

mgr inż. Jan Białasik¹⁾, ORCID: 0000-0003-0919-4115; dr hab. inż. Magdalena Łasecka-Plura¹⁾, ORCID: 0000-0002-5229-9361; dr inż. Michał Demby¹⁾, ORCID: 0000-0002-7505-1422; mgr inż. Alireza Tabrizikahou¹⁾, ORCID: 0000-0002-3161-2224; mgr inż. Damian Głuchy²⁾, ORCID: 0000-0003-2725-2614; dr inż. Dariusz Kurz²⁾, ORCID: 0000-0002-6737-0052; dr inż. Grzegorz Trzmieć²⁾, ORCID: 0000-0002-3622-8889; prof. dr hab. inż. Mieczysław Kuczman^{1)*}, ORCID: 0000-0001-7427-3675

Experimental investigations of bifacial photovoltaic panels subjected to repeated loading

Eksperymentalne badania dwustronnych paneli fotowoltaicznych poddanych powtarzalnemu obciążeniu

DOI: 10.15199/33.2026.01.05

Abstract. The paper presents the results of experimental investigations on bifacial photovoltaic panels with different cell arrangements, subjected to short-term and long-term mechanical loading. The aim was to examine the influence of cell distribution on panel stiffness and the effect of loading on their electrical efficiency. The study demonstrated that the presence of gaps between cells reduces the stiffness of the element, which should be taken into account at the design stage. Despite the occurrence of residual deformations after long-term mechanical loading, no decrease in the electrical efficiency of the modules was observed.

Keywords: repeated loading; bifacial panels; solar panels; experimental investigations; electrical efficiency of photovoltaic panels

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań bifacjalnych paneli fotowoltaicznych z różnym rozmieszczeniem ogniw, poddanych krótkotrwałym i długotrwałym obciążeniom mechanicznym. Celem było zbadanie wpływu rozmieszczenia ogniw na sztywność paneli i wpływu obciążeń na ich sprawność elektryczną. Wykazano, że odstępy między ogniwami zmniejszają sztywność elementu, co należy uwzględnić na etapie projektowania. Pomimo wystąpienia resztkowych odkształceń po długotrwałym obciążeniu mechanicznym, nie stwierdzono spadku sprawności elektrycznej modułów.

Słowa kluczowe: obciążenie powtarzalne; panele dwustronne (bifacjalne); panele słoneczne; badania eksperymentalne; sprawność elektryczna paneli fotowoltaicznych

The history of photovoltaic (PV) panels dates back to 1839, when Alexandre Edmond Becquerel discovered the photovoltaic effect, which involves generating electrical energy as a result of absorbing solar radiation [1]. This discovery laid the foundations for the development of technologies harnessing solar energy. In 1954, the Bell Labs laboratories developed the first practical silicon photovoltaic cell, which initiated the advancement of this technology. In the 1970s, photovoltaic panels were used in space programs, and since the beginning of the 21st century their production has increased rapidly due to falling costs and growing environmental awareness [2].

Currently, renewable energy sources, including solar energy, are gaining increasing importance. However, conventional energy sources still account for approximately 80% of global energy production. The discovery of nuclear energy in the mid-20th century, characterized by higher efficiency than fossil fuels, delayed the transition to renewable sources. Nevertheless, nuclear energy has limitations – it relies on uranium and tho-

Historia paneli fotowoltaicznych (PV) sięga 1839 r., kiedy Alexandre Edmond Becquerel odkrył efekt fotowoltaiczny, polegający na wytwarzaniu energii elektrycznej w wyniku absorpcji promieniowania słonecznego [1]. Odkrycie to stworzyło podstawy do rozwoju technologii wykorzystujących energię słoneczną. W 1954 r. laboratoria Bell Labs opracowały pierwsze praktyczne ogniwo fotowoltaiczne z krzemu, co zapoczątkowało rozwój tej technologii. W latach siedemdziesiątych XX w. panele fotowoltaiczne znalazły zastosowanie w programach kosmicznych, a od początku XXI w. ich produkcja gwałtownie się zwiększyła dzięki spadkowi kosztów i rosnącej świadomości ekologicznej [2].

Obecnie odnawialne źródła energii, w tym energia słoneczna, zyskują coraz większe znaczenie. Konwencjonalne źródła energii wciąż jednak odpowiadają za ok. 80% globalnej produkcji energii. Odkrycie energii jądrowej w połowie XX w., cechującej się większą efektywnością niż paliwa kopalne, opóźniło przejście na źródła odnawialne. Jednak energia jądrowa ma ograniczenia – bazuje na uranie i torze, które są zasobami skończonymi i jest stosowana głównie w dużych systemach energetycznych. Jednocześnie dostrzega się trend mający na celu dywersyfikację produkcji energii elektrycznej, wykorzystując źródła energii odnawialnej [3]. W ciągu ostatnich dwu-

¹⁾ Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu

²⁾ Politechnika Poznańska, Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki

^{*)} Correspondence address: mieczyslaw.kuczman@put.poznan.pl

rium, which are finite resources, and it is used mainly in large-scale power systems. At the same time, a trend is observed toward diversifying electricity generation by using renewable energy sources [3]. Over the last twenty years, energy production from solar panels has increased significantly compared to other energy sources, as shown in Figure 1.

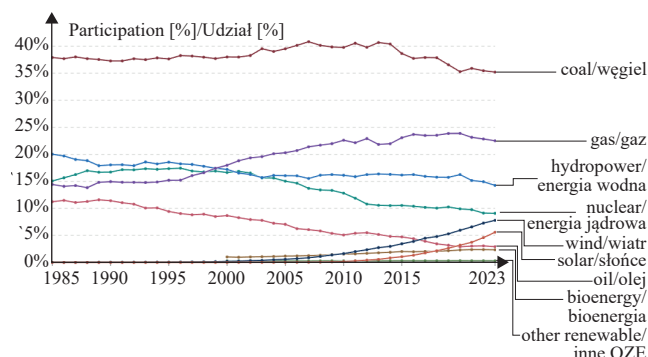


Fig.1. Electricity production share of different sources [4, 5]
Rys. 1. Udział różnych źródeł w produkcji energii elektrycznej wg [4, 5]

Increasingly popular bifacial panels can absorb radiation from both sides of the module due to transparent rear layers or reflective coatings, which increases their efficiency by 10–20% [6, 7] compared to monofacial panels. This technology, particularly effective in ground-mounted and rooftop installations, is characterized by high durability and good performance under various conditions. As indicated in the IEA-PVPS report [6], bifacial panels can enhance energy yield by absorbing light reflected from the ground, enabling additional energy generation. Optimizing this technology improves the performance and economics of solar projects [7]. Bifacial modules also reduce energy costs due to higher production efficiency, making them a cost-effective solution [8].

