

Układy nośne portalowych i wspornikowych wiat wolno stojących

Efektywne kształtowanie konstrukcji wiat wolno stojących wymaga zastosowania dachu przewieszonego i jest szczególnie zależne od wyboru rozwiązania układu płatwiowego.

Wiaty wolno stojące stały się w ostatnim czasie rozwiązaniami często proponowanymi w koncepcjach architektonicznych wielu nowych przedsięwzięć budowlanych. Zazwyczaj wykorzystywane są jako zadaszenia stref parkowania lub konstrukcje wsporcze pod instalacje fotowoltaiczne.

Na rynku najczęściej oferowane są rozwiązania systemowe o bardzo podstawowej architekturze oraz o nadmiernie prostych i zupełnie nieefektywnych rozwiązaniach konstrukcyjnych. Oba aspekty, a szczególnie konstrukcyjny, można w znacznym stopniu poprawić.

SYSTEMATYZACJA UKŁADÓW KONSTRUKCYJNYCH WIAT I ZADASZEŃ

Ze względu na sposób wykorzystania (obiekty uzupełniające) wiaty i zadaszenia najczęściej przylegają do innego budynku albo mają konstrukcję niezależną i są usytuowane w niewielkiej odległości od niego. Rozwiązanie, w którym obiekt bezpośrednio przylega do budynku głównego, określa się najczęściej jako zadaszenie. Obiekt o usytuowaniu niezależnym zwykle określa się jako wiatę. Z uwagi na lokalizację wiaty względem budynku i sposób ich połączenia można wyróżnić trzy zasadniczo różne podejścia do konstruowania wiaty. Pierwszym typem są **zadaszenia całkowicie oparte na budynku**, do którego przylegają. Najczęściej są to zadaszenia o niewielkiej powierzchni, zakotwione w zewnętrznej ścianie nośnej budynku. Przy większej powierzchni wymagają odpowiedniego przygotowania konstrukcji nośnej budynku.

Drugim typem są **zadaszenia częściowo oparte na budynku** oraz w części na konstrukcji własnej. Połączenie zadaszenia

dr inż. Łukasz Supel

Politechnika Łódzka
Wydział Budownictwa, Architektury
i Inżynierii Środowiska,
Katedra Mechaniki Konstrukcji

ze ścianą budynku zapewnia skuteczne podparcie zapobiegające przechyłowi podłużnemu i poprzecznemu. W konstrukcjach, w których rezygnuje się ze ścian, zapewnienie odpowiedniej sztywności przeciwdziałającej przechyłowi jest szczególnie trudne. Otwarcie boczne obiektu utrudnia, a często wręcz uniemożliwia usytuowanie pionowych układów stężających.

Przy wykorzystaniu ściany do podparcia wiaty na kierunku pionowym możliwe są dwa przypadki. Jeśli ściana ma wystarczającą nośność, to po jej stronie eliminuje się słupy i fundamenty zadaszenia. W przeciwnym przypadku układ słupów zadaszenia wykonuje się tak, aby siły pionowe w całości lub przynajmniej w większej części zostały przejęte przez konstrukcję własną. Wówczas oparcie zadaszenia na ścianie wykorzystuje się jedynie do stabilizacji bocznej układu.

