

# Bezpieczeństwo dachów hal wielkopowierzchniowych wykonanych w technologii prefabrykacji strunobetonowej w sytuacji wystąpienia niezamierzonego obciążenia

## Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki analiz porównawczych zachowania się dachów hal wielkopowierzchniowych poddanych niezamierzonym obciążeniom. W aspekcie bezpieczeństwa analizowano: wartość przeniesionego przez nośne elementy konstrukcyjne dachu dodatkowego obciążenia (ukrytego we współczynnikach obliczeniowych), poziom zapasu obciążenia zewnętrznego w funkcji wyłączenia elementu, a także zachowanie konstrukcji w przypadku wystąpienia wysokiego obciążenia termicznego (sytuacja pożarowa). Uzyskane wyniki, zarówno stanu granicznego nośności (SGN), stanu granicznego użytkowania (SGU) jak i analizy w wyjątkowej sytuacji obliczeniowej, wskazują na większy poziom bezpieczeństwa w użytkowaniu hal dachów wielkopowierzchniowych wykonanych w technologii strunobetonowej w odniesieniu do dachów wykonanych z zastosowaniem kratownic stalowych, które potraktowano jako konstrukcyjne elementy porównawcze.

## Słowa kluczowe:

prefabrykacja, dźwigary strunobetonowe, kratownice stalowe, deszcz, pożar

## Abstract

The article presents the results of comparative analysis of the behavior of roofs of large-scale halls subjected to unintended design loads. In terms of safety, the following aspects were analyzed: the ability of the load-bearing structural elements of the roof to handle an additional loads (not taken into account at the design phase), the level of external load reserves as a function of the element's effort, as well as the behavior of the structure in the situation of high thermal load (fire situation). The obtained results, both the ultimate limit state (ULS), the serviceability limit state (SLS) and the analysis in an exceptional situation, indicate a greater level of safety in the use of halls with large-area roofs constructed by using pre-stressed concrete technology, in comparison to roofs made using steel trusses, which were treated as comparative structural elements.

## Keywords:

prefabrication, pre-stressed concrete girders, steel truss girders, rain, fire

wiedzy na temat zmian klimatycznych, ich przyczyn, potencjalnych skutków i możliwości reakcji, wyraźnie wskazują wpływ czynników antropogenicznych na najbardziej rzadkie i najbardziej ekstremalne zdarzenia opadowe [1]. Obserwowane, zachodzące aktualnie oraz prognozowane na najbliższe dekady, zmiany częstości i intensywności opadów zmuszają do poważnych refleksji, a w konsekwencji przekładają się na konkretne wyzwania. Zarówno krótkotrwałe opady nawalne o małym najczęściej zasięgu terytorialnym, jak i długotrwałe opady deszczu o mniejszej intensywności, lecz o dużym zasięgu, mogą wywołać znaczące szkody w infrastrukturze urbanistyczno-przemysłowej [5]. Zmieniające się warunki atmosferyczne sprawiają, że obfite opady deszczu są w stanie realnie zagrozić nawet poprawnie zaprojektowanej konstrukcji, chociażby w przypadku kiedy odwodnienie dachu zawiedzie. W dalszej części artykułu taka sytuacja obliczeniowa została potraktowana jako dodatkowe, nieuwzględnione na etapie projektowania, obciążenie. W kontekście rozważań nad niezamierzonym obciążeniem konstrukcji równie istotne jest także obciążenie ekstremalnie wysoką temperaturą. Za taką niewątpliwie można uznać temperaturę przekraczającą 1000°C, która osiągana jest w przypadku wystąpienia wewnątrz budynku rozwiniętego pożaru. Z uwagi na fakt, że sytuacja ta niewątpliwie wpisuje się w podjętą w artykule tematykę bezpieczeństwa dachów hal wielkopowierzchniowych, która dodatkowo w przypadku zastosowania jako elementy nośne dźwigarów strunobetonowych silnie kontrastuje na tle kratowych dźwigarów stalowych, zdecydowano się tej tematyce poświęcić część niniejszej pracy.

