

Ocena możliwości instalowania paneli fotowoltaicznych na wybranych przykładach

Assessment of the possibilities of installing photovoltaic panels on selected examples

dr hab. inż. Dariusz Bajno, prof. nadzw. PBS (ORCID: 0000-0001-7664-8653), dr inż. Agnieszka Grzybowska (ORCID: 0000-0003-2798-3097), Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Politechnika Bydgoska

DOI: 10.5604/01.3001.0054.1325

Streszczenie: Zmieniające się warunki użytkowania istniejących elementów konstrukcji determinują konieczność wykonania powtórnej weryfikacji nośności. Zadanie takie może komplikować się w świetle wielu zmiennych, które należy uwzględnić podczas analizy ustrojów. W artykule przywołano dwa przypadki obiektów już eksploatowanych, na dachach których planowano zamocować panele fotowoltaiczne. Ocena możliwości dodatkowego ich dociążenia poprzedzona została sporządzeniem projektów branżowych, zawierających m.in. lokalizację (rozkład) paneli, jak również ich ciężar. W artykule ten problem opisano jako studium przypadku dla dwóch niezależnych dachów, wykonanych w różnych się technologiach.

Słowa kluczowe: nośność, dźwigar dachowy, analiza.

Abstract: The changing conditions of use of existing structure elements determine the need to re-verify the load-bearing capacity. Such a task may become more complicated in light of the many variables that must be taken into account when analyzing systems. The article mentions two cases of facilities already in operation, on the roofs of which photovoltaic panels were planned to be installed. The assessment of the possibility of additional load was preceded by the preparation of industry projects, including, among others: location (distribution) of panels as well as their weight. The article describes this problem as a case study for two independent roofs made using different technologies.

Keywords: load capacity, roof girder, analysis.

1. Wprowadzenie

Montaż paneli fotowoltaicznych na dachach jest jednym z najkorzystniejszych sposobów wykorzystania energii słonecznej do produkcji energii elektrycznej [1–22]. Obecnie instalacje takie są montowane głównie na dachach budynków już eksploatowanych, dlatego też przed podjęciem decyzji o instalacji paneli fotowoltaicznych, należy dokładnie przeanalizować okoliczności związane z zacienieniem powierzchni przez elementy otoczenia oraz dokonać oceny nośności konstrukcji dachu. Istniejące konstrukcje dachów nie były przewidywane na takie dodatkowe obciążenia [23, 24]. Instalacje fotowoltaiczne mają coraz większy krąg odbiorców, ponieważ ograniczają ilość i koszty zużycia energii konwencjonalnej przy stale rosnącej jej cenie. Tak jak to wspomniano już wyżej, panele najczęściej montowane są na dachach budynków, lecz również bezpośrednio na terenie, tworząc tzw. „pola energetyczne”. Dachy budynków i budowli są konstrukcjami wyniesionymi ponad teren, stąd charakteryzują się znacznie korzystniejszą lokalizacją dla późniejszej sprawności ogniw fotowoltaicznych w stosunku do terenów przyobiektowych. Wszelkie zacienienia połaci dachowych sąsiadującymi drzewami, kominami wyprowadzonymi ponad połac

czy też antenami lub innymi urządzeniami montowanymi do kominów ich sprawność energetyczną obniżają. Ocena nośności konstrukcji dachów niejednokrotnie przy dachach starszych nie do końca rozpoznanych jest podstawą bezpieczeństwa eksploatacji dachów, a tym samym paneli fotowoltaicznych. Taka ocena wymaga analizy dokumentacji archiwalnych, o ile istnieją lub szczegółowych badań in situ lub też laboratoryjnych. Niejednokrotnie podejście do nośności eksploatowanych konstrukcji jest zbyt ogólne, a ocena szacunkowa.

2. Szczegółowy opis przypadków

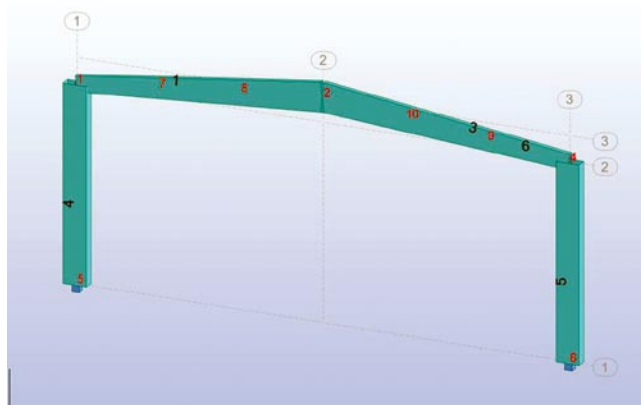
Przykład 1

Studium przypadku ma na celu ustalenie, czy istnieją techniczne możliwości wykonania instalacji fotowoltaicznej na połaci dachowej przedmiotowego budynku. Do wykonania opracowania przyjęto obowiązujące normy w polskim budownictwie [25–28]. Obliczenia w pierwszej iteracji wykonano na podstawie aktualnie obowiązującego zestawu norm PN-EN, choć autorzy niniejszej pracy stoją na stanowisku, iż weryfikacja powinna zostać przeprowadzona na normach obowiązujących na czas projektowania konstrukcji i taką też analizę przedstawiają jako wiążącą dla

przedmiotowego opracowania. Podstawę projektową stanowią następujące normy:

- Europejskie (Eurokody):
 - PN-EN 1990 – Eurokod: Podstawy projektowania konstrukcji,
 - PN-EN 1991-1-1 – Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-1: Oddziaływania ogólne. Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach,
 - PN-EN 1991-1-3 – Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-3: Oddziaływania ogólne – Obciążenie śniegiem,
 - PN-EN 1991-1-4 – Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru,
 - PN-EN 1992-1-1 – Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków,
 - PN-EN 1992-1-2 – Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-2: Reguły ogólne. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe,
 - PN-EN 1995-1-1 – Eurokod 5: Projektowanie konstrukcji z drewna. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków;
 - Polskie Normy:
 - PN-82/B-02000: Obciążenia budowli. Zasady ustalania wartości,
 - PN-82/B-02001: Obciążenia budowli. Obciążenia stałe,
 - PN-80/B-02010/Az 1:2006: Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenia śniegiem,
 - PN-77/B-02011+Az1:2009: Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem,
 - PN-B-03150:2000 oraz Az1:2001, Az2:2003, Az3:2004: Konstrukcje drewniane. Obliczenia statyczne i projektowanie,
 - PN-B-03264:2002 Ap1:2004: Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- Pierwszym analizowanym obiektem był niepodpiwniczony budynek hali sportowej z zapleczem socjalnym oraz łącznikiem. Wykonano go w konstrukcji mieszanej murowanej i żelbetowej, konstrukcję dachu wykonano w technologii drewna klejonego. Obiekt ten składa się z dwóch części: wyższej, mieszczącej halę sportową wraz z trybunami oraz niższej, mieszczącej zaplecze socjalno-administracyjne i pomieszczenia techniczne. Powierzchnia użytkowa hali sportowej wynosi 655,21 m. Została ona przykryta dwuspadowym dachem płaskim o nachyleniu ok. 10% i pokryciu płytami warstwowymi grubości 15 cm (o rdzeniu styropianowym), ułożonymi na dwutrapezowych ryglach o rozpiętości 18,35 m, wykonanych z drewna klejonego. Szczegółowy opis konstrukcji budynku zamieszczono poniżej.
- Płatwie – wykonane jako belki wieloprzęsłowe z drewna klejonego warstwowo o przekroju 12x31 cm w rozstawie co 3 m.
 - Słupy ścian – wykonane jako żelbetowe C20/25 monolityczne 30x50 cm.
 - Rygle ram ustroju nośnego dachu wykonano z drewna klejonego warstwowo 112x60x18 cm w rozstawie 6 m i oparto

