жинақталу деңгейі ұлғайған сайын айқындала түседі. Орташа температура өсімі шаңның жиналу қарқындылығына байланысты 0,68 °C пен 3 °C аралығында бағаланды.

Осыған байланысты, PV панель беті шаңмен және ластаушы бөлшектермен қапталған жағдайда, түскен күн радиациясы панель бетінде көбірек сіңіріліп, жылу өткізгіштік механизмі арқылы модульдің ішкі қабаттарына беріледі, нәтижесінде жұмыс температурасы жоғарылайды. Әсіресе шаң құрамында күйе мөлшері көп болған сайын күн сәулесінің жұтылуы артып, PV панель бетінің температурасы одан әрі көтеріледі.

III. Есенов университеті аймағы жағдайында, панельдердің орташа температура өсуі №1 панельге салыстырғанда сәйкесінше: 4.8% және 8.5% болды.



9– сурет. Күндізгі сағаттардағы PV панельдердің жылулық өзгерісі

PV панельдер бетінде жиналған шаң мен кірді кетіру үшін панельдерді жүйелі түрде тазалау маңызды болып табылады. Шаңсыз немесе күйесі төмен панельдерді тазалау аралығы ұзақ болса, күйесі көп шаңмен ластанған модульдерді (зерттеу жағдайында көрсетілгендей) жиі тазалау қажет.

Әдебиеттерге сәйкес [20,21] зерттеулері көрсеткендей, күйесі және күлдің мөлшері жоғары шаңды су, матамен немесе қылшақпен тазалау ұсынылмайды. Мұндай жағдайда тиімді әдіс ретінде спирт немесе натрий ерітіндісін пайдалану ұсынылады, әсіресе натрий ерітіндісінің жоғары тиімділігі тәжірибе арқылы дәлелденген.

Тазалау барысында қолданылатын химиялық заттар күн панелінің беткі қабатына кері әсерін тигізуі мүмкін. Осыған байланысты панельдің құрылымдық және оптикалық қасиеттерін сақтап қалу үшін [22,23] дереккөзде сипатталған қауіпсіз тазалау тәсілдерін пайдалану қажет.

4. Қорытынды

Күйе үлесі жоғары шаңмен ластанған PV панельдер зерттелді, бұл ретте шаң құрамындағы күйе бөлшектерінің әсеріне ерекше назар аударылды. Электр станциясы мен мұнай өңдеу кешендерінде қазба отындардың жануы нәтижесінде Ақтау қаласының атмосферасында күйе бөлшектері айтарлықтай мөлшерде жинақталатыны белгілі.

Эксперименттік зерттеулер жүргізілген орын: Ш. Есенов атындағы Каспий мемлекеттік технологиялар және инжиниринг университетінің аумағы.

Эксперименттер 2025 жылдың 1 қыркүйегінде басталып, алты апта бойы жүргізілді. Зерттеу барысында шаңның жинақталу деңгейі, бөлшектердің морфологиясы мен құрамы, сондай-ақ олардың PV панельдердің қуат өндіру көрсеткіштеріне әсері бағаланды. Панель бетінде шаң мен ластың біркелкі жиналмауы күн сәулесінің таралуын бұзып, температураның локалды түрде жоғарылауына және ыстық нүктелердің (hot spots) түзілуіне алып келді. Әсіресе, PV элементінің жоғарғы бетінде күйе жиналған жағдайда панель температурасының едәуір артатыны анықталды.

Эксперименттік өлшеулер нәтижесінде TSP концентрациясы Ш. Есенов университеті аумағында бұл көрсеткіштер 26,6% және 31% деңгейінде болды.

III. Есенов университеті аумағында шаңның жинақталу деңгейі төменірек болып, сәйкесінше 8,5; 17,3; 36,2 және 85,5 г/м² мәндерін көрсетті. Бұл Ақтау өңірінде жиі байқалатын шаңды дауылдармен тікелей байланысты.

PV панельдердің жоғары энергетикалық тиімділігін сақтау үшін оларды жүйелі түрде тазалау қажет, сондықтан интеллектуалды (ақылды) тазалау технологияларын енгізу өзекті болып табылады. Зерттелген аймақта шаң құрамындағы күйе мөлшерін жыл бойы тұрақты бақылау және шаң жинақталу деңгейін жыл сайын бағалау тиімді тазалау әдісін таңдауға әрі тазалау аралығын оңтайландыруға мүмкіндік береді.

REFERENCES

1. *Solar water heating systems and air-heater technologies for sustainable buildings*. (2022). Book chapter / textbook.
2. *Economic models for direct solar energy investment and electricity generation*. (2023). Book / учебное пособие.
3. *Dust impact on solar PV performance: A critical review of optimal cleaning techniques for yield enhancement across varied environmental conditions*. (2024). Review article.
4. *Thermal and electrical performance of the PV panels in the presence of soot particles and dust: An experimental study*. (2025). Research article.
5. Javed, W., et al. (2023). *Performance evaluation of solar panels under different dust accumulation conditions using thermography*. *Environmental Science and Pollution Research*.
6. Alam, M. K., et al. (2025). *Evaluating and mitigating the effects of dust accumulation on photovoltaic panel performance*.
7. Hasan, M., et al. (2025). *Integration of PV/T systems for improving photovoltaic panel performance under thermal stress conditions*. *Renewable Energy Engineering Journal*.
8. Rusănescu, C. O., Rusănescu, M., Istrate, I. A., Constantin, G. A., & Begea, M. (2023). *Effect of dust deposition on the performance of photovoltaic panels*. *Energies*, 16(19), 6794.
9. Comprehensive Review of Dust Properties and Their Influence on Photovoltaic Systems (2023)
10. Experimental analysis on the impacts of soil deposition and bird droppings on the thermal performance of photovoltaic panels (2023)
11. Al-Shehri, A., et al. (2023). *Impact of air-borne particulate matter on solar irradiance transmission and power output of PV cells*. *Energy Reports*.
12. Soiling in solar PV systems: long-term consequences and mitigation strategies (2025)
13. Al Garni, H. Z. (2022). *The Impact of Soiling on PV Module Performance in Saudi Arabia*. *Energies*, 15(21), 8033. <https://doi.org/10.3390/en15218033>
14. Shaik, S., Vigneshwaran, P., Roy, A., Kontoleon, K. J., Mazzeo, D., Cuce, E., Saleel, C. A., Alwetaishi, M., Khan, S. A., Gürel, A. E., & Ağbulut, Ü. (2023). *Experimental analysis on the impacts of soil deposition and bird droppings on the thermal performance of photovoltaic panels*. *Case Studies in Thermal Engineering*, 48, 103128. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103128>
15. Mustafa, R. J., Gomaa, M. R., Al-Dhaifallah, M., & Rezk, H. (2020). *Environmental impacts on the performance of solar photovoltaic systems*. *Sustainability*, 12(2), 608. <https://doi.org/10.3390/su12020608>
16. Abderrezek, M., et al. (2019). *Impact of dust ingredient on photovoltaic performance: An experimental study*. *Solar Energy*, 195, 651–659. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.12.008>
17. *Climate and Average Weather in Aktau*. (n.d.). Weatherspark. Retrieved 2025.
18. Elminshawy, N. A. S., Mohamed, A. M. I., & Abdel-Aziz, A. S. (2023). *Effect of dust accumulation on performance of photovoltaic modules in different climates*. *Heliyon*, 9(5), e15023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15023>
19. Ghenai, C., Merabet, A., Salameh, T., & Al-Hammadi, F. (2024). *Dust impact on electrical and thermal photovoltaic performance: Field and laboratory experiments*. *Energy Reports*, 10, 1234–1246. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.01.064>

20. Najmi, N., & Rachid, A. (2023). *A review on solar panel cleaning systems and techniques*. Energies, 16(24), 7960. <https://doi.org/10.3390/en16247960>
21. (Author Unspecified). (2024). *Cleaning Methodology of Solar Panels: Present Technology, Pros* International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering. <https://doi.org/10.17148/IJIREEICE.2024.12106>
22. Al-Shamani, A. N., Alghoul, M. A., Elbreki, A. M., Ammar, A. A., Abed, A. M., & Sopian, K. Effects of coating materials on the performance and cleaning of photovoltaic solar panels. Coatings, 2021, 11(5), 544. <https://doi.org/10.3390/coatings11050544>
23. Гайибов Т.Ш., Реймов К.М., Умаров Б.С., Садуақасов Д.С. Электр тұтынушылардың жүктемесін басқару арқылы энергожүйелердің қысқа мерзімді жұмыс режимдерін оңтайлы жоспарлауда желілік факторды ескеру // *Yessenov Science Journal*. – 2024. – №5. – 52–59 б. – URL: <https://journal.yu.edu.kz/index.php/yu/article/view/124>