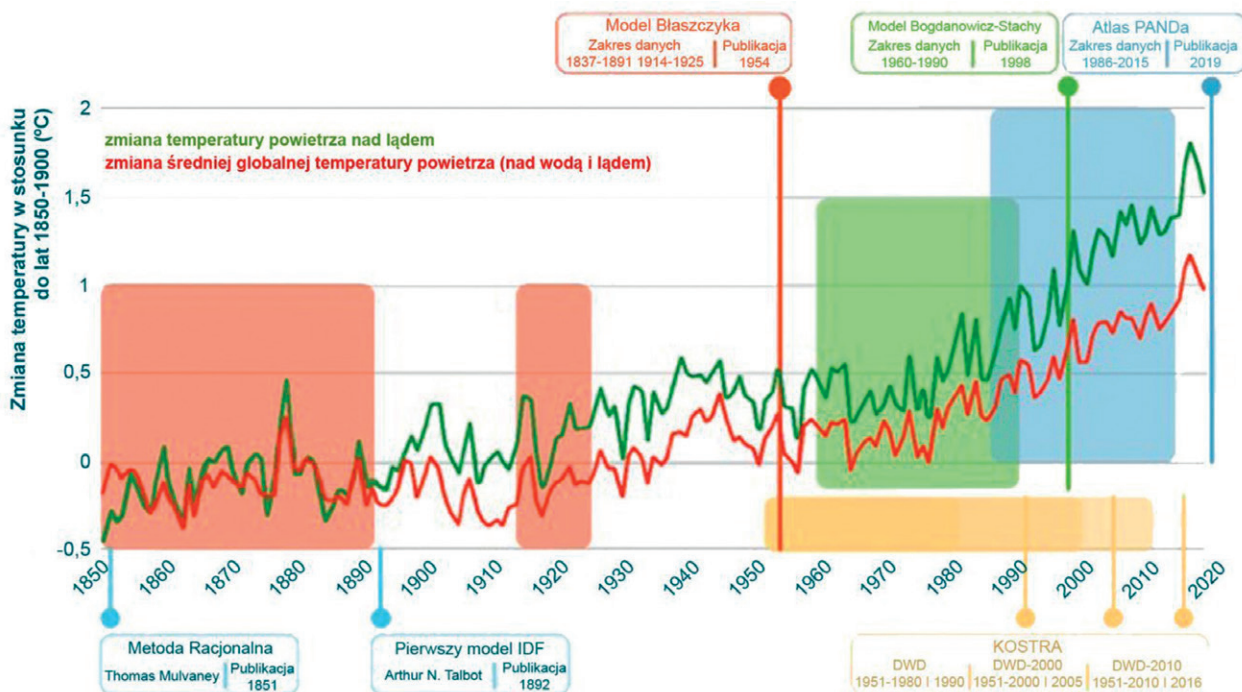
## 1. Wstęp

W ostatnich dziesięcioleciach udokumentowano dużą liczbę zdarzeń ekstremalnych opadów deszczu. W wyniku globalnego ocieplenia liczba rekordowych zdarzeń opadowych wzrosła znacząco, bo aż o 12% w wieloletniu 1981-2010 w porównaniu do wartości oczekiwanych z uwagi na naturalną wielodekadową zmienność klimatu [7]. Coroczny wzrost ekstremalnych zdarzeń opadowych jest wyraźnie powiązany z aktywnością człowieka. Przygotowywane i publikowane przez IPCC (ang. *Intergovernmental Panel on Climate Change*) kompleksowe raporty, dotyczące

## 2. Modele szacowania opadów deszczu

W Polsce najbardziej popularnym modelem opadowym, stosowanym przez dziesięciolecia, do sza-

Rys. 1. Modele i atlasy opadowe stosowane do wymiarowania systemu odwodnienia [7]



cowania intensywności opadów deszczu był model Błaszczyka [5], opublikowany w 1954 roku. Dalsze stosowanie modelu Błaszczyka, jako standardu, wpływa na zmniejszenie bezpieczeństwa projektowanych i modernizowanych systemów odwodnienia w Polsce [7], co przekłada się także na bezpieczeństwo użytkowania hal wielkopowierzchniowych. Nieaktualność modelu Błaszczyka [5] wynika przede wszystkim ze zmian rozkładów w czasie i przestrzeni ilości opadów, których głównym czynnikiem są silne zmiany klimatyczne [1]. W Niemczech znaczenie tego zagadnienia zostało zauważone trzydzieści lat temu, a jego rozwiązaniem jest aktualizowany systematycznie ogólnokrajowy atlas opadowy KOSTRA (niem. *KO-ordinierte STarkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertungen*). W Polsce standard ten został osiągnięty w ramach opracowania Polskiego Atlasu Natężeń Deszczów (PANDa) [7]. Na rysunku 1 przedstawiono zestawienie modeli opadowych stosowanych w praktyce do wymiarowania systemów odwodnienia w Polsce i Niemczech. Na rysunku przedstawiono obserwacje opadów i lata publikacji konkretnych modeli. Przedstawione dane wyraźnie pokazują aktualność konkretnych modeli na tle globalnych zmian temperatur według danych z raportu Climate Change and Land [2] opracowanego przez IPCC.