na słupach żelbetowych stanowiących element nośny ścian (konstrukcja skrępowana). Są to dźwigary dwutrapezowe, wykonane z drewna klejonego warstwowo o nieznanej klasie wytrzymałościowej. W dostępnej dokumentacji projektowej nie znaleziono zapisu dotyczącego klasy użytego do wykonania tej konstrukcji drewna. Dźwigary charakteryzują się zmienną wysokością: w strefie podporowej jest to 60 cm, natomiast w kalenicy 112 cm. Szerokość elementu wynosi 18 cm. Płaszczyzna krawędzi dolnej dźwigara jest uniesiona w linii kalenicy o 40 cm (pochylenie górnej powierzchni rygli wynosi 10%). Zbrojenie w ścianach słupów nie zostało podane w dostępnej dokumentacji.



Rys. 1. Widok ustroju nośnego (czarne liczby oznaczają numery prętów, a czerwone numery węzłów)

Przyjęto następujące założenia do obliczeń sprawdzających nośność rygli oraz warstwy pokrycia dachu na podstawie dokumentacji projektowej i badań własnych:

- płyta warstwowa z rdzeniem styropianowym w okładzinie z blachy stalowej,
- folia,
- płatwie z drewna klejonego warstwowo o klasie GL22h o przekroju 12x31 cm.

Rozstaw płatwi: 3,2 m, długość płatwi 6 m. Obciążenie łączne wynosi 0,34 kN/m², co przekłada się na reakcję płatwi przypadającą na rygiel równą 6,528 kN. Obciążenie ciężarem własnym płatwi dla drewna klasy C24 ($p_{mean} = 420 \text{ kg/m}^3$) wynosi 0,153 kN/m, a zatem skupione przyłożone na dźwigar jako reakcja płatwi 0,919 kN. Budynek hali znajduje się w miejscowości położonej na wysokości ~100 m nad poziomem morza.

Założenia przyjęte w opinii do weryfikacji nośności elementów hali sportowej według zestawu norm PN-EN:

- dotyczące obciążeń:
 - obciążenie stałe od ciężaru warstw wykończeniowych połaci dachowej – 0,34 kN/m²,
 - obciążenie stałe od ciężaru płatwi – 0,153 kN/m,
 - lokalizacja w I strefie obciążenia wiatrem oraz w III strefie obciążenia śniegiem determinujące obciążenie śniegiem (charakterystyczne) na poziomie $s_k = 1,2 \text{ kN/m}^2$ dla wysokości 100 m n.p.m. oraz obciążenie wiatrem (charakterystyczne)

na poziomie 1,045 kN/m² dla ssania oraz 0,178 kN/m² dla parcia obiektu położonego na wysokości 100 m n.p.m.,

– obciążenie technologiczne dachu (charakterystyczne), przyjęte jako reakcja na dwóch płatwiach dająca symetryczny układ obciążenia – 1 kN (człowiek z narzędziami),

– obciążenie dodatkowe od projektowanej instalacji fotowoltaicznej – 0,2 kN/m²;

• dotyczące konstrukcji:

– klasa konstrukcji S4,

– klasa drewna klejonego warstwowo dla dźwigara głównego: GL22h (w związku z brakiem dokładniejszych danych przyjęto jedną z najniższych możliwych klas drewna klejonego warstwowo),

– klasa drewna litego dla płatwi: C24 (w związku z brakiem dokładniejszych danych przyjęto typową klasę drewna litego),

– zbrojenie w słupach żelbetowych monolitycznych (założone, wynikające z minimalnego procentu zbrojenia): 4 #16, – dźwigary oparte zostały na słupach mocowanych poprzez okucia podporowe zapewniające warunki odpowiadające przyjętemu schematowi statycznemu, tj. podparcie przegubowe w słupach (w programie do weryfikacji nośności zastosowano zwolnienia węzłowe).