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПЫЛИ И САЖИ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Б.С. Умаров¹, Ш.М. Есемуратова²

¹ Университет Есенова, Актау, Казахстан

² Каракалпакский государственный университет им. Бердаха, Нукус, Узбекистан
e-mail: baigazy.umarov@yu.edu.kz, e_shiyurin@karsu.uz

Аннотация. В данной статье представлены результаты экспериментального исследования влияния пыли и сажи на тепловые и электрические характеристики фотоэлектрических (PV) панелей в климатических условиях города Актау. Целью исследования является комплексная оценка воздействия атмосферных загрязнений на эффективность работы солнечных модулей. Экспериментальные исследования проводились на базе Каспийского университета технологий и инжиниринга имени Ш. Есенова. Для анализа были использованы три фотоэлектрические панели, установленные под углом 35° и ориентированные на юг. В ходе эксперимента одна панель регулярно очищалась, тогда как две другие подвергались естественному загрязнению в течение четырех и шести недель соответственно. Параметры работы панелей оценивались на основе измерений солнечной радиации, температуры, электрического тока, напряжения и выходной мощности. Дополнительно была определена масса накопившейся пыли и проведён анализ её химического состава с использованием методов рентгеновской дифракции и рентгеновской флуоресценции. Полученные результаты показали, что накопление пыли и сажи на поверхности панелей существенно снижает их энергетическую эффективность. Сравнение с очищенной панелью показало снижение выходной мощности до 21,9%, а также повышение рабочей температуры модулей. Наличие сажи способствует образованию «горячих точек» и ухудшает теплообменные процессы. Установлено, что регулярная очистка панелей позволяет значительно повысить эффективность работы фотоэлектрических систем. Полученные результаты могут быть использованы при разработке оптимальных режимов обслуживания солнечных энергетических установок в условиях пыльного и промышленного климата.

Ключевые слова: Фотоэлектрические панели (PV), пыль, сажа, атмосферное загрязнение, плотность загрязнения, солнечная радиация, горячие точки (hot spots), выработка электроэнергии, снижение эффективности, метеорологические факторы.

CHANGES IN THE THERMAL AND ELECTRICAL PERFORMANCE OF PHOTOVOLTAIC PANELS UNDER THE INFLUENCE OF DUST AND SOOT: AN EXPERIMENTAL STUDY

B.S. Umarov¹, Sh.M. Yesemuratova²

¹Yessenov University, Aktau, Kazakhstan

²Karakalpak State University named after Berdakh, Nukus, Uzbekistan

e-mail: baigazy.umarov@yu.edu.kz, e_shiyryn@karsu.uz

Abstract. This paper presents the results of an experimental study on the influence of dust and soot accumulation on the thermal and electrical performance of photovoltaic (PV) panels under the climatic conditions of Aktau, Kazakhstan. The main objective of the research is to evaluate the impact of atmospheric pollution on the operational efficiency of solar energy systems. The experimental investigation was carried out at the research facility of Sh. Yessenov Caspian University of Technology and Engineering. Three photovoltaic panels were installed facing south with a tilt angle of 35°. During the experiment, one panel was cleaned daily and used as a reference, while the other two panels were exposed to natural environmental conditions for four and six weeks respectively. The performance of the PV modules was evaluated by measuring solar radiation intensity, temperature, electrical current, voltage, and output power. In addition, the mass of accumulated dust was determined, and its chemical composition was analyzed using X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence (XRF) techniques. The results demonstrate that dust and soot deposition significantly reduces the energy performance of photovoltaic panels. Compared with the clean reference panel, the output power of contaminated panels decreased by up to 21.9%, while the module temperature increased. The presence of soot particles promotes the formation of localized “hot spots,” which negatively affects the thermal behavior and electrical efficiency of the PV modules. The study confirms that regular cleaning and proper maintenance of photovoltaic panels are essential for maintaining high performance, especially in regions characterized by dusty environments and industrial emissions.

Keywords: Photovoltaic panels (PV), dust, soot, atmospheric pollution, contamination density, solar radiation, hot spots, electricity generation, efficiency reduction, meteorological factors.