### 3. Charakterystyka analizowanego przykładu obliczeniowego

Przedmiotem niniejszej analizy jest porównanie dźwigarów strunobetonowych w odniesieniu do stalowych dźwigarów kratowych wraz z próbą identyfikacji zapasów bezpieczeństwa w optymalnie zaprojektowanych konstrukcjach. Analizie poddano dźwigary dachowe o rozpiętości w osiach równej 24,0 m oraz rozstawie układów poprzecznych równym 6,25 m. Obciążenia warstwami wykończeniowymi oraz obciążenie zmienne użytkowe przyjęto jak dla standardowych hal wielkopowierzchniowych. Obciążenia zmienne środowiskowe zebrano dla miejscowości Wrocław, zgodnie z normami PN-EN 1991-1-3 [N3] oraz PN-EN 1991-1-4 [N4]. Kratownica stalowa została zaprojektowana zgodnie z normą PN-EN 1993-1-1 [N7], z założeniem współpracy ściskanego pasa kratownicy z poszyciem wykonanym z blachy trapezowej (zabezpieczenie pasa ściskanego przed wyboczeniem). Dźwigar strunobetonowy został zaprojektowany zgodnie z normą PN-EN 1992-1-1 [N5]. Zebranie obciążeń zewnętrznych oddziałujących na dach hali zestawiono poniżej w tabeli 1.

Dla powyższych obciążeń zaprojektowano wyłożone na ok. 90% dźwigary dachowe: kratownicę stalową o wysokości równej 1,25 m oraz dwuspadowy dźwigar strunobetonowy o wysokości w kalenicach równej 1,10 m. Kratownica stalowa dobrana zgodnie z powyższym opisem ma masę ok. 1550 kg. Dźwigar strunobetonowy spełniający przyjęte w analizie założenia ma masę ok. 10600 kg. Norma PN-EN 1990 [N1] nakłada na obciążenia stałe konstrukcji współczynnik obliczeniowy o wartości równej 1,35. Wykonując elementy prefabrykowane (zarówno kratownica stalowa, jak i dźwigar strunobetonowy) w kontrolowanych warunkach produkcyjnych przytoczone masy są masami w przy-

Tab. 1. Zebranie obciążeń dachu hali wielkopowierzchniowej zlokalizowanej w miejscowości Wrocław

Nr	Rodzaj obciążenia	Obciążenie charakterystyczne $q_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Współczynnik obliczeniowy $\gamma_f$ [-]	Obciążenie obliczeniowe $q_d$ [kN/m <sup>2</sup> ]
<b>Obciążenia stałe</b>				
1.1	Warstwy wykończeniowe:		1,35	
	• membrana dachowa PCV	0,01		0,01
	• wełna mineralna 130 mm	0,15		0,20
	• folia PE	0,01		0,01
	• blacha trapezowa T130 (0,80 mm)	0,10		0,13
	<b>SUMA</b>	<b>0,27</b>		<b>0,36</b>
<b>Obciążenia zmienne (użytkowe)</b>				
2.1	Inst. wewnętrzne – podwieszane	0,15	1,50	0,23
2.2	Inst. fotowoltaiczna z podkonstrukcją	0,25		0,38
	<b>SUMA</b>	<b>0,40</b>		<b>0,60</b>
<b>Obciążenia zmienne (środowiskowe)</b>				
3.1	Śnieg (strefa 1) • dach płaski: nachylenie połaci 2%	kalenica: 0,56 kosz: 0,60	1,50	kalenica: 0,84 kosz: 0,90
3.2	Wiatr (strefa 1) *		1,50	
	• obszar dachu „+I” (parcie)	0,15		0,23
	• wew. podciśnienie (ssanie)	0,22		0,33
	<b>SUMA</b>	<b>0,37</b>		<b>0,56</b>

\*) obciążenie od wiatru wskazano tylko dla obszaru „+I” z uwagi na to, że jest to jedyny obszar zgodny co do zwrotu działania z obciążeniami grawitacyjnymi

bliżeniu dokładnymi (bez znacznych odchytek). W tym miejscu założono, że 35% dodatkowego obciążenia, jakie przyjmowane jest w kombinacji obliczeniowej dla ciężaru własnego konstrukcji, stanowi pewnego rodzaju ukryty zapas obliczeniowy. Po przeliczeniu tego zapasu na metr kwadratowy powierzchni dachu, w przypadku kratownicy stalowej mowa o wartości 3,6 kg/m<sup>2</sup>, natomiast w przypadku dźwigarów strunobetonowych mowa o wartości 24,3 kg/m<sup>2</sup>.

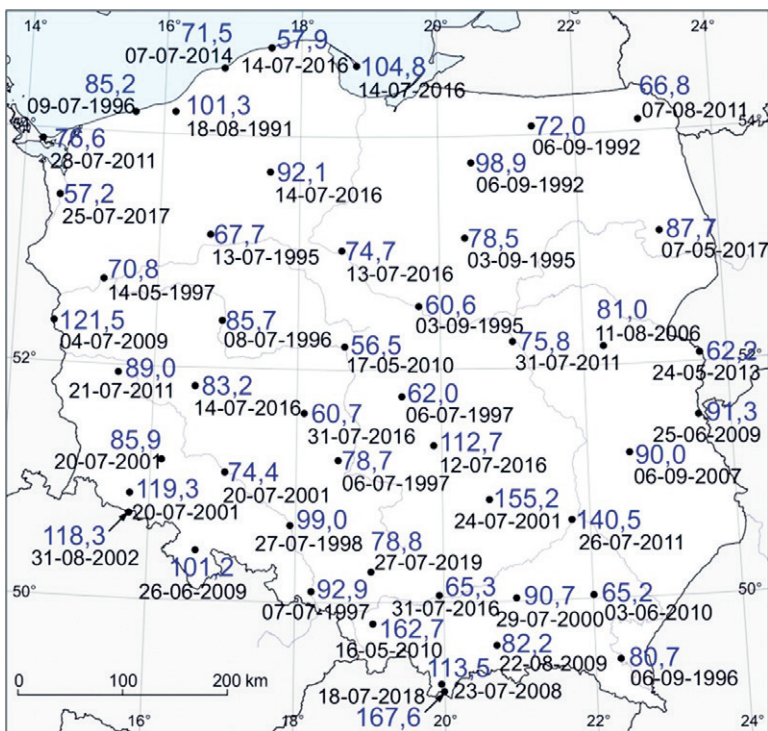
Jako uzupełnienie zestawienia obciążeń oddziałujących na dach hali wielkopowierzchniowej, w tabeli 2 zestawiono dane o maksymalnej wysokości opadów we Wrocławiu [5]. Wielkości te zostaną wykorzystane do analiz porównawczych przedstawionych w kolejnych częściach artykułu. Należy zaznaczyć, że dane z tabeli są zbieżne z danymi proponowanymi przez PANDA.

### 4. Dodatkowe obciążenie zewnętrzne

W wytycznych do projektowania konstrukcji, w wytycznych normowych, oddziaływanie ulewnego deszczu nie widnieje jako indywidualnie wyszczególnione (w porównaniu do np. śniegu, wiatru, obciążeń użytkowych). Efektem tego jest, w powszechnym podejściu, jego pomijanie, zarówno z uwagi na brak wytycznych normowych, jak i założenie *a priori*, że obciążenie to zawsze będzie miało

Tab. 2. Zmierzone maksymalne wysokości opadów  $h$  (w mm) we Wrocławiu w okresie 1960-2009 dla  $C = 2, 5, 10$  lat oraz czasu trwania opadu  $t$  (w min), przeliczonych na natężenie jednostkowe  $q$  [l/(s·ha)] [5]

t, min	C = 2 lata		C = 5 lata		C = 10 lata	
	Dane pomiarowe		Dane pomiarowe		Dane pomiarowe	
	h [mm]	q [l/(s·ha)]	h [mm]	q [l/(s·ha)]	h [mm]	q [l/(s·ha)]
5	8,0	266,7	9,3	310,0	9,9	330,0
10	11,0	183,3	13,8	230,0	15,7	261,7
15	13,9	154,4	<b>17,7</b>	196,7	20,1	223,3
30	17,9	99,4	26,7	148,3	28,2	156,7
60	20,2	56,1	30,5	84,7	34,7	96,4
120	25,6	35,6	35,4	49,2	36,2	50,3
360	35,2	16,3	38,7	17,9	43,9	20,3
720	40,8	9,4	49,2	11,4	54,2	12,5



Rys. 2. Maksymalna dobową sumę opadów z datą wystąpienia [mm stupa wody | kg/m<sup>2</sup>] [12]

mniejszą wartość niż obciążenie śniegiem. Taki stan rzeczy wydaje się słuszny w przypadku odpowiednio zaprojektowanego oraz sprawnego systemu odwodnienia dachu. Jednak nawet przy spełnieniu powyższych, w trakcie eksploatacji obiektu na połaci dachu w obrębie punktów zbiorczych mogą gromadzić się zanieczyszczenia wpływające na drożność systemu odwadniającego lub jak zauważa się w [N3], w niektórych przypadkach może dojść do zablokowania odwodnienia podczas topnienia i zamarzania śniegu. Taki stan rzeczy prowadzi do gromadzenia się wody na dachach hal wielkopowierzchniowych. W zależności od wielkości opadów atmosferycznych dodatkowe obciążenie zewnętrzne, wynikające z zalegającej na dachu wielkopowierzchniowej ilości wody, będzie się różnić. Traktując jako punkt odniesienia 15-minutowy opad deszczu o prawdopodobieństwie wystąpienia  $p = 20\%$  (w ciągu  $C = 5$  lat) dodatkowe obciążenie będzie równe  $17,7 \text{ kg/m}^2$  (tab. 2). Bazując na wyliczeniach dodatkowego zapasu, jaki generuje ciężar własny elementów konstrukcyjnych, można wnioskować, że obciążenie to mogłoby zostać przeniesione przez dźwigar strunobetonowy, natomiast spowodowałoby wyraźne przekroczenie przytoczonego zapasu w przypadku dźwigara stalowego.