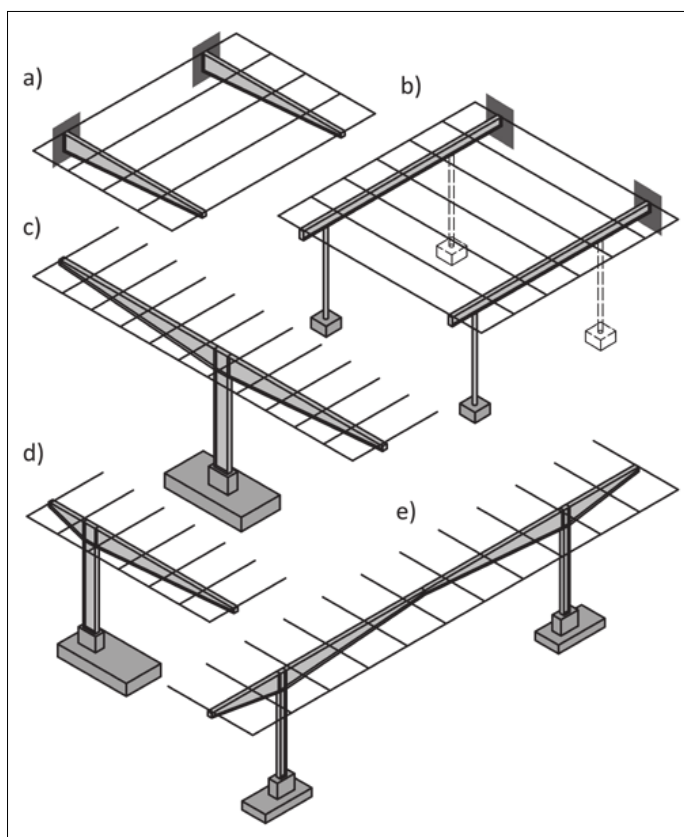
Trzeci typ rozwiązania to **wiata wolno stojąca** (o konstrukcji niezależnej), która jest najbardziej wymagająca. Układ konstrukcyjny wiaty musi w całości zapewnić odpowiednią sztywność i nośność ze wszystkich stron działania sił i wystąpienia potencjalnych przemieszczeń. Odrębnej uwagi wymagają kierunki: pionowy grawitacyjny, pionowy unoszący, przechyłowy poprzeczny i przechyłowy podłużny [1, 3, 4]. W tym celu specjalizuje się wyodrębnione podukłady konstrukcyjne nośne lub stężające. Wiaty wolno stojące dzieli się na dwa typy rozwiązań konstrukcyjnych. Pierwszy typ to wspornikowe, jedno- i dwustronne. Są one oparte

na fundamentach usytuowanych w jednej linii, a ramy złożone są w całości z elementów wspornikowych. Układy te korzystnie wyróżniają się architektonicznie i są wygodne pod względem użytkowym, ale są za to drogie i bardzo wymagające konstrukcyjnie. Nawet przy niewielkich rozmiarach dachu konstrukcja nośna wymaga zastosowania dużych przekrojów oraz masywnego układu fundamentowego.

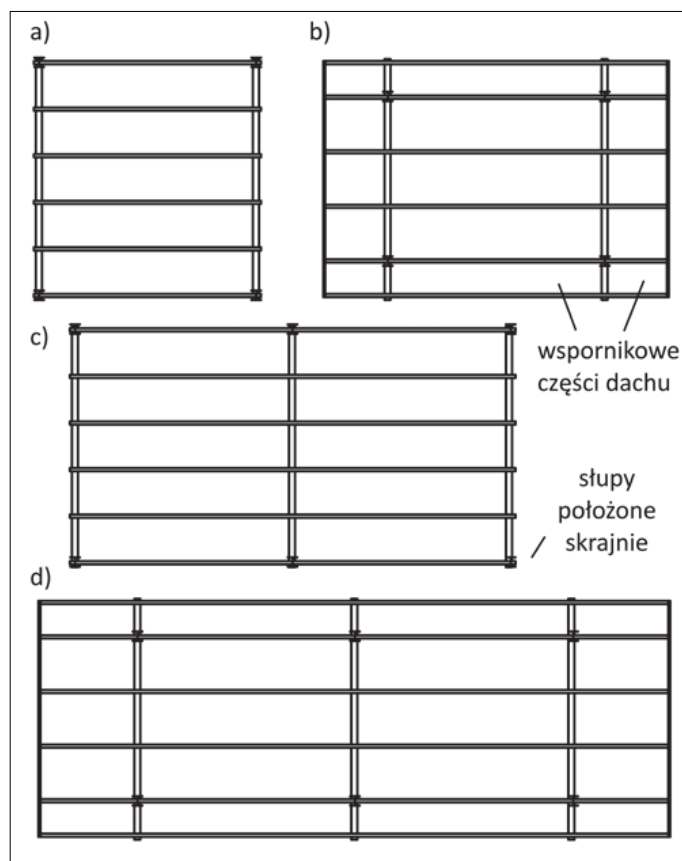
Drugim typem wiat wolno stojących są **wiaty portalowe**. Mogą one być jedno- lub wielonawowe. W tym rozwiązaniu stosuje się układ słupów i fundamentów usytuowany w dwóch lub większej liczbie równoległych względem siebie linii. Wykorzystuje się ramy portalowe o prostym obrysie albo ze wspornikowymi wysięgami rygli. Wiaty portalowe przeznaczone są do dachów o większej powierzchni i rozpiętości. Podparcie wiaty na słupach rozmieszczonych w kilku liniach istotnie zmniejsza wielkość konstrukcji części naziemnej, ale często utrudnia wygodne użytkowanie obiektu, np. w przypadku wiat parkingowych.

PŁATWIE – PODŁUŻNY, BELKOWY UKŁAD NOŚNY WIATY

Dobór układu płatwiowego jest kluczowy w procesie racjonalnego i efektywnego kształtowania wszystkich podukładów konstrukcyjnych wiaty. Charakterystyczna dla wiat geometria obiektu i jego dachu daje poszerzone możliwości wyboru różnych rozwiązań układu płatwiowego. Niestety wielu z tych rozwiązań prawie w ogóle się nie stosuje. Warto jest do tego problemu podejść z pewną otwartością, a niekoniecznie zgodnie z powszechnie utartymi schematami.



Rys. 1. Rodzaje rozwiązań wiat: a) zadaszenie całkowicie oparte na budynku, b) zadaszenie częściowo oparte na budynku, c-e) wiaty wolno stojące wspornikowe i portalowe



Rys. 2. Geometria wiaty wolno stojącej: a) i c) rozwiązania podstawowe, b) i d) dachy wspornikowo wysunięte

W rozumieniu teorii projektowania konstrukcji najistotniejszą cechą układów optymalnych jest jednorodność wykorzystania materiału. Przy świadomym kształtowaniu konstrukcji płatwi, tj. doborze jej schematu statycznego, miejsc i sposobów łączenia, możliwe jest równomierne wykorzystanie płatwi albo równomierne dystrybuowanie obciążeń z dachu na wszystkie ramy. **Masa poprzecznych układów nośnych i ich fundamentów w większym stopniu zależy od schematu statycznego płatwi niż od schematu statycznego ram.**

W konstrukcji wiaty obciążenie przechodzi w całości kolejno przez kilka podukładów (układ szeregowy konstrukcji). Deformacja całego układu jest sumą deformacji jego podukładów, a nośność konstrukcji jest ograniczona do nośności jej najsłabszej części. Układ płatwiowy jako pierwszy w całości przejmuje obciążenia z połaci dachowej i w całości przekazuje je dalej na ramy poprzecznych układów nośnych. **Tym samym to wyłącznie sche-**

mat statyczny płatwi decyduje o tym, czy obciążenia na poszczególne ramy zostaną rozdzielone jednorodnie (rozwiązania rzadko spotykane) czy niejednorodnie (rozwiązania powszechnie stosowane).

W przypadku wiat znacznie łatwiej jest zastosować efektywne schematy statyczne płatwi niż w przypadku hal zamkniętych. W obiektach otwartych bocznie szczególnie korzystne jest to, że często nie ma konieczności czy uzasadnienia usytuowania słupów i ram skrajnych po obrysie dachu. Pozwala to na zastosowanie wysunięć wspornikowych, korzystnych zarówno w układach płatwiowych, jak i ramowych. W takich wiatach można znacząco zmniejszyć masę całkowitą konstrukcji względem układów, w których słupy i skrajne ramy są usytuowane po obrysie dachu. Co zaskakujące, **mniejszą masę konstrukcji uzyskuje się nie tylko przy porównywