

**ՍԱՐՔԱՇԻՆՈՒԹՅՈՒՆ, ՉԱՓԱԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆ ԵՎ
ԻՆՖՈՐՄԱՑԻՈՆ ՉԱՓԻՉ ՍԱՐՔԵՐ**

ՀՏԴ 621.382

Ն.Կ. ԲԱԴԱԼՅԱՆ

**ՀԱՊՀ ՏԱՐԱԾՔՈՒՄ ՓՈՇՈՒ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ ԱՐԵՎԱՅԻՆ
ՖՈՏՈՎՈԼՏԱՅԻՆ ՄՈԴՈՒԼՆԵՐԻ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ**

Ուսումնասիրվել է ՀԱՊՀ տարածքում փոշու ազդեցությունը արևային ֆոտովոլտային (ՖՎ) մոդուլների արդյունավետության վրա: Իրականացվել են փորձարարական չափումներ մեկ տարվա ընթացքում՝ համեմատելով մաքրված և չմաքրված մոդուլների էլեկտրական բնութագրերը: ՖՎ մոդուլի մակերևույթի կանոնավոր մաքրումը կատարվել է մշակված ավտոմատացված մաքրման համակարգի միջոցով:

Առանցքային բառեր. ֆոտովոլտային, արևային, արդյունավետություն, փոշու ազդեցություն, մաքրման համակարգ:

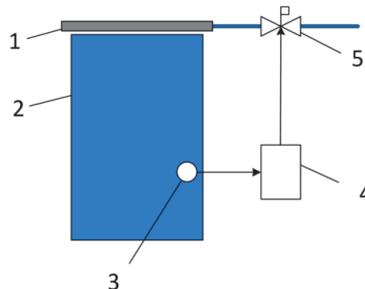
Ներածություն: Վերականգնվող էներգիայի աղբյուրների կիրառումը կարևոր նշանակություն ունի կլիմայական փոփոխությունների զսպման, հանածո վառելիքի սահմանափակ պաշարներից կախվածության նվազեցման և էներգետիկ անկախության հասնելու համար: Արևային էներգիան այս ոլորտում զբաղեցնում է առաջատար դիրքեր՝ ապահովելով վերականգնվող էներգիայի համաշխարհային արտադրական հզորության զգալի մասը՝ մոտավորապես 60%-ը [1]:

Արևային էներգետիկայում ամենամեծ կիրառություն ունեն ֆոտովոլտային (ՖՎ) մոդուլները, որոնք ապահովում են լույսի փոխակերպումը էլեկտրաէներգիայի: ՖՎ համակարգերի արդյունավետությունը կախված է բազմաթիվ գործոններից, որոնց թվում կարևոր դեր ունի շրջակա միջավայրի ազդեցությունը: Այդ գործոններից է հատկապես ՖՎ մոդուլի մակերևույթին փոշու նստվածքը, որը կարող է հանգեցնել արտադրողական զգալի կորուստների [2]: Աղտոտման ազդեցությունը ՖՎ համակարգերի էլեկտրական բնութագրերի վրա բացասական էֆեկտ ունի: Փոշու ու կեղտի առկայության հետևանքով առաջացած կորուստները տարբերվում են ըստ տարածաշրջանների՝ մինչև 30% չոր գոտիներում, 5–15% քաղաքային միջավայրում և 2–5% բարեխառն շրջաններում խոնավ սեզոններին [3]: Փոշու մանր մասնիկների (<10 մկմ) նստվածքը հաճախ ամուր կպչում է մոդուլի մակերևույթին՝ ձևավորելով շերտ, որը նվազեցնում է լույսի թափանցումը, և անգամ բնական տարրերը, ինչպիսիք են քամին կամ անձրևը, չեն կարող հեշտությամբ հեռացնել այն [4]:

Փոշու ազդեցությունը գնահատելու համար կիրառվում են տարբեր մեթոդներ, որոնք ներառում են լաբորատոր փորձարկումներ, աղտոտվածության չափման տվիչներ և արբայնակային տվյալների վերլուծություն: Այդ մեթոդները հնարավորություն են տալիս՝ գնահատելու աղտոտման ինտենսիվությունը ու դրա պատճառած կորուստները և մշակել լուծումներ՝ մաքրման տեխնոլոգիաների կիրառմամբ [2, 5, 6]:

Աշխատանքում ուսումնասիրվել է փոշու ազդեցության գնահատումը ՖՎ մոդուլների արդյունավետության վրա՝ մեկ տարվա ընթացքում: Փորձերն իրականացվել են Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի (ՀԱՊՀ) «Կիսահաղորդչային ֆոտոէլեկտրական սարքեր» գիտահետազոտական լաբորատորիայի տարածքում՝ բացօթյա պայմաններում: Հետազոտվել են երկու նույնական ՖՎ մոդուլներ. մեկը կանոնավոր կերպով մաքրվել է, մյուսը՝ ոչ: Մոդուլը մաքրելու համար մշակվել և օգտագործվել է ՖՎ մոդուլների մաքրման նոր ավտոմատացված համակարգ:

Ֆոտովոլտային մոդուլների մաքրման համակարգ: ՖՎ մոդուլների արդյունավետության վրա փոշու նստվածքի բացասական ազդեցությունը նվազեցնելու նպատակով մշակվել է նոր ավտոմատացված մաքրման համակարգ (նկ. 1):



Նկ. 1. ՖՎ մոդուլների մաքրման համակարգի կառուցվածքը. 1 – ջրի խողովակ, 2 - արևային ՖՎ մոդուլ, 3 - փոշու փոխիչ, 4 - էլեկտրոնային կառավարման միավոր, 5 - էլեկտրամագնիսական փական

Համակարգի հիմնական բաղադրիչներն են միկրոանցքերով ջրի խողովակը (1), որը տեղադրված է արևային ՖՎ մոդուլի (2) վերին հատվածում, փոշու տվիչը (3), էլեկտրոնային կառավարման հանգույցը (4) և էլեկտրամագնիսական փականը (5): Մաքրման գործընթացը կատարվում է ավտոմատ կերպով՝ ելնելով փոշու առկայության տվիչից ստացված տվյալներից: Երբ փոշու մակարդակը հասնում է նախապես սահմանված շեմին, կառավարման հանգույցը բացում է էլեկտրամագնիսական փականը՝ ապահովելով ջրի հոսքը, որը հավասարաչափ մաքրում է մոդուլի մակերեսը [7]:

Օպերատորը կարող է կարգավորել փոշու նվազագույն շեմը, որից հետո մաքրման համակարգը կգործի: Մաքրման համակարգը կարող է նաև ցանկացած պահի միացնել կամ անջատել օպերատորը հեռակառավարման վահանակի միջոցով:

Մշակված մաքրման համակարգի առանցքային առավելություններն են.

1. Արևային ՖՎ մոդուլների ստվերումից խուսափումը. մաքրման համակարգը մշակված է այնպես, որ շահագործման ընթացքում այն չի ստվերում մոդուլները, ինչը էական նշանակություն ունի արտադրողականության տեսանկյունից:

2. Ջրի խնայողություն. միկրոանցքերով խողովակի կիրառումը նվազեցնում է ջրի սպառումը:

3. Տնտեսական շահավետություն. համակարգը թույլ է տալիս փոքր ներդրումներով զգալիորեն բարձրացնել ՖՎ մոդուլների արդյունավետությունը:

Չափման մեթոդի նկարագիրը: Արևային ՖՎ մոդուլների աշխատանքի վրա փոշու ազդեցության փորձարարական ուսումնասիրությունն իրականացվել է միջազգային IEC-61724-1 ստանդարտի պահանջներին համապատասխան: Փորձարկման ընթացքում օգտագործվել են երկու նույնական ՖՎ մոդուլներ, որոնցից մեկը պարբերաբար մաքրվել է՝ նախքան չափում կատարելը: Կատարվել են ՖՎ մոդուլների կարճ միացման հոսանքների (I_{sc}), հզորությունների (P_m) և արդյունավետության (η) չափումներ:

Փորձերը կատարվել են բացօթյա պայմաններում՝ Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում (Երևան): Փորձարկվող մոդուլները (275 Վտ առավելագույն հզորությամբ) պատրաստված են 60 բազմաբյուրեղային արևային բջիջներից և արտադրված են Հայաստանում:

Մոդուլները տեղադրվել են կողք կողքի՝ շրջակա միջավայրի ազդեցության հավասար պայմաններ ապահովելու նպատակով: Մոդուլները թեքված են 30°-ով, ինչը օպտիմալ է համարվում Երևանի դիրքի համար (նկ. 2): Մոդուլներից մեկը (ձախից) մաքրվել է մշակված ավտոմատ մաքրման համակարգի միջոցով, իսկ մյուս մոդուլը (աջից) ընդհանրապես չի մաքրվել:



Նկ. 2. Փոշու ազդեցության գնահատման համակարգը. 1 - փորձարկվող ՖՎ մոդուլներ, 2 - ավտոմատացված մաքրման համակարգ, 3 - Seaward PV200 չափիչ համակարգ (Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան)

Արևային ՖՎ մոդուլների աշխատանքի վրա փոշու և կեղտի ազդեցությունը քանակապես արտահայտելու համար կատարվել են աղտոտման հարաբերակցության (SR) հաշվարկներ: SR-ն արտահայտում է աղտոտված մոդուլի փաստացի ելքային հզորության հարաբերակցությունը մաքուր լինելու դեպքում ակնկալվող հզորությանը.

$$SR = \frac{\text{Փաստացի ելքային հզորություն}}{\text{Մաքուր լինելու դեպքում ակնկալվող հզորություն}} : \quad (1)$$

Մաքրված և չմաքրված ՖՎ մոդուլների կարճ միացման հոսանքները (I_{sc}), ելքային հզորությունները (P_m) և արդյունավետությունը (η) չափելով՝ աղտոտման հարաբերակցությունը կարող է որոշվել հետևյալ կերպ.

$$SR(I_{sc}) = \frac{I_{sc} \text{ չմաքրված}}{I_{sc} \text{ մաքրված}} , \quad (2)$$

$$SR(P_m) = \frac{P_m \text{ չմաքրված}}{P_m \text{ մաքրված}} , \quad (3)$$

$$SR(\eta) = \frac{\eta \text{ չմաքրված}}{\eta \text{ մաքրված}} : \quad (4)$$

ՖՎ մոդուլի արդյունավետությունը որոշվել է առավելագույն հզորության՝ P_m (Վտ) և արևի ճառագայթման՝ P_{sun} (Վտ/մ²) հարաբերակցությամբ.

$$\eta = \frac{P_m}{S * P_{sun}} = \frac{I_m * V_m}{S * P_{sun}} , \quad (5)$$

որտեղ S -ը մոդուլի մակերեսն է (մ²), I_m -ը՝ առավելագույն հոսանքը (Ա), V_m -ը՝ առավելագույն լարումը (Վ):

Փոշու հետևանքով ՖՎ մոդուլների I_{sc} , P_m և η կորուստները հաշվարկվել են հետևյալ բանաձևով.

$$SL = [1 - SR] * 100 \% : \quad (6)$$

Բոլոր չափումները կատարվել են «Seaward PV200» չափիչ համակարգի միջոցով:

Փորձերը կատարվել են հետևյալ հաջորդականությամբ.

- Ամեն օր ժամը 13:30-ին ՖՎ մոդուլներից մեկը մաքրվել է 10 րոպե:
- Մոտավորապես 15 րոպե անց, երբ մաքրված և չմաքրված մոդուլների ջերմաստիճանները հավասարվել են, գրանցվել են I-V կորի բնութագրերը, ինչպես նաև մոդուլների և շրջակա միջավայրի ջերմաստիճանները և արևային ճառագայթման ինտենսիվությունը:

Հետազոտության արդյունքները: Կատարվել են մաքրված և չմաքրված արևային ՖՎ մոդուլների կարճ միացման հոսանքների (I_{sc}), առավելագույն

հզորությունների (P_m) և արդյունավետության (η) արժեքների չափումներ մեկ տարվա ընթացքում՝ 4 սեզոնների դեպքում:

Հիմնվելով (2), (3), (4) և (5) հավասարումների վրա՝ ստացվում են հետևյալ 3 հավասարումները աղտոտման կորուստների միջին արժեքների դեպքում.

$$SL(I_{sc})_{միջ.} = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - SR(I_{sc}))}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - I_{sc} n.cl / I_{sc} cl)}{n}, \quad (7)$$

$$SL(P_m)_{միջ.} = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - SR(P_m))}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - P_n.cl / Pcl)}{n}, \quad (8)$$

$$SL(\eta)_{միջ.} = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - SR(\eta))}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - \eta n.cl / \eta cl)}{n}, \quad (9)$$

որտեղ n -ը սեզոնի ընթացքում չափումների քանակն է: Միջին արժեքները ներկայացված են աղյուսակում:

Աղյուսակ

Տեղումների, շրջապատի ջերմաստիճանի և աղտոտման կորուստների միջին արժեքները

	Տեղումներ (մմ)	$T_{շրջ. միջ.}$ (°C)	Աղտոտման կորուստներ (%)		
			$SL(I_{sc})_{միջ.}$	$SL(P_m)_{միջ.}$	$SL(\eta)_{միջ.}$
Գարուն	89.4	28.1	4	9	8
Ամառ	90.5	36.8	11	13	13
Աշուն	46.2	24.3	5	13	12
Ձմեռ	29	8.1	4	9	11
Տարեկան միջին	63.7	24.3	6	11	11

ՀԱՊՀ տարածքում կատարված ուսումնասիրությունները ցույց են տվել, որ փոշու կուտակումը զգալիորեն ազդում է արևային ՖՎ մոդուլների արդյունավետության վրա: Կատարված չափումները ցույց են տալիս, որ աղտոտման կորուստները գարնանը և ձմռանը համեմատաբար փոքր են, ինչը պայմանավորված է բնապահպանական գործոններով՝ գարնանային տեղումների բարձր մակարդակով (89.4 մմ) և ձմռան ընթացքում տեղումների հիմնականում ձյան տեսքով լինելու հանգամանքով: Ամռանը աղտոտման կորուստները հասնում են առավելագույնին՝ պայմանավորված բարձր ջերմաստիճաններով ($T_{շրջ. միջ.} = 36.8^\circ\text{C}$), որը նպաստում է օդում փոշու քանակի աճին, ինչպես նաև Մերձավոր Արևելքից եկող տաք օդային հոսանքներով, որոնք մեծացնում են փոշու խտությունը մթնոլորտում:

Համեմատելով կարճ միացման հոսանքի, առավելագույն հզորության և արդյունավետության չափումներով որոշված աղտոտման կորուստները՝ պարզ է դառնում, որ կորուստների տարեկան միջին արժեքները նույնն են և կազմում են 11%: Մինչդեռ կարճ միացման հոսանքի չափումներով որոշված կորուստները

փոքր են (6%)՝ պայմանավորված արևային մոդուլների մակերեսի վրա փոշու անհամասեռ բաշխմամբ: Արդյունքները ցույց են տալիս, որ առավելագույն հզորության և արդյունավետության չափումներով որոշված կորուստները ավելի ճշգրիտ են արտահայտում աղտոտման ազդեցությունը: Նշենք նաև, որ հզորության չափումների կիրառումը նպատակահարմար է, քանի որ առավելագույն հզորությունը ՖՎ մոդուլի հիմնական գործառական պարամետրն է, և այդ չափումները կատարելն ավելի հեշտ է:

Կատարված ուսումնասիրությունը ընդգծում է ֆոտովոլտային համակարգերի շահագործման վրա փոշու ազդեցության մոնիտորինգի կարևորությունը, ինչպես նաև մոդուլների պարբերական մաքրման անհրաժեշտությունը՝ դրանց արդյունավետությունը պահպանելու և արտադրողականությունը բարձրացնելու նպատակով:

Եզրակացություն: ՀԱՊՀ տարածքում իրականացված ուսումնասիրությունները ցույց են տվել, որ չմաքրված ֆոտովոլտային մոդուլների տարեկան միջին աղտոտման կորուստները կազմում են 11%, ինչը վկայում է մաքրման համակարգերի կիրառման անհրաժեշտության մասին:

Փորձարարական ուսումնասիրությունների շրջանակում մշակվել և կիրառվել է նոր ավտոմատացված մաքրման համակարգ, որը հնարավորություն է տվել կանոնավոր կերպով մաքրել մոդուլները՝ միաժամանակ խուսափելով դրանց ստվերումից:

Փոշու ազդեցության գնահատումը և մաքրման արդյունավետ մեթոդների կիրառումը կարևոր նշանակություն ունեն քաղաքային միջավայրում տեղադրված արևային ֆոտովոլտային համակարգերի արտադրողականության բարձրացման և դրանց շահագործման արդյունավետության ապահովման համար:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Hemetsberger W., Schmela M., Duniop S.** SolarPower Europe (2024): Global Market Outlook for Solar Power 2024-2028. - June 2024, ISBN: 9789464669169. https://api.solarpowereurope.org/uploads/Global Market Outlook for Solar Power 2024_a083b6dcd5.pdf
2. **Swanand S.W., Somashekhar G.** Design and Manufacturing 2 Solar Panels Cleaning System // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. - July 2017.- P. 45-98.
3. Techno-Economic Assessment of Soiling Losses and Mitigation Strategies for Solar Power Generation /**K. Ilse, L. Micheli, B.W. Figgis, K. Lange, et al** //Joule.- 2019.- Vol. 3, no. 10.- P. 2303-2321.

4. **Rahman M.** Dust Accumulation on SolarPanels: Composition, Impact, and Mitigation // Energy Reports.- 2022.- Vol. 8.- P. 1091-1099.
5. **Manju B., Abdul B., Pavan C.M.** Automatic Solar Panel Cleaning System // International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering.- July 2018.- Vol. 4, no. 7.- P. 26-31.
6. **Badalyan N.K.** Analysis of Soiling Measurement Systems and Cleaning Methods of Solar Photovoltaic Modules // Proceeding of NPUA: Electrical Engineering, Energetics.- 2024.- Vol. 1.- P. 74-83.
7. **Vardanyan R.R., Badalyan N.K.** The influence of dust and temperature on the efficiency of solar photovoltaic modules // Proceedings of NPUA: Electrical Engineering, Energetics.- 2021.- Vol. 1.- P. 44-52.

Н.К. БАДАЛЯН

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПЫЛИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ НА ТЕРРИТОРИИ НПУА

Изучено влияние пыли на эффективность солнечных фотовольтаических (ФВ) модулей на территории Национального политехнического университета Армении. Экспериментальные измерения проводились в течение года. Проведено сравнение электрических характеристик очищенных и неочищенных модулей. Регулярная очистка поверхности ФВ модуля производилась с помощью разработанной автоматизированной системы очистки.

Ключевые слова: фотовольтаический, солнечный, эффективность, воздействие пыли, система очистки.

N.K. BADALYAN

ASSESSMENT OF DUST EFFECTS ON THE EFFICIENCY OF SOLAR PHOTOVOLTAIC MODULES IN NPUA

The effect of dust on the efficiency of solar photovoltaic (PV) modules in National Polytechnic University of Armenia (NPUA) is considered. Experimental measurements were carried out over a period of one year, comparing the electrical characteristics of cleaned and uncleaned modules. Regular cleaning of the PV module surface was performed using a developed automated cleaning system.

Keywords: photovoltaic, solar, efficiency, dust effect, cleaning system.