Przy poprawnie zaprojektowanych elementach konstrukcyjnych dachu, w sezonie deszczowym

(czerwiec – wrzesień) zapasem obliczeniowym dla konstrukcji może być także niewystępujące w tym okresie, przyjmowane do obliczeń, obciążenie śniegiem. W analizowanym przypadku obciążenie to osiąga wartość ok.  $58 \text{ kg/m}^2$ . Jest to wartość znaczna, lecz jak wynika z przedstawionej na rysunku 2 mapy maksymalnej dobowej sumy opadów pochodzącej z Atlasu Klimatu Polski [12], w przeważającej części kraju wystąpiły historycznie takie dobowe opady, które przy braku skutecznego odwodnienia doprowadziłyby do wykorzystania tej wartości i przeciążenia konstrukcji. W tym miejscu należy podkreślić duże znaczenie poprawnie zaprojektowanego i działającego systemu odprowadzającego wodę z dachów oraz dodać, że dachy wykonane z dźwigarów strunobetonowych, w porównaniu do dachów wykonanych z kratownic stalowych, wykazują większy dodatkowy zapas równy  $20,6 \text{ kg/m}^2$ , co wskazano we wcześniejszej części artykułu. Wartość ta może mieć kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa obiektu.

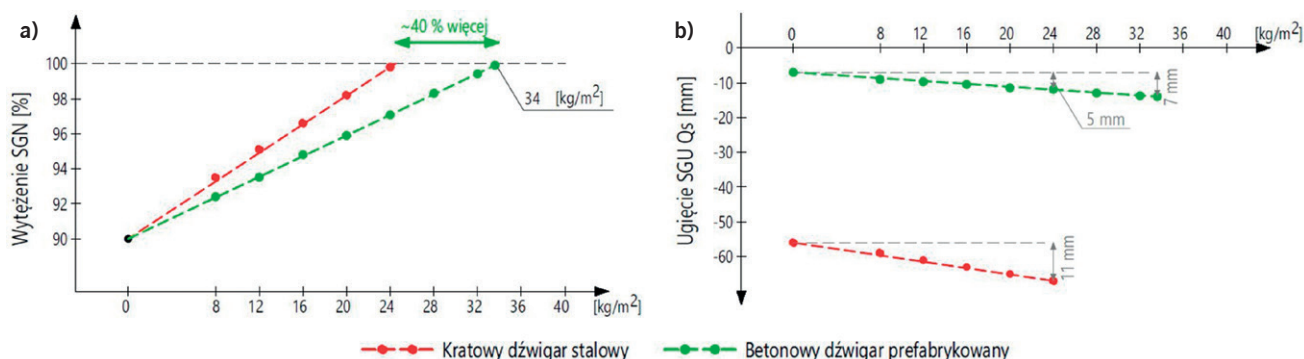
### 5. Zapas obciążenia zewnętrznego w funkcji wyęźnienia

W kolejnym kroku wykonano analizę porównawczą „bezwładności” dźwigarów dachowych, rozumianą jako zdolność do przyjęcia nowych, dodatkowych obciążeń w zależności od wykorzystania pierwotnego. W tym celu dźwigary, dobrane na ten sam zestaw obciążeń zewnętrznych, zostały zaprojektowane, aby ich wyęźnienie z uwagi na zginanie w Stanie Granicznym Nośności (SGN wzór 6.10 [N1]) było sobie równe i wynosiło ok.  $90\%$ . Następnie dokonywano zwiększenia obciążeń ze skolem  $4 \text{ kg/m}^2$  ( $25 \text{ kg/m}$ ).

Wyniki przeprowadzonej analizy przedstawiono na rysunku 3a. Dla analizowanych dźwigarów, wykorzystanie  $100\%$  w Stanie Granicznym Nośności osiągnięte jest odpowiednio przy dołożeniu dodatkowych  $24 \text{ kg/m}^2$  ( $150 \text{ kg/m}$ ) do dźwigara stalowego oraz  $34 \text{ kg/m}^2$  ( $212 \text{ kg/m}$ ) dla dźwigara strunobetonowego. Wzrost obciążenia zewnętrznego o tę samą wartość powoduje wyraźnie szybszy przyrost wyęźnienia kratownicy stalowej niż dźwigara strunobetonowego. Wartość różnicy „bezwładności” pomiędzy elementami wynosi ok.  $40\%$  na korzyść dźwigara strunobetonowego i będzie ona zbliżona, niezależnie od poziomu początkowego wykorzystania.

Na rysunku 3b pokazano porównanie wartości ugięcia dźwigarów (dla kombinacji Quasi-Stałej) wraz z pokazaniem ich przyrostu przy analogicznym wzroście obciążenia jak dla analizy SGN.