Założenia przyjęte w niniejszej opinii do weryfikacji nośności elementów hali sportowej według zestawu norm PN-B (przy założeniach jw.):

• dotyczące obciążeń:

– obciążenie stałe od ciężaru warstw wykończeniowych połąci dachowej – 0,34 kN/m²,

– lokalizacja w I strefie obciążenia wiatrem oraz w III strefie obciążenia śniegiem determinujące obciążenie śniegiem (charakterystyczne) na poziomie 1,2 kN/m² dla wysokości 100 m n.p.m. oraz obciążenie wiatrem (charakterystyczne) skupione do reakcji z płatwi na poziomie 8,55 kN dla ssania oraz 0,0 kN/m² dla parcia wysokości 100 m n.p.m.,

– obciążenie technologiczne dachu (charakterystyczne) – 1 kN,

– obciążenie dodatkowe od projektowanej instalacji fotowoltaicznej – 0,2 kN/m²;

• dotyczące konstrukcji:

– klasa drewna klejonego warstwowo dla dźwigara głównego: GL22h (w związku z brakiem dokładniejszych danych przyjęto jedną z najniższych możliwych klas drewna klejonego warstwowo),

– klasa drewna litego dla płatwi: C24 (w związku z brakiem dokładniejszych danych przyjęto typową klasę drewna litego),

– zbrojenie w słupach żelbetowych monolitycznych według autorów to 4 #16 (niespełniające warunku nośności) a spełniające warunek nośności to 10#16,

– dźwigary posadzone są na słupach mocowanych poprzez okucia podporowe zapewniające warunki odpowiadające przyjętemu schematowi statycznemu, tj. podparcie przegubowe w słupach (w programie do weryfikacji nośności zastosowano zwolnienia węzłowe).

W ramach obliczeń statycznych wykonanych za pomocą Autodesk Robot Structural Analysis sprawdzono nośności głównego ustroju nośnego – ramy przestrzennej.

Obciążenie stałe zwiększono o 5%, ze względu na obecność paneli fotowoltaicznych. Klasa trwania obciążenia została zdefiniowana jako długotrwała.

Obliczenia według PN-EN: Konstrukcja nośna hali (Figure 1) nie spełniają wymagań I i II stanu granicznego. Nawet przy zmianie klasy drewna klejonego warstwowo na GL32h (najwyższą normową) konstrukcja nadal nie spełnia ww. warunków.

Obliczenia według PN-B: Konstrukcja nośna hali (rys. 1.1) nie spełniają wymagania I i II stanu granicznego dla przyjętych założeń obliczeniowych. Brak informacji o klasie drewna dźwigara ukierunkowuje na wieloiteracyjność obliczeń. W kolejnej iteracji przyjęto klasę drewna klejonego warstwowo dla dźwigara głównego jako GL32 h. Warunki nośności dla I i II stanu granicznego zostały spełnione, przy założeniu klasy drewna dźwigara GL32h. Zbrojenie niniejszych założeń spełniających wymagania stanów granicznych to 10#16.

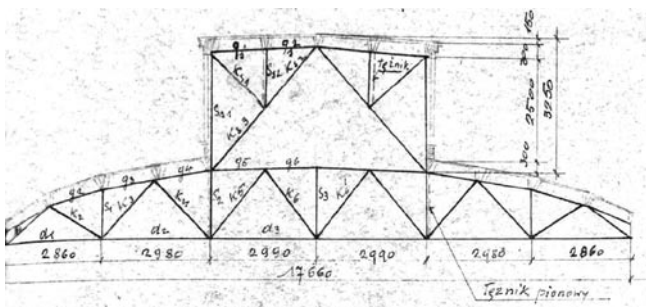
Przykład 2

Drugim analizowanym obiektem był dwunawowy budynek hali produkcyjnej wykonany w konstrukcji ramowej o powierzchni zabudowy 4400 m² (wymiarzy zewnętrzne w rzucie 36x92 m). Rozpiętość naw to 18 m (każda). Obiekt zrealizowano w roku 1968. Pionowe elementy nośne budynku tworzą podobnie jak w przypadku 1 słupy żelbetowe oraz niezależne ściany murowane. Obiekt ten przykryto dachem płaskim z dwoma świetlikami ulokowanymi w osiach naw. Konstrukcję przekrycia dachowego stanowią płyty panwio-we (według archiwalnego katalogu KB3-1.4.9(5) – 1966 r.) o wymiarach 149x587x30 cm, które pierwotnie pokryte zostały papą, natomiast aktualne pokrycie docieplono od zewnątrz termoizolacją z piany PUR z zewnętrzną powłoką hydroizolacyjną.



Rys. 2. Widok pokrycia i konstrukcji nośnej dachu





Rys. 3. Wiązar dachowy ze świetlikiem



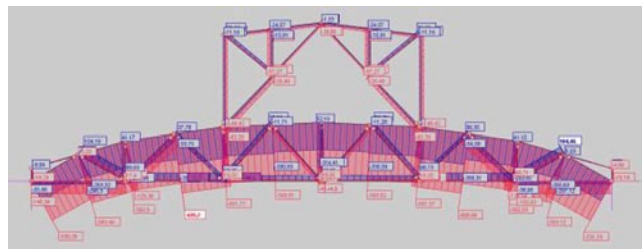
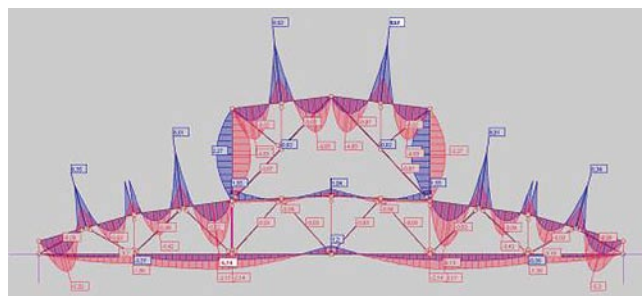
Rys. 4. Rozmieszczenie paneli fotowoltaicznych na połaci dachu (obciążenie balastowe – blokowe)

Archiwalny schemat statyczny wiązarów, zaczerpnięty z oryginalnej dokumentacji pochodzącej z 1966 r. pokazano na rysunku 3.

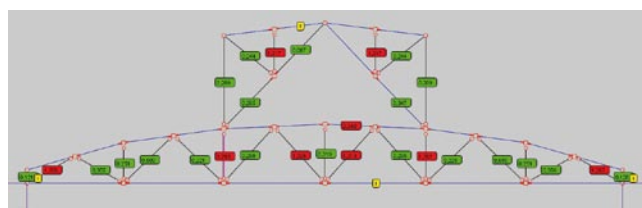
Projekt konstrukcji hali oparto na obliczeniach, wykonanych w 1966 r., dla których zastosowano jeszcze metodę naprężeń dopuszczalnych (powszechnie stosowaną do lat 50. XX w.). Do wydania opinii o stanie technicznym (nośności konstrukcji) posłużono się ww. obliczeniami w zakresie przyjęcia obciążeń od ciężaru własnego konstrukcji oraz warstw pokryciowych. Ponadto w zestawieniu obciążeń uwzględniono dodatkowo (poza wspomnianą wyżej instalacją fotowoltaiczną) obciążenie instalacją wewnętrzną (podwieszoną do dolnych pasów wiązarów), ciężar nierównomiernego rozkładu śniegu przy przegrodach, jakimi są świetliki, obciążenie wiatrem, które pominieli projektanci oraz ciężarem dodatkowego docieplenia zewnętrznego. Mając na uwadze odległość czasową pomiędzy okresem sporządzenia projektu a aktualnym sprawdzeniem nośności konstrukcji oraz nieaktualną już metodę jej wymiarowania uznano za stosowne posłużenie się tu pakietem wycofanych już norm polskich PN-B (w zakresie przyjęcia obciążeń i wymiarowania konstrukcji, używanych w latach 1962–2021), bliższych podejściu obliczeniowemu oraz czasowemu do etapu zaprojektowania i wykonania przedmiotowego obiektu niż normy europejskie. Zestawienie obciążeń przyjęto w oparciu o model zastosowany w przypadku 1. W celu sprawdzenia nośności konstrukcji posłużono się programem Rama R3D3 (Intersoft). Konstrukcja stalowa dachu została również zweryfikowana pod kątem porównania wymiarów projektowych z rzeczywistymi. Poniżej zamieszczono wybiórcze wyniki obliczeń.

W wyniku wymiarowania konstrukcji otrzymano mapę wytężeń, pokazaną na rysunku 6.

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że od ciężaru konstrukcji własnej, konstrukcji pokrycia i warstw izolacyjnych dachów stan graniczny nośności zostałby przekroczony o ok. 40% w pasie górnym (pręt zaznaczono na rysunku 6). Stan techniczny badanej konstrukcji uznano za niewskazujący na zagrożenie.



Rys. 5. Obwiednia momentów oraz sił osiowych



Rys. 6. Wytężenia prętów wiązara kratowego

Niemniej jednak obliczenia sprawdzające wskazały na brak możliwości dociążania dachu jakimkolwiek dodatkowym obciążeniem, bez wcześniejszego wzmocnienia prętów stalowych wiązarów kratowych. Ponad 50-letni okres eksploatacji obiektu jest sprawdzianem dla bezpieczeństwa jego konstrukcji, niemniej jednak dociążenie dodatkową instalacją w obecnym stanie może stanowić dla niego zagrożenie.

3. Dyskusja

W wyniku przeprowadzonych analiz dwóch różnych konstrukcji dachowych należy stwierdzić, że ich ustroje nośne nie dysponują wystarczającą nośnością do montażu na nich instalacji fotowoltaicznych. Bardzo przydatnymi okazują się tu dokumentacje archiwalne, których zazwyczaj brakuje zarówno dla obiektów starszych, jak i wykonanych w niedawnej przeszłości. Dysponowanie dokumentacją archiwalną nie zwalnia osób odpowiedzialnych za bezpieczeństwo obiektów od przeprowadzania przeglądów okresowych oraz analiz statyczno-wytrzymałościowych dla każdej zmiany przewidywanej dla konstrukcji, w tym jej dodatkowego obciążenia nawet z pozoru niewielkimi obciążeniami. Nie oznacza to, że na dachach starszych obiektów nie należy montować instalacji fotowoltaicznych. Wręcz przeciwnie, należy to robić po wcześniejszym sprawdzeniu ich konstrukcji nośnych i zaproponowaniu programu ewentualnych wzmocnień lub bardziej korzystnego jej rozłożenia na połaciach dachowych. W niniejszym artykule, w bardzo dużym skrócie, opisano dwa analizowane

przypadki konstrukcji dachowych, znajdujących się w różnych strefach klimatycznych na obszarze Polski, stąd też projekt montażu każdej takiej instalacji powinien uwzględniać lokalne warunki również pod kątem jej utrzymywania i trwałości w okresie eksploatacji, tj. możliwości jej czyszczenia nie tylko na eksponowanych powierzchniach, możliwość sprawdzania jej elementów łączących z konstrukcją dachu, a także wymaganego i bezpiecznego dostępu do niej.

Autorzy wnieśli o odszukanie archiwalnej dokumentacji konstrukcji (projektowej, technicznej lub odbiorowej), a w ostateczności w celu dokładniejszej analizy o przeprowadzenie badania mającego na celu ustalenie klasy drewna klejonego warstwowo (w niniejszym opracowaniu i obliczeniach przyjęto relatywnie niską klasę drewna). Ponadto w dostarczonej dokumentacji, nie ma informacji dotyczącej ilości oraz średnic zastosowanego zbrojenia. Sugeruje się wykonać badania niszczące. Przy założeniu klasy drewna klejonego warstwowo jako GL32h ustrój główny (dźwigar) oraz zbrojenie w słupach żelbetowych o polu 18,74 cm² spełnia wymagania stanów granicznych nośności oraz użyteczności. Autorzy artykułu dopuszczają wówczas montaż instalacji fotowoltaicznej.

4. Podsumowanie

Autorzy artykułu stoją na stanowisku, że każdą konstrukcję można przystosować do przeniesienia dodatkowych obciążeń, w tym obciążeń pochodzących od dodatkowych instalacji „wspierających” ochronę naturalnego środowiska człowieka. Nie jest problemem to, że w obiektach starszych nie uwzględniano takiego rodzaju obciążeń i należy tu podkreślić, że są one niewielkie. Oczywiście nie będzie to dotyczyło budynków i budowli znajdujących się w stanie krytycznym. Każda jednak decyzja o montażu instalacji fotowoltaicznych powinna być poprzedzona analizą techniczną oceniającą możliwość przeprowadzenia takich czynności, którą powinna wykonać osoba legitymująca się stosownymi uprawnieniami. Na całym świecie istnieje sporo obiektów starszych, o łącznych niezmiernych powierzchniach dachów, gdzie przy niewielkim nakładzie finansowym można uzyskać spore oszczędności energetyczne, nie inwestując w dodatkowe, nowe konstrukcje wsporcze dla tych instalacji.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Huynh A., Dias Barkokebas R., Al-Hussei, M., Cruz-Noguez C., Chen Y., Energy-Efficiency Requirements for Residential Building Envelopes in Cold-Climate Regions. *Atmosphere (Basel)* 12/2021, str. 405, doi:10.3390/atmos12030405
- [2] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/30/UE z dnia 19 maja 2010 r. w sprawie wskazania poprzez etykietowanie oraz standardowe informacje o produkcie, zużycia energii oraz innych zasobów przez produkty związane z energią
- [3] Fedorczyk-Cisak M., Efektywność energetyczna oraz niska emisja w krajowych i regionalnych uwarunkowaniach prawnych, *Materiały Budowlane* 1/2016, str. 22–24, doi:10.15199/33.2016.01.06
- [4] Kaczmarczyk M., Sowidzka A., Tomaszewska B., Energetic and Environmental Aspects of Individual Heat Generation for Sustainable Development at a Local Scale – A Case Study from Poland, *Energies (Basel)* 13, 2020, str. 454, doi:10.3390/en13020454
- [5] Zielona Księga – Europejska strategia na rzecz zrównoważonej, konkurencyjnej i bezpiecznej energii oraz zwiększenia konkurencyjności gospodarki
- [6] Ustawa z dnia 29 sierpnia 2014 r. o charakterystyce energetycznej budynków (Dz.U. poz. 1200 oraz z 2015 r., poz. 151)
- [7] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE z dnia 21 października 2009 r. ustanawiająca ogólne zasady ustalania wymogów dotyczących ekoprojektu dla produktów związanych z energią
- [8] Marrone P., Gori, P., Asdrubali F., Evangelisti L., Calcagnini L., Grazieschi G., Energy Benchmarking in Educational Buildings through Cluster Analysis of Energy Retrofitting. *Energies (Basel)* 11/2018, str. 649, doi:10.3390/en11030649
- [9] Rey-Hernández J., Velasco-Gómez E., Tejero-González A., Rey-Martínez F., Energy Analysis at a Near Zero Energy Building, A Case-Study in Spain. *Energies (Basel)* 11/2018, 857, doi:10.3390/en11040857
- [10] Dołęga W., Selected Aspects of National Economy Energy Efficiency, *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* 22, 2019, str. 19–32, doi:10.33223/epj/111987
- [11] Manfren M., Sibilla M., Tronchin L., Energy Modelling and Analytics in the Built Environment – A Review of Their Role for Energy Transitions in the Construction Sector, *Energies (Basel)* 14/2021, 679, doi:10.3390/en14030679
- [12] Sekki T., Airaksinen M., Saari A., Effect of Energy Measures on the Values of Energy Efficiency Indicators in Finnish Daycare and School Buildings, *Energy Build* 139, 2017, str. 124–132, doi:10.1016/j.enbuild.2017.01.005
- [13] Sikora M., Siwek K., Energy Audit of the Residential Building, *Journal of Mechanical and Energy Engineering* 2/2018, 317–328, doi:10.30464/jmee.2018.2.4.317
- [14] Firląg S., Cost-Optimal Plus Energy Building in a Cold Climate, *Energies (Basel)* 12/2019, str. 3841, doi:10.3390/en12203841
- [15] Piotrowska E., Borchert A., Energy Consumption of Buildings Depends on the Daylight. *E3S Web of Conferences* 14, 2017, str. 01029, doi:10.1051/e3sconf/20171401029
- [16] Michalak P., Szczotka K., Szymiczek J., Energy Effectiveness or Economic Profitability? A Case Study of Thermal Modernization of a School Building, *Energies (Basel)* 14/2021, 1973, doi:10.3390/en14071973
- [17] Yongtao L., Chao H., Xiuqin M., Fankun W., Co-Benefit Research on Energy Efficiency Reforming Project of District Heating System, *Energy Procedia* 5/2011, str. 598–603, doi:10.1016/j.egypro.2011.03.105
- [18] Goggins J., Moran P., Armstrong A., Hajdukiewicz, M. Lifecycle Environmental and Economic Performance of Nearly Zero Energy Buildings (NZEB) in Ireland, *Energy Build* 116, 2016, 622–637, doi:10.1016/j.enbuild.2016.01.016
- [19] Bajno D., Bednarz Ł., Grzybowska A., The Role and Place of Traditional Chimney System Solutions in Environmental Progress and in Reducing Energy Consumption, *Energies (Basel)* 14/2021, str. 4720, doi:10.3390/en14164720
- [20] Dec K., Broniewicz E., Broniewicz M., The Possibility Analysis of Adapting a Public Building to the Standard of a Building with a Zero Energy Balance. *Energies (Basel)* 13, 2020, str. 6389, doi:10.3390/en13236389
- [21] Księżopolski K., Drygas M., Pronińska K., Nurzyńska I., The Economic Effects of New Patterns of Energy Efficiency and Heat Sources in Rural Single-Family Houses in Poland, *Energies (Basel)* 13/2020, str. 6358, doi:10.3390/en13236358
- [22] Jezierski W., Sadowska B., Pawłowski K., Impact of Changes in the Required Thermal Insulation of Building Envelope on Energy Demand, Heating Costs, Emissions and Temperature in Buildings, *Energies (Basel)* 14/2020, str. 56, doi:10.3390/en14010056
- [23] Tews R., Grzybowska A., Bajno D., Operational Safety of Skeleton Frame Built Structures with a Low-Rigidity Covering, In *Proceedings of the IOP Conference Series, Materials Science and Engineering* 471, 2019
- [24] Bajno D., Grzybowska A., Tews R., Bednarz Ł., Back to the Past – The History and Current Modernisations of Kleinische Decke Ceiling 18, 2019
- [25] Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru
- [26] Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-3: Oddziaływania ogólne – Obciążenie śniegiem
- [27] PN-82/B-02001: Obciążenia budowli. Obciążenia stałe
- [28] PN-B-03150:1964: Konstrukcje drewniane – Obliczenia statyczne i projektowanie 1964