Photovoltaic panels, however, face significant challenges related to variable weather conditions such as wind, hail, or snow, which can affect their performance and structural integrity [9–11, 13]. Wind induces dynamic loads that may cause cracking or degradation of protective coatings, reducing the service life of the panels [10]. Hail impacts can lead to microcracks, decreasing the efficiency and durability of the modules [11], whereas snow accumulation, especially on panels with a low tilt angle, can reduce energy production by up to 90% and generate long-term static loads that deform supporting structures or damage the modules [9, 10, 13]. Although repairs are technically possible, they can be costly and complicated. To mitigate damage caused by snow and ice, new solutions are being developed, such as hydrophobic coatings that increase resistance and improve performance in cold-climate conditions [14]. Typical issues are illustrated in Photograph 1.

Despite the extensive scientific literature on the mechanical strength of photovoltaic panels under various loading conditions, it can be observed that it mainly concerns highly integrated structures. The development of photovoltaic components in the field of BIPV (Building Integrated Photovoltaics) no longer requires a constant increase in efficiency, but instead

dziś lat produkcji energii z paneli słonecznych znacznie się zwiększyła w porównaniu z innymi źródłami energii, co przedstawiono na rysunku 1.

Coraz popularniejsze panele bifacialne mogą absorbować promieniowanie z obu stron modułu dzięki przezroczystym warstwom tylnym lub powłokom refleksyjnym, co zwiększa ich sprawność o 10–20% [6, 7] w porównaniu z panelami jednostronnymi. Technologia ta, szczególnie skuteczna w instalacjach naziemnych oraz dachowych, charakteryzuje się dużą trwałością i dobrymi parametrami pracy w różnych warunkach. Jak wskazuje raport IEA-PVPS [6], panele bifacialne mogą zwiększać efektywność wytwarzania energii przez absorpcję światła odbitego od podłoża, co umożliwia dodatkową produkcję energii. Optymalizacja tej technologii poprawia wydajność i ekonomikę projektów solarnych [7]. Moduły bifacialne zmniejszają także koszty energii dzięki zwiększonej efektywności produkcji, czyniąc je opłacalnym rozwiązaniem [8].

Panele fotowoltaiczne napotykają jednak istotne wyzwania związane ze zmiennymi warunkami pogodowymi, takimi jak wiatr, grad czy śnieg, które mogą wpływać na ich wydajność oraz integralność strukturalną [9–11, 13]. Wiatr wywiera obciążenia dynamiczne, które mogą powodować pękanie lub degradację powłok ochronnych, skracając żywotność paneli [10]. Uderzenia gradu mogą wywoływać mikropęknięcia, zmniejszając sprawność i trwałość modułów [11], natomiast akumulacja śniegu, szczególnie na panelach o małym kącie nachylenia, może nawet o 90% zmniejszyć produkcję energii oraz generować długotrwałe obciążenia statyczne, które deformują konstrukcje wsporcze lub uszkadzają moduły [9, 10, 13]. Choć naprawy są technicznie możliwe, bywają kosztowne i skomplikowane. Aby ograniczyć szkody spowodowane przez śnieg i lód, opracowywane są nowe rozwiązania, takie jak powłoki hydrofobowe, które zwiększają odporność i poprawiają efektywność pracy w warunkach zimnego klimatu [14]. Typowe problemy zilustrowano na fotografii 1.

Pomimo obszernej literatury naukowej dotyczącej wytrzymałości mechanicznej paneli fotowoltaicznych w różnych warunkach obciążenia, zauważyć można, że dotyczy ona konstrukcji o dużym stopniu integracji. Rozwój elementów fotowoltaicznych w obszarze BIPV (ang. Building Integrated Photovoltaics) już nie wymusza ciągłego zwiększania efektywności, lecz skłania do uwzględnienia innych aspektów (tworzenia ciekawych aranżacji, zwiększenia przezierności lub użyteczności). Powoduje to, że nadal istnieje istotna luka badawcza dotycząca wpływu rozmieszczenia ogniw na wydajność paneli. Biorąc pod uwagę

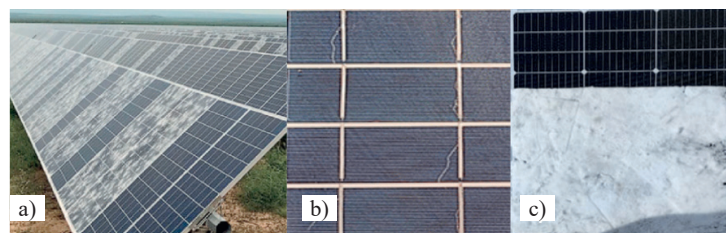


Photo 1. Damage to a PV panel caused by hail (a) [11]; microcracks in cells (b) [12]; snow cover on the panel (c) [13]

Fot. 1. Uszkodzenie panelu PV przez grad (a) [11]; mikropęknięcia w ogniwach (b) [12]; pokrywa śnieżna na panelu (c) [13]

encourages consideration of other aspects (creating attractive designs, increasing transparency, or functionality). As a result, a significant research gap still exists regarding the influence of cell layout on panel performance. Given the close relationship between the number and arrangement of cells and the overall durability and efficiency of a panel, this issue calls for in-depth investigation, particularly due to its potential role in generating local stresses that may initiate microcracks. This article addresses this problem.

Research program

To assess the effect of the silicon-core layout on the stiffness of the panels, nine bifacial monocrystalline photovoltaic panels ($1664 \times 996 \times 6$ mm) were tested under conditions simulating snow and wind loads, including scenarios involving the formation of snowdrifts and the application of long-term static loads. The panels were divided into three groups (Figure 2):

- 0 – reference, photovoltaic panels without gaps between cells;
- I – photovoltaic panels with an increased spacing between rows – 40 mm gaps;
- II – photovoltaic panels with an increased spacing between rows – 80 mm gaps.

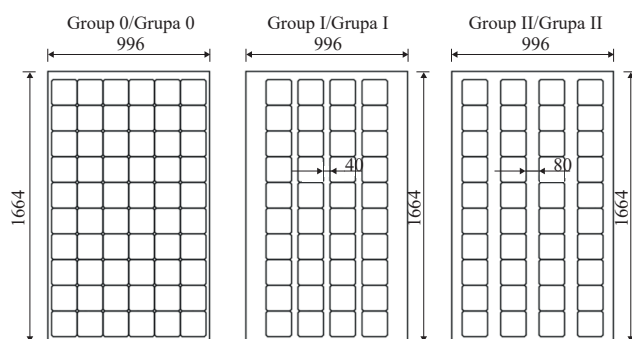


Fig. 2. Photovoltaic panels with different solar cell arrangements
Rys. 2. Panele fotowoltaiczne o różnym rozmieszczeniu ogniw słonecznych

Each panel consisted of two layers of tempered glass with a thickness of 2.5 mm, two POE (polyolefin elastomer) adhesive layers with a thickness of 0.41 mm, and a silicon wafer core with a thickness of 0.18 mm, as shown in Figure 3. Tempered glass, produced by rapid cooling after prior heating to a temperature of 600–700°C, is characterized by high impact resistance and light transmittance exceeding 90%, which ensures long-term durability under external actions such as hail, wind, or snow [15]. The use of POE encapsulation instead of traditional ethylene-vinyl acetate increases resistance to moisture, ultraviolet radiation, and potential-induced degradation, particularly under conditions of elevated humidity [16]

The silicon core contained a-Si/s-Si cells, combining an amorphous-silicon layer responsible for light absorption with a monocrystalline silicon base acting as the main absorber. Such a structure increases energy conversion efficiency, particularly under low-irradiance conditions. Bifacial-type cells

ścisłą zależność między liczbą i układem ogniw a ogólną trwałością oraz sprawnością panelu, zagadnienie to wymaga pogłębianych badań, szczególnie ze względu na jego potencjalną rolę w generowaniu lokalnych naprężeń mogących inicjować mikro-pęknięcia. Artykuł podejmuje tę problematykę.

Program badań

W celu oceny wpływu rozmieszczenia rdzenia krzemowego na sztywność paneli przetestowano dziewięć dwustronnych monokrystalicznych paneli fotowoltaicznych ($1664 \times 996 \times 6$ mm) w warunkach symulujących obciążenie śniegiem i wiatrem, w tym scenariusze z tworzeniem się zasp śnieżnych oraz z utrzymywaniem długotrwałych obciążeń statycznych. Panele podzielono na trzy grupy (rysunek 2):

- 0 – referencyjna, panele fotowoltaiczne bez przerw między ogniwami;
- I – panele fotowoltaiczne o zwiększonej odległości między rzędami – przerwy 40 mm;
- II – panele fotowoltaiczne o zwiększonej odległości między rzędami – przerwy 80 mm.

Każdy panel składał się z dwóch warstw hartowanego szkła o grubości 2,5 mm, dwóch warstw klejących POE (elastomer poliolefinowy) o grubości 0,41 mm oraz rdzenia z płytki krzemowej o grubości 0,18 mm, co przedstawiono na rysunku 3. Szkło hartowane, wytwarzane przez szybkie chłodzenie po uprzednim podgrzaniu do temperatury 600–700°C, charakteryzuje się dużą odpornością na uderzenia oraz przepuszczalnością światła przekraczającą 90%, co zapewnia długoletnią trwałość w warunkach oddziaływania czynników zewnętrznych, takich jak grad, wiatr czy śnieg [15]. Zastosowanie enkapsulacji POE zamiast tradycyjnego octanu etylenowinyłu zwiększa odporność na wilgoć, promieniowanie ultrafioletowe oraz degradację wywołaną potencjałem elektrycznym, szczególnie w warunkach zwiększonej wilgotności [16].

Rdzeń krzemowy zawierał ogniwa a-Si/s-Si, łączące warstwę amorficznego krzemu odpowiedzialną za absorpcję światła z monokrystaliczną bazą krzemową pełniącą rolę głównego absorbera. Taka struktura zwiększa sprawność konwersji energii, szczególnie w warunkach słabego oświetlenia. Zastosowano ogniwa typu bifacialnego, co umożliwia dodatkową produkcję energii z promieniowania odbitego [17].

Panele zamontowano na specjalnie przygotowanym stanowisku badawczym. Układ wsporczy składał się z czterech stojaków ze stalowych kątowników. Dwa słupy połączono prostokątną rurą, a ich wysokość można regulować za pomocą śrub, co pozwala precyzyjnie dostosować położenie panelu do warunków eksperymentalnych. Do konstrukcji wsporczej panel zamocowano za pomocą standardowych uchwytów i zacisków,

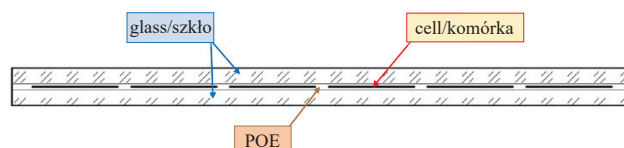


Fig. 3. Structure of a photovoltaic panel
Rys. 3. Budowa panelu fotowoltaicznego

were used, enabling additional energy production from reflected radiation [17].

The panels were mounted on a specially prepared test rig. The supporting frame consisted of four stands made of steel angle sections. Two columns were connected with a rectangular tube, and their height could be adjusted using screws, allowing the panel position to be precisely adapted to the experimental conditions. The panel was attached to the supporting structure using standard brackets and clamps, in accordance with the manufacturer's installation instructions regarding the mounting method and the arrangement of fixing points, ensuring secure and stable fastening during the tests (Photograph 2). A measurement system was installed beneath the panel (Photograph 3), consisting of three LVDT (Linear Variable Differential Transformer) displacement sensors: one placed at mid-span and two others located at $1/4$ and $3/4$ of the span along the shorter side. These sensors measured only vertical displacements, i.e., deflections perpendicular to the plane of the panel. Under real conditions, when panels are tilted, the snow load can be decomposed into components normal and tangential to the panel surface. The tangential component may promote snow sliding (changing the load-intensity distribution) and generate additional effects in the mounting zones. In the present study, only a load corresponding to the normal component was applied; therefore, the response of the panels was analyzed in terms of deflections perpendicular to their plane, while the influence of the tangential component was not investigated.

The panels were loaded with small sandbags weighing 5 kg each and arranged in successive layers until a total mass of 400 kg (80 bags) was reached. The tests began with a simulation of snow load, applied as a pressure of 2.4 kPa and maintained for one hour to allow the deformations to stabilize (Phase 1). This loading method corresponds to the mechanical load test procedure recommended in IEC 61215-1:2021 [18], which specifies methods for assessing the ability of photovoltaic modules to withstand static loads such as snow pressure or wind load without significant loss of efficiency or structural integrity. It was observed that the displacements stabilized after approximately 30 minutes, which led to shortening the waiting time to 0.5 h in subsequent loading phases. In the next stage (Phase 2), wind suction was simulated by turning the panel over, reapplying the load, and maintaining it again

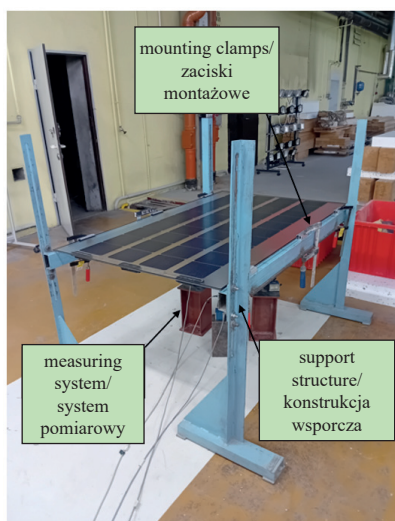


Photo 2. Test setup for PV panels
Fot. 2. Stanowisko do badań paneli PV

zgodnie z instrukcją producenta dotyczącą sposobu montażu oraz rozmieszczenia punktów mocowania, co zapewnia pewne i stabilne zamocowanie podczas badań (fotografia 2). Pod panelem zainstalowano układ pomiarowy (fotografia 3) składający się z trzech czujników przemieszczeń liniowych typu LVDT (ang. Linear Variable Differential Transformer): jednego umieszczonego w połowie rozpiętości oraz dwóch pozostałych zlokalizowanych w $1/4$ i $3/4$ rozpiętości wzdłuż krótszego boku. Czujniki te mierzyły wyłącznie przemieszczenia pionowe, tj. ugięcia w kierunku prostopadłym do płaszczyzny panelu. W warunkach rzeczywistych, przy nachyleniu paneli, obciążenie od śniegu można rozłożyć na składowe normalną i styczną do powierzchni panelu. Składowa styczna może powodować tendencję do zsuwania się śniegu (zmiany rozkładu intensywności obciążenia) oraz generować dodatkowe oddziaływania w strefach mocowania. Podczas badania przyłożono wyłącznie obciążenie odpowiadające składowej normalnej; z tego względu analizowano odpowiedź paneli w postaci ugięć prostopadłych do ich płaszczyzny, natomiast wpływ składowej stycznej nie był przedmiotem badań.



Photo 3. Layout of displacement sensors
Fot. 3. Rozmieszczenie czujników przemieszczeń

5 kg i umieszczono je w kolejnych warstwach, aż do uzyskania całkowitej masy 400 kg (80 worków). Badania rozpoczęto od symulacji obciążenia śniegiem, przyłożonego jako parcie 2,4 kPa i utrzymywanego przez jedną godzinę w celu umożliwienia stabilizacji odkształceń (faza 1). Taki sposób obciążenia odpowiada procedurze badania obciążenia mechanicznego zalecaniej w normie IEC 61215-1:2021 [18], która określa metody oceny zdolności modułów fotowoltaicznych do wytrzymywania obciążeń statycznych, takich jak nacisk śniegu czy obciążenie wiatru, bez istotnej utraty sprawności lub integralności konstrukcyjnej. Zaobserwowano, że przemieszczenia stabilizowały się po ok. 30 min, co skłoniło do skrócenia czasu oczekiwania do 0,5 h w kolejnych fazach obciążania. W następnym etapie (faza 2) zasymulowano ssanie wiatru poprzez obrócenie panelu, ponowne przyłożenie obciążenia i utrzymanie go ponownie przez 30 min. Fazy 3 i 4 były analogiczne do poprzednich. W piątej i szóstej fazie zastosowano nierównomiernie rozłożone obciążenie wzdłuż krótszych boków panelu. Poszczególne fazy opisano w tabeli 1. Dodatkowo przeprowadzono badania długoterminowe na jednym z paneli, rejestrując przemieszczenia w ciągu 96 h od momentu przyłożenia obciążenia. Po każdej fazie obciążania mierzono sprawność elektryczną modułu.

for 30 minutes. Phases 3 and 4 were analogous to the previous ones. In the fifth and sixth phases, a non-uniformly distributed load was applied along the shorter edges of the panel. The individual phases are described in Table 1. In addition, long-term tests were conducted on one of the panels, recording displacements over 96 h from the moment the load was applied. After each loading phase, the electrical efficiency of the module was measured. The mechanical tests were carried out under laboratory conditions at a constant room temperature. It should be emphasized that temperature may affect the mechanical response of the panel; therefore, assessing its influence would require further studies under controlled, variable temperature conditions. As part of the short-term tests, a sequence of six loading stages was carried out: four stages of uniform loading and two stages of non-uniform loading (Table 1).

Table 1. Diagram of the stages of loading of photovoltaic panels
Tabela 1. Schemat etapów obciążania paneli fotowoltaicznych

Phase/Faza	Side/Strona	Load/ Obciążenie	Loading duration [min]/ Czas trwania obciążenia [min]
Short-term loading/Obciążenie krótkotrwałe			
Phase 1/Faza1	front/wierzch	uniform/ równomierne	60
Phase 2/Faza2	back/spód		30
Phase 3/Faza3	front/wierzch		30
Phase 4/Faza4	back/spód		30
Phase 5/Faza5	front/wierzch	non-uniform/ nierównomierne	30
Phase 6/Faza6	back/spód		30
Long-term loading/Obciążenie długotrwałe			
Phase 1/Faza1	front/wierzch	uniform/ równomierne	5760

Mechanical test results

The analysis focuses on both the maximum and average displacements measured at the center of the panel (C) and on the left (L) and right (R) sides, comparing three panel groups with different gap widths between the cells. Under uniform loading conditions (Phases 1–4), the average mid-span displacements for group I and group II were very similar (Figure 4). The highest average value in group I was 36.0 mm, whereas in group II it reached 34.9 mm, indicating only a small difference (3.06%). By comparison, the reference panels (group 0), with no gaps between cells, exhibited significantly smaller displacements – the maximum average deflection was 29.2 mm, corresponding to an 18.9% reduction relative to group I.

The instantaneous maximum readings for the central point and the corresponding points on the left (L) and right (R) sides, presented in Table 2, indicate that the lateral displacements were typically 14–17% smaller than the central values in all groups. The left–right asymmetry was small (≤ 1.1 mm, $< 3\%$ of the C value), while the differences between the measurements on the top and bottom sides at point C did not exceed 1.1 mm ($< 3\%$), largely confirming a symmetric structural response under uniform loading.

Badania mechaniczne wykonywano w warunkach laboratoryjnych, przy stałej temperaturze pokojowej. Należy podkreślić, że temperatura może wpływać na odpowiedź mechaniczną panelu, dlatego ocena jej wpływu wymagałaby dalszych badań w kontrolowanych, zmiennych warunkach temperaturowych. W ramach badań krótkotrwałych przeprowadzono sekwencję 6 etapów obciążenia: 4 etapy obciążenia równomiernego oraz 2 etapy obciążenia nierównomiernego (tabela 1).

Wyniki badań mechanicznych

Analiza koncentruje się zarówno na maksymalnych, jak i średnich przemieszczeniach mierzonych w środku panelu (C) oraz po lewej (L) i prawej (R) stronie, z porównaniem trzech grup paneli o różnej szerokości przerw między ogniwami. W warunkach obciążenia równomiernego (fazy 1–4), wartości średniego przemieszczenia w połowie rozpiętości paneli w przypadku grupy I i grupy II były bardzo zbliżone (rysunek 4). Największa wartość średnia w grupie I wyniosła 36,0 mm, natomiast w grupie II osiągnęła 34,9 mm, co oznacza niewielką różnicę (3,06%). Dla porównania, panele z grupy referencyjnej (grupa 0), bez przerw między ogniwami, wykazały istotnie mniejsze przemieszczenia – maksymalne średnie ugięcie wyniosło 29,2 mm, co stanowi redukcję o 18,9% w stosunku do grupy I.

Chwilowe maksymalne odczyty w przypadku punktu centralnego oraz odpowiadających mu punktów po lewej (L) i prawej (R) stronie, przedstawione w tabeli 2, wskazują, że przemieszczenia boczne były zazwyczaj o 14–17% mniejsze od wartości centralnych we wszystkich grupach. Asymetria lewo–prawo była niewielka ($\leq 1,1$ mm, $< 3\%$ wartości C), natomiast różnice pomiędzy pomiarami wierzchniej i spodniej strony w punkcie C nie przekraczały 1,1 mm ($< 3\%$), co w dużej mierze potwierdza symetryczną odpowiedź konstrukcji w przypadku obciążenia równomiernego.

W warunkach obciążenia nierównomiernego (fazy 5 i 6) przemieszczenia w połowie rozpiętości paneli wykazywały te same ogólne tendencje, co w przypadku obciążenia równomiernego. Grupa I i grupa II ponownie zachowywały się podobnie, osiągając maksymalne średnie przemieszczenia w punkcie centralnym

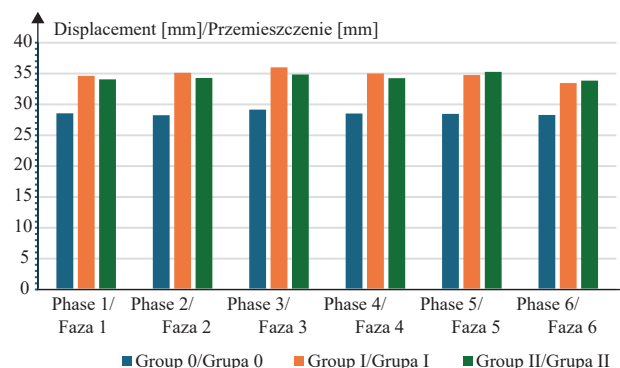


Fig. 4. Average displacement of the panel centre during successive loading phases

Rys. 4. Średnia wartość przemieszczenia środka panelu podczas kolejnych faz obciążenia

Table 2. Maximum central displacements (C) and the corresponding displacements on the left (L) and right (R) sides
Tabela 2. Maksymalne przemieszczenia centralne (C) oraz odpowiadające im przemieszczenia z lewej (L) oraz prawej (R) strony

Group/Grupa	Side/Strona	Displacement [mm]/Przemieszczenie [mm]		
		L	C	R
Uniform loading/Obciążenie równomierne				
Group – 0/Grupa – 0	front/wierzch	24.7	29.2	24.6
	back/spód	24.1	28.5	24.1
Group – I/Grupa – I	front/wierzch	32.8	38.5	32.3
	back/spód	32.2	37.4	31.1
Group – II/Grupa – II	front/wierzch	29.3	35.1	30.2
	back/spód	29.5	34.6	29.3
Non-uniform loading/Obciążenie nierównomierne				
Group – 0/Grupa – 0	front/wierzch	22.8	28.5	25.2
	back/spód	22.6	28.3	25.1
Group – I/Grupa – I	front/wierzch	28.6	35.8	31.9
	back/spód	27.5	34.6	31.2
Group – II/Grupa – II	front/wierzch	28.8	36.0	32.1
	back/spód	27.8	34.7	30.6

Under non-uniform loading conditions (Phases 5 and 6), the mid-span displacements of the panels exhibited the same general trends as under uniform loading. Group I and group II again behaved similarly, reaching maximum average displacements at the central point of 36.0 mm and 35.3 mm, respectively. The difference between them was negligible (1.94%), indicating that increasing the spacing between the cells from 40 to 80 mm did not significantly affect the mid-span deflection. By comparison, group 0 showed a noticeably stiffer response, with a maximum average displacement of 28.6 mm, i.e., about 19.0% lower than that of group II. The instantaneous maximum readings for the central point (C) and the corresponding points on the left (L) and right (R) sides, presented in Table 2, show that under non-uniform loading the lateral displacements were typically 10–21% smaller than the central values in all groups. Left–right asymmetry was more pronounced than under uniform loading: the maximum differences reached up to 2.5 mm ($\approx 9\%$ of the C value) in group 0, and 3.7 mm and 3.3 mm in groups I and II, respectively ($< 11\%$ of the C value). The differences between the measurements on the top and bottom sides at point C did not exceed 1.4 mm ($< 4\%$). These results clearly indicate that asymmetric load application leads to asymmetric displacements.

During the experiments, it was observed that the panels underwent significant immediate deflection under the applied load. Such large deflection can change the nature of the loading, distorting an initially uniform distribution into one that becomes more concentrated near the mid-span. This phenomenon, often referred to as “load-following behavior”, may locally intensify stresses and should be taken into account both in mechanical analyses and in the design of supporting systems.

The long-term loading test was conducted over a total of five days (Figure 5). During the first four days, the panel was subjected to uniform loading; afterwards, the load was removed and the panel was left unloaded for the next 24 hours. After 96 hours, an increase in displacement of 8.6% compared to the initial measurement was observed, indicating time-dependent

wynoszące odpowiednio 36,0 mm oraz 35,3 mm. Różnica między nimi była pomijalna (1,94%), co wskazuje, że zwiększenie odstępów między ogniwami z 40 do 80 mm nie miało istotnego wpływu na ugięcie w połowie rozpiętości. Dla porównania, grupa 0 wykazała zauważalnie sztywniejszą odpowiedź, z maksymalnym średnim przemieszczeniem 28,6 mm, czyli o ok. 19,0% mniej w porównaniu z grupą II. Chwilowe maksymalne odczyty dla punktu centralnego (C) oraz odpowiadających mu punktów po lewej (L) i prawej (R) stronie, przedstawione w tabeli 2, pokazują, że w przypadku obciążenia nierównomiernego przemieszczenia boczne były zazwyczaj o 10–21% mniejsze niż wartości centralne we wszystkich grupach. Asymetria lewo–prawo była bardziej wyraźna niż w przypadku obciążenia równomiernego – maksymalne różnice sięgały do 2.5 mm ($\approx 9\%$ wartości C) w grupie 0, natomiast w grupach I i II odpowiednio 3.7 mm oraz 3.3 mm ($< 11\%$ wartości C). Różnice pomiędzy pomiarami wierzchniej i spodniej strony w punkcie C nie przekraczały 1.4 mm ($< 4\%$). Wyniki te jednoznacznie wskazują, że asymetryczne przyłożenie obciążenia skutkuje asymetrycznymi przemieszczeniami.

Podczas eksperymentów zaobserwowano, że panele ulegały znacznemu natychmiastowemu ugięciu pod wpływem obciążenia. Tak duże ugięcie może zmieniać charakter działania przyłożonego obciążenia, powodując zniekształcenie równomiernego rozkładu w kierunku obciążenia koncentrującego się w pobliżu środka rozpiętości. Zjawisko to, często określane jako „obciążenie śledzące” (*load-following behavior*), może lokalnie intensyfikować naprężenia i powinno być uwzględniane zarówno w analizach mechanicznych, jak i w projektowaniu układów wsporczych.

Długotrwała próba obciążenia prowadzona była łącznie pięć dni (rysunek 5). Przez pierwsze cztery dni panel poddawany był obciążeniu równomiernemu, po czym obciążenie usuwano, a panel pozostawiano bez obciążenia przez kolejne 24 h. Po upływie 96h zaobserwowano zwiększenie przemieszczenia o 8,6% w porównaniu do pomiaru początkowego, co wskazuje na odkształ-

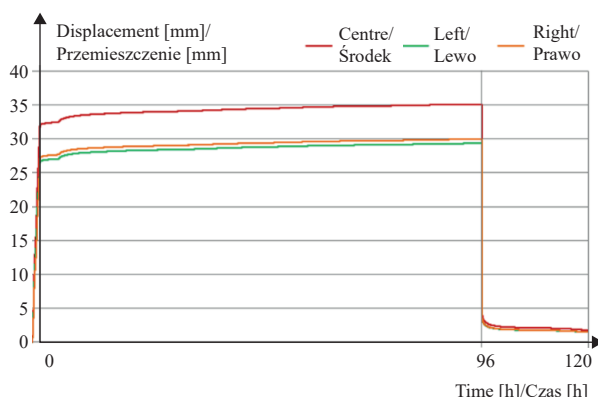


Fig. 5. Dependence of the photovoltaic panel displacement on time under long-term non-uniform loading

Rys. 5. Zależność przemieszczenia panelu fotowoltaicznego od czasu przy długotrwałym obciążeniu nierównomiernym

deformation associated with sustained stress. After unloading, the panel partially returned to its original shape; however, a residual displacement remained, amounting to 4.6% of the total maximum displacement.

Electrical test results

The results of the mechanical tests were supplemented with electrical measurements of the photovoltaic panels performed between individual loading trials. Their purpose was to verify the effect of the mechanical tests on the deterioration of the generation parameters of new PV panels with modified cell spacing. The tests were carried out under laboratory conditions (identical for each tested panel), maintaining a constant angle of incidence of the radiation, the same ambient temperature, and an average irradiance of 429 W/m². After completing each loading cycle, before changing the panel orientation from front to back, the electrical operating characteristics were measured under illumination (Photograph 4).

The measurement results for the individual groups, according to Figure 2, are presented as a set of representative current-voltage characteristics in Figures 6–8, using the following notation:

- *ref* – reference series (baseline) before the loading tests;
- *P1 (r)* – series with illumination of the front side after the first test (uniform load);
- *T1 (r)* – series with illumination of the back side after the first test (uniform load);
- *P2 (r)* – series with illumination of the front side after the second test (uniform load);
- *T2 (r)* – series with illumination of the back side after the second test (uniform load);
- *P3 (nr)* – series with illumination of the front side after the third test (non-uniform load);

cenie zależne od czasu, związane z długotrwałe działającym naprężeniem. Po odciążeniu panel częściowo powrócił do pierwotnego kształtu, jednak pozostało przemieszczenie rezydualne, stanowiące 4,6% całkowitego maksymalnego przemieszczenia.

Wyniki badań elektrycznych

Rezultaty badań mechanicznych uzupełniono o wyniki pomiarów elektrycznych paneli fotowoltaicznych wykonanych między poszczególnymi próbami obciążania. Ich celem była weryfikacja wpływu prób mechanicznych na pogorszenie parametrów generacyjnych nowych paneli PV o zmienionym rozstawie ogniów. Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych (identycznych w przypadku każdego badanego panelu) przy zachowaniu stałego kąta padania promieniowania, identycznej temperatury otoczenia oraz średniej wartości irradancji – 429 W/m². Po zakończeniu cyklu obciążania przed zmianą orientacji panelu z wierzchu na spód dokonywano pomiaru użytkowych właściwości elektrycznych przy naświetlaniu panelu (fotografia 4).

Wyniki pomiarów paneli z poszczególnych grup zgodnie z rysunkiem 2 przedstawiono w postaci zbioru przykładowych charakterystyk prądowo-napięciowych na rysunkach 6÷8, gdzie wprowadzono następujące oznaczenia:

- *ref* – seria referencyjna (odniesienia) przed próbami obciążeniowymi;
- *P1 (r)* – seria z oświetleniem strony wierzchniej po pierwszej próbie (obciążenie równomierne);
- *T1 (r)* – seria z oświetleniem strony spodniej po pierwszej próbie (obciążenie równomierne);
- *P2 (r)* – seria z oświetleniem strony wierzchniej po drugiej próbie (obciążenie równomierne);
- *T2 (r)* – seria z oświetleniem strony spodniej po drugiej próbie (obciążenie równomierne);
- *P3 (nr)* – seria z oświetleniem strony wierzchniej po trzeciej próbie (obciążenie nierównomierne);
- *T3 (nr)* – seria z oświetleniem strony spodniej po trzeciej próbie (obciążenie nierównomierne).

Charakterystyki prądowo-napięciowe paneli PV wykazują dużą zgodność, a zaobserwowane różnice mieszczą się w granicach błędów pomiarowych. Analizie poddano również prąd zwarcia, napięcie obwodu otwartego, moc w MPP, sprawność oraz współczynnik wypełnienia, zarówno przed, jak i po badaniach mechanicznych. Nie zaobserwowano pogorszenia właściwości użytkowych paneli.



Photo 4. Measurement of the operational electrical properties between panel loading cycles

Fot. 4. Pomiar użytkowych właściwości elektrycznych pomiędzy cyklami obciążania panelu

Wnioski

Wyniki badań wykazały dużą powtarzalność pomiarów prądowo-napięciowych w obrębie każdej grupy testowej. Porównania między grupą I a grupą II wykazały podobne wartości ugięć, co sugeruje, że szerokość przerwy między ogniwami (40 i 80 mm) nie miała

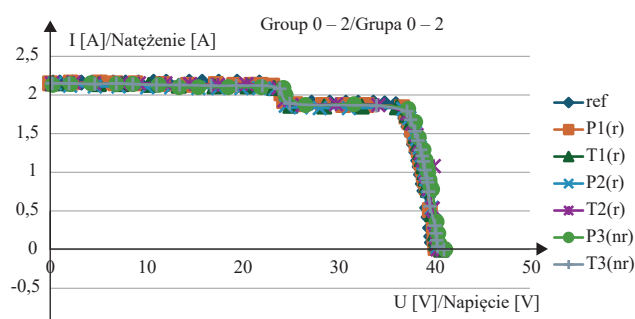


Fig. 6. Set of current–voltage characteristics from individual loading stages for panel 2 from group 0

Rys. 6. Zbiór charakterystyk prądowo-napięciowych z poszczególnych etapów prób obciążeniowych w przypadku panelu 2 z grupy 0

• T3 (nr) – series with illumination of the back side after the third test (non-uniform load).

The current–voltage characteristics of the PV panels show high consistency, and the observed differences fall within the measurement error. The short-circuit current, open-circuit voltage, power at the maximum power point (MPP), efficiency, and fill factor were also analyzed both before and after the mechanical tests. No deterioration in the operating performance of the panels was observed.

Conclusions

The test results showed high repeatability of the displacement measurements within each test group. Comparisons between group I and group II revealed similar deflection values, suggesting that the inter-cell gap width (40 and 80 mm) did not significantly affect the mechanical properties of the panels within the investigated standard range. By contrast, the panels in group 0, with no gaps between cells, exhibited noticeably higher bending stiffness, confirming that the presence of inter-cell gaps is an important parameter in structural and design optimization.

The effect of non-uniform loading, simulated by snow bags, was also investigated. The measurement results showed differences in deflections at characteristic points of the panels of up to 15% compared with the corresponding deflections induced by uniform loading.

During the short-term loading cycles, despite the significant displacements observed in the tested panels, the deflections were reversible. However, due to the limited number of cycles performed in the present study, further tests are planned to assess the effect of repeated cyclic loading over a longer period.

The long-term loading test caused residual deformation of the panel, indicating time-dependent material behavior. Despite these deformations, no measurable decrease in electrical efficiency was observed. The current–voltage characteristics of the tested panels were consistent, and an analysis of parameters such as short-circuit current, open-circuit voltage, power at the MPP, efficiency, and fill factor, before and after the mechanical tests, showed no deterioration in the operating performance of the panels.

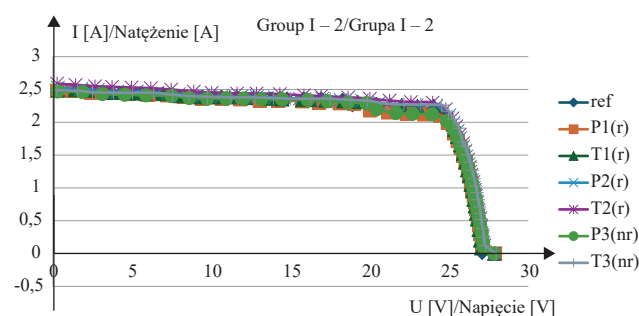


Fig. 7. Set of current–voltage characteristics from individual loading stages for panel 2 from group I

Rys. 7. Zbiór charakterystyk prądowo-napięciowych z poszczególnych etapów prób obciążeniowych w przypadku panelu numer 2 z grupy I

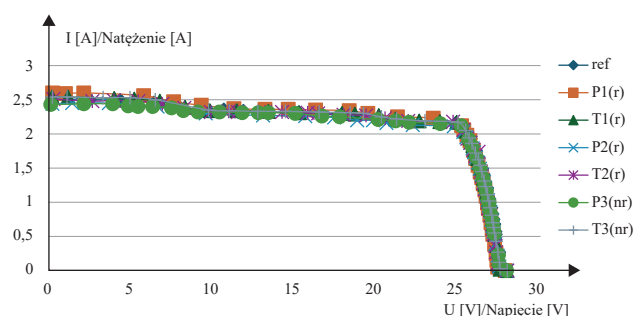


Fig. 8. Set of current–voltage characteristics from individual loading stages for panel 2 from group II

Rys. 8. Zbiór charakterystyk prądowo-napięciowych z poszczególnych etapów prób obciążeniowych w przypadku panelu numer 2 z grupy II

istotnego wpływu na właściwości mechaniczne paneli w badanym normatywnym zakresie. Dla porównania, panele z grupy 0, bez odstępów między ogniwami, wykazały zauważalnie większą sztywność na zginanie, co potwierdza, że obecność przerw między ogniwami jest istotnym parametrem w optymalizacji konstrukcyjnej i projektowej.

Zbadano również wpływ nierównomiernego obciążenia imitowanego przez worki śnieżne. Otrzymane wyniki pomiarów wykazały różnice ugięć w charakterystycznych punktach paneli do 15% w porównaniu z odpowiednimi ugięciami wywołanymi obciążeniem równomiernym.

Podczas krótkotrwałych cykli obciążeniowych, pomimo zaobserwowania znacznych przemieszczeń badanych paneli, ugięcia były odwracalne. Jednak ze względu na ograniczoną liczbę cykli wykonanych w ramach omawianego badania, planuje się przeprowadzenie dalszych testów w celu oceny wpływu wielokrotnego obciążenia cyklicznego w dłuższym okresie.

Długotrwała próba obciążeniowa spowodowała resztkowe odkształcenie panelu, wskazujące na zależne od czasu zachowanie materiału. Pomimo tych odkształceń nie zaobserwowano mierzalnego spadku sprawności elektrycznej. Charakterystyki prądowo-napięciowe badanych paneli były zbliżone, a po analizie wartości parametrów, takich jak prąd zwarcia, napięcie obwodu otwartego, moc w MPP, sprawność i współczynnik wypełnienia, przed i po badaniach mechanicznych, nie stwierdzono pogorszenia właściwości użytkowych paneli. W przyszłych badaniach planowane jest wydłużenie czasu działania obciążenia,

In future studies, the duration of loading is planned to be extended to simulate conditions of long-term snow accumulation over a period of three to six months and to assess more precisely the durability and efficiency of the panels under real operating conditions.

Photovoltaic technology continues to develop, offering increasingly efficient and durable solutions. To reduce testing costs and accelerate the development process, it is advisable to develop a numerical model, validated and calibrated using experimental results. Such a model would reduce the number of required prototypes and enable early identification of potential structural or operational issues. The conducted tests constitute the first part of a broader project. The authors plan to develop a computational model for numerical simulation of panel performance in order to optimize their efficiency and ensure safe operation.

This work was funded under a research project jointly financed by the National Centre for Research and Development (NCBR; 0413/NCBR/6600) and the General Directorate for National Roads and Motorways (GDDKiA; RID2/0004/2022).

Received: 15.09.2025
Revised: 24.10.2025
Published: 26.01.2026

aby zasymulować warunki długotrwałej akumulacji śniegu przez okres od trzech do sześciu miesięcy i dokładniej ocenić trwałość oraz sprawność paneli w warunkach rzeczywistej eksploatacji.

Technologia fotowoltaiczna stale się rozwija, oferując coraz bardziej wydajne i trwałe rozwiązania. W celu ograniczenia kosztów badań oraz przyspieszenia procesu rozwoju wskazane jest opracowanie modelu numerycznego, poddanego walidacji i kalibracji na podstawie wyników badań eksperymentalnych. Taki model pozwoliłby zmniejszyć liczbę wymaganych prototypów oraz umożliwiłby wczesną identyfikację potencjalnych problemów konstrukcyjnych lub eksploatacyjnych. Przeprowadzone badania stanowią pierwszą część szerszego projektu. Autorzy planują opracowanie modelu obliczeniowego do numerycznej symulacji pracy paneli celem optymalizacji ich wydajności i bezpiecznej pracy.

Praca została sfinansowana w ramach projektu badawczego finansowanego wspólnie przez NCBR (0413/NCBR/6600) oraz GDDKiA (RID2/0004/2022).

Artykuł wpłynął do redakcji: 15.09.2025 r.
Otrzymał poprawiony po recenzjach: 24.10.2025 r.
Opublikowano: 26.01.2026 r.

Literature

- [1] Becquerel AE. Report on the electrical effects produced under the influence of solar rays, in Summary of the Sessions of the Academy of Sciences, Session of Monday November 4, 1839. English translation by A. Crossay, J.-E. Bourée, P. Alpuim, N. Bourée, and B. Theys, Becquerel Prize, 2020. [Online]. Available: https://www.becquerel-prize.org/pdf/2020_05_05_Edmond_Becquerel_PV_Original_Paper-V4.pdf [Accessed: 16-Aug-2025].
- [2] Starowicz A, Rusanowska P, Zieliński M. Photovoltaic cell – the history of invention – review. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*. 2023;26 (1): 169–180. <https://doi.org/10.33223/epj/161290>
- [3] Michelsen CC, Madlener R. Switching from fossil fuel to renewables in residential heating systems: An empirical study of homeowners' decisions in Germany. *Energy Policy*. 2016;89:95–105. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.11.018>
- [4] Ember, Global Electricity Review 2024. [Online]. [Accessed: 14-Aug-2025]. Available: <https://ember-energy.org/latest-insights/global-electricity-review-2024/>
- [5] Our World in Data. Share of electricity production by source, 2000–2023. Available: <https://ourworldindata.org/grapher/share-elec-by-source?time=2000..2023> [Accessed 14 Aug 2025].
- [6] International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA-PVPS), Bifacial Photovoltaic Modules and Systems: Experience and Results from International Research and Pilot Applications, 2021. [Online]. Available: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/04/IEA-PVPS-T13-14_2021-Bifacial-Photovoltaic-Modules-and-Systems-report.pdf
- [7] Garrod A, Ghosh A. A review of bifacial solar photovoltaic applications. *Frontiers in Energy*. 2023;17 (6): 704–726. <https://doi.org/10.1007/s11708-023-0903-7>
- [8] Kopecek R, Libal J. Bifacial photovoltaics 2021: Status, opportunities and challenges. *Energies*. 2021;14 (8): 2076. <https://doi.org/10.3390/en14082076>
- [9] Abou Yassine AH, Khoshbakhhtnejad E, Sojoudi H. Economics of snow accumulation on photovoltaic modules. *Energies*. 2024;17:2962. <https://doi.org/10.3390/en17122962>
- [10] Abdollahi R. Impact of wind on strength and deformation of solar photovoltaic modules. *Environ Sci Pollut Res*. 2021;28:21589–21598. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12111-1>
- [11] Gupta V, Sharma M, Pachauri R, Babu KND. Impact of hailstorm on the performance of PV module: a review. *Energy Sources Part A: Recovery Util Environ Eff*. 2022;44 (1): 1923–1944. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1648597>
- [12] Rahman T, et al. Investigation of degradation of solar photovoltaics: A review. *Energies*. 2023;16 (9): 3706. <https://doi.org/10.3390/en16093706>
- [13] Quan Z, et al. Experimental measurement and numerical simulation on the snow-cover process of solar photovoltaic modules and its impact on photoelectric conversion efficiency. *Coatings*. 2023;13 (2): 427. <https://doi.org/10.3390/coatings13020427>
- [14] Fillion RM, Riahi AR, Edrissy A. A review of icing prevention in photovoltaic devices by surface engineering. *Renew Sustain Energy Rev*. 2014;32:797–809. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.015>
- [15] Fang Y, Arya F. Evacuated glazing with tempered glass. *Sol Energy*. 2019;183:240–247. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.021>
- [16] Jankovec M, Annigoni E, Ballif C, Topič M. In-situ determination of moisture diffusion properties of PV module encapsulants using digital humidity sensors. In: Proc. IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7); 2018 Jun 10–15; Waikoloa, USA. IEEE; 2018. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2018.8547360>
- [17] Kang H. Crystalline silicon vs. amorphous silicon: The significance of structural differences in photovoltaic applications. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci*. 2021;726:012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/726/1/012001>
- [18] IEC 61215–1:2021. Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval – Part 1: Test requirements. International Electrotechnical Commission.