Rys. 3. Wykorzystanie nośności (a) oraz ugięcie w kombinacji QS (b) dźwigara dachowego wraz ze wzrostem dodatkowego obciążenia zewnętrznego



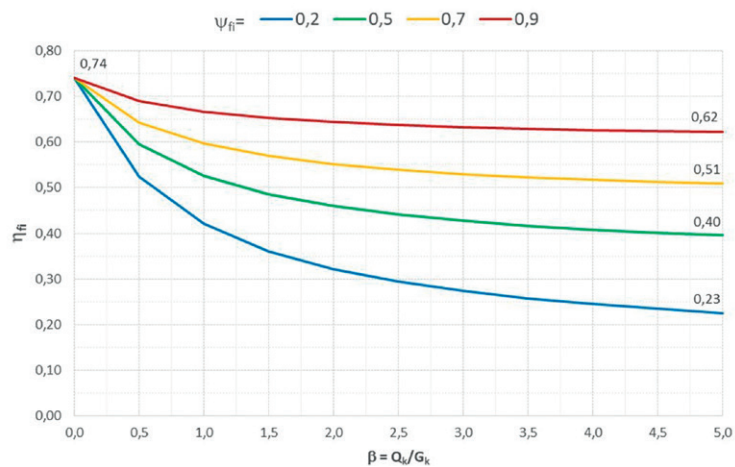
Ugięcie sprężonego dźwigara betonowego w sytuacji projektowej (początkowej) wynosiłoby 7 mm, natomiast po zwiększeniu obciążenia do wartości granicznej uzyskalibyśmy ugięcie finalne 14 mm. Analogiczna wartość dla elementu stalowego wynosiłaby 56 mm dla stanu początkowego i 67 mm dla końcowego, przy mniejszej wartości obciążeń dodatkowych. Dla takiej samej wartości dodatkowego obciążenia analizowany dźwigar stalowy charakteryzuje się blisko dwukrotnie większym przyrostem ugięcia niż sprężony element prefabrykowany.

## 6. Sytuacja pożarowa

Rozpatrując sytuację pożarową w halach wielkopowierzchniowych, należy zdawać sobie sprawę, że czym innym są wymagania wynikające z przepisów prawa [4], a czym innym oczekiwania inwestora czy ubezpieczyciela. Z prawnego punktu widzenia kluczowa w tym względzie jest klasa odporności pożarowej budynku, która zależy między innymi od gęstości obciążenia ogniowego strefy pożarowej budynku  $Q$  [ $\text{MJ}/\text{m}^2$ ] oraz od liczby kondygnacji. W większości przypadków hale są projektowane jako budynki o jednej kondygnacji nadziemnej, niemniej dosyć często w trakcie eksploatacji takich budynków zachodzi konieczność dobudowania wewnątrz hali dodatkowych pomieszczeń, np. dla najemców, co często prowadzi do zmiany kwalifikacji budynku na np. dwukondygnacyjny i wymusza cały szereg konsekwencji, co zostało opisane w artykule [6].

Gęstość obciążenia ogniowego jest w ocenianym przypadku kluczowa, gdyż reprezentuje ilość materiałów palnych w hali, a więc możliwą moc pożaru i ewentualne zagrożenie m.in. dla konstrukcji dachu. W ujęciu statystycznym, większość hal wykonywana jest jednak w klasie odporności pożarowej E lub D, co oznacza, że przepisy prawa [4] nie stawiają dla przekrycia oraz konstrukcji dachu konieczności spełnienia wymagań z zakresu odporności ogniowej. Wyjątkiem jest, gdy w hali o klasie odporności pożarowej D konstrukcję dachu uznaje się za główną konstrukcję nośną. W przypadku wyższych klas odporności pożarowej budynku wymagania z zakresu odporności ogniowej dla przekrycia i konstrukcji dachu są stawiane odpowiednio w zakresie R/RE 15 do R/RE 30, a w przypadku głównej konstrukcji nośnej nawet wyższe, co oznacza, że w przypadku kratowych elementów stalowych, charakteryzujących się stosunkowo niewielką masywnością, najczęściej trzeba stosować odpowiednie rozwiązania z zakresu biernych zabezpieczeń przeciwpożarowych. W przypadku elementów żelbetonowych, w tym sprężonych, strunobetonowych, najczęściej nie zachodzi taka konieczność, ponieważ waż elementy tego typu bez problemu uzyskują klasy odporności ogniowej R 30, R 60, a nawet wyższe. Uzależnione jest to od szerokości belki, średniej otuliny zbrojenia oraz grubości środnika w przypadku belek dwuteowych. Tablice nośności ogniowej takich elementów dostępne są w normie PN-EN 1992-1-2 [N6].

Warto zwrócić uwagę, że w przypadku konstrukcji dachowych, sprężonych, klasę odporności ogniowej otrzymujemy niejako w gratisie, nawet w przy-



Rys. 4. Zmienność współczynnika redukcyjnego obciążeń w warunkach pożarowych dla  $\psi_{fi} = 0,2; 0,5; 0,7; 0,9$ .

padku gdy nie jest ona prawnie wymagana, ale może być istotna np. dla najemcy czy ubezpieczyciela, co oznacza wyższy poziom bezpieczeństwa pożarowego bez konieczności ponoszenia dodatkowych kosztów.

W sytuacji pożarowej, podobnie jak w w/w przypadkach, proporcja obciążeń zmiennych do stałych również odgrywa istotną rolę. Z uwagi na większy ciężar dachowych elementów strunobetonowych od kratowych dźwigarów stalowych, proporcja obciążeń zmiennych, w tym wyjątkowych związanych z nagłymi opadami, do obciążeń stałych jest korzystniejsza (mniejszy procent w całości obciążeń) i jak wykazano powyżej wpływa znacząco na poziom bezpieczeństwa.

W sytuacji ogniowej ta proporcja ma wpływ na wartość współczynnika redukcyjnego. Zgodnie z postanowieniami normy PN-EN 1991-1-2 [N2], w sytuacji, gdy nie zachodzi konieczność uwzględniania pośrednich oddziaływań pożaru, przy wyznaczaniu współczynnika redukcyjnego dla obliczeniowego obciążenia w przypadku pożaru  $\eta_{fi}$  można stosować uproszczone metody. Wartość tego współczynnika związana jest m.in. z proporcją obciążeń zmiennych do stałych, kategorią użytkowania, a w przypadku dachu z obciążeniami pochodzenia klimatycznego. Wartości tego współczynnika w zależności od współczynnika  $\psi_{fi}$  równego  $\psi_1$  (wartość częsta) przedstawiono na rysunku 4. Wyraźnie można dostrzec, że redukcja obciążeń może przekroczyć w większości przypadków 35% ( $\eta_{fi} = 0,65$ ), a w przypadku dachów, gdzie redukcja obciążeń śniegiem i wiatrem jest bardzo duża, można osiągnąć nawet ponad 60% ( $\eta_{fi} = 0,40$ ), co odgrywa kluczową rolę przy wyznaczaniu nośności ogniowej konstrukcyjnych elementów dachowych.

Wspomniany poziom obciążeń przekłada się oczywiście na temperaturę krytyczną. Jeśli nie prowadzi się szczegółowych analiz, to można przyjmować następujące wartości temperatury krytycznej:  $\theta_{cr} = 500^\circ\text{C}$  – dla betonu,  $500^\circ\text{C}$  – dla stali zbrojeniowej,  $400^\circ\text{C}$  – dla stali sprężającej (pręty zbrojenia) oraz  $350^\circ\text{C}$  – dla stali sprężającej (sploty i ciągnia). W przypadku konstrukcji stalowych można przyjmować temperaturę krytyczną elementów o przekroju 4 klasy na poziomie  $350^\circ\text{C}$ , a w pozostałych przypadkach w zakresie  $450\text{--}550^\circ\text{C}$  dla elementów o niewielkiej masywności, jakie najczęściej wykorzystuje się w stalowych dźwigarach

### Bibliografia

- N1 PN-EN 1990:2004 Eurokod – Podstawy projektowania konstrukcji
- N2 PN-EN 1991-1-2:2006 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-2: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru
- N3 PN-EN 1991-1-3:2005 Eurokod 1 – Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-3: Oddziaływania ogólne – Obciążenie śniegiem
- N4 PN-EN 1991-1-4:2008 Eurokod 1 – Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru
- N5 PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2 – Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- N6 PN-EN 1992-1-2:2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-2: Reguły ogólne – Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe
- N7 PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3 – Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
1. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Zespół redakcyjny: H. Lee, J. Romero]. IPCC 2023, Genewa, Szwajcaria, 184 strony,

2. IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems, Summary for Policymakers, 2019,
3. Katastrofy budowlane w 2021 roku, Główny Inspektorat Nadzoru Budowlanego, [Nadzór nad opracowaniem: Dłużniewski A.], Warszawa 2022,
4. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (z późniejszymi zmianami),
5. Kotowski A., Kaźmierczak B., Dancewicz A., Modelowanie opadów do wymiarowania kanalizacji, Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Warszawa 2010,
6. Krupa R., Sulik P., Formalno-techniczne aspekty projektowania dwukondygnacyjnych biur w wielkokubaturowych halach magazynowych, Materiały Budowlane 6/2017,
7. Licznar P., Zaleski J., redaktorzy. Metodyka opracowania Polskiego Atlasu Natężenia Deszczów (PANDa). Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy; 2020. (Licznar P., Zaleski J. Seria publikacji naukowo-badawczych IMGW-PIB)
8. Roszkowski P., Sulik P., Wymagania dotyczące bezpieczeństwa pożarowego przekryć dachowych o powierzchni większej niż 1000 m<sup>2</sup>, Materiały Budowlane 2/2017,
9. Runkiewicz L., Sieczkowski J., Czynniki atmosferyczne i środowiskowe wpływające na zagrożenia, awarie i katastrofy obiektów budowlanych, Przegląd Budowlany, 10/2017,
10. Sulik P., Roszkowski P., Bezpieczeństwo pożarowe dachów: Reakcja na ogień i rozprzestrzenianie ognia przez dachy – cz. 1, Inżynier Budownictwa 4/2015, s. 104-109,
11. Sulik P., Roszkowski P., Bezpieczeństwo pożarowe dachów: Odporność ogniowa dachów – cz. 2. Inżynier Budownictwa, nr 5/2015, s. 90-97,
12. Tomczyk A.M., Bednorz E., Atlas klimatu Polski (1991-2020), Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań 2022

kratowych. Kluczową rolę dla nośności ogniowej w obydwu przypadkach odgrywa temperatura elementów stalowych, przy czym należy pamiętać, że w konstrukcjach żelbetonowych, w tym strunobetonowych, ciężna stalowa są chronione otuliną betonową, a w przypadku konstrukcji stalowych takiego naturalnego zabezpieczenia nie ma i dlatego częściej stosuje się dedykowane bierne zabezpieczenia ogniochronne.

Więcej szczegółowych informacji dotyczących bezpieczeństwa pożarowego dachów, w tym hal wielkopowierzchniowych można znaleźć w pracach [8, 10, 11].

## 7. Podsumowanie

W Polsce rocznie ma miejsce około 500 katastrof budowlanych. Według danych Głównego Inspektora Nadzoru Budowlanego, w 2021 r. obiekty budowlane, które uległy katastrofom – w podziale na rodzaje: 4,9% to budynki magazynowe, a 1,5% obiekty przemysłowe [3]. Mając na uwadze dynamikę oraz coraz częstsze występowanie na naszym terenie (Europa Środkowa) gwałtownych zjawisk atmosferycznych, zasadne jest poświęcenie tym zjawiskom należytej uwagi. Jak zauważają autorzy pracy [9], wśród przyczyn wywołujących katastrofy budowlane występują wpływy atmosferyczne i środowiskowe. W Polsce na pierwszym miejscu [9] najbardziej destrukcyjnymi czynnikami są m.in.: powódzie, wiatry huraganowe i opady. Świadome odbieranie czynników zewnętrznych występujących w związku ze zmieniającym się klimatem zmusza do przeanalizowania sytuacji obliczeniowej niezamierzonego obciążenia wynikającego z gwałtownych opadów deszczu.

Przedstawione w niniejszym artykule analizy pozwalają uznać dźwigary strunobetonowe za wyraźnie odporniejsze na niekontrolowane przeciążenia niż kratownice stalowe. Dachy wielkopowierzchniowe wykonane w technologii strunobetonowej charakteryzują się dużą bezwładnością oraz stabilnością, co przekłada się na wzrost zapasów bezpieczeństwa użytkowania takich obiektów.

Wykonana analiza wyraźnie pokazuje, że dach wielkopowierzchniowy wykonany w technologii strunobetonowej charakteryzuje się ponadziesięciokrotnie większym ukrytym zapasem bezpieczeństwa wynikającym z zastosowanych współczynników obliczeniowych dla ciężaru własnego dźwigarów dachowych. Dodatkowy zapas obciążenia dla dźwigara strunobetonowego w stosunku do dźwigara stalowego stanowi w analizowanym przypadku 3105 kg/element (20,6 kg/m<sup>2</sup> dachu). Ponadto wykazano wyraźnie większą bezwładność dachu wykonanego z zastosowaniem dźwigarów strunobetonowych jako elementów konstrukcyjnych, w odniesieniu do dźwigarów stalowych. Wzrost obciążenia zewnętrznego o tę samą wartość powoduje wyraźnie szybszy przyrost wyężenia kratownicy stalowej niż dźwigara strunobetonowego. Przy wzroście wyężenia w SGN o tę samą wartość, do dźwigara strunobetonowego można dotożyć około 40% obciążenia więcej niż ma to miejsce w przypadku analizowanej kratownicy stalowej.

Bezpieczeństwo pożarowe dachów hal wielkopowierzchniowych zależy od wielu czynników, w tym klasy odporności pożarowej budynku czy od rodzaju zastosowanej konstrukcji. Zarówno w przypadku elementów stalowych, jak i żelbetonowych, strunobetonowych, możliwe jest spełnienie wymagań w zakresie odporności ogniowej, przy czym w przypadku elementów stalowych zazwyczaj trzeba stosować dodatkowe zabiegi podnoszące klasę odporności ogniowej elementu, podczas gdy w przypadku elementów strunobetonowych, z uwagi na ich budowę i osłonę najbardziej wrażliwych elementów stalowych betonową otuliną, otrzymujemy ją bez dodatkowych zabiegów.

**dr inż. Szymon Wojciechowski<sup>\*)</sup>**

**mgr inż. Łukasz Józefczyk**

**PEKABEX BET SA, Dział Badań i Rozwoju**

**dr inż. Paweł Sulik**

**Instytut Techniki Budowlanej**

**Zakład Badań Ogniowych**

**\*) autor korespondencyjny:**

**szymon.wojciechowski@pekabex.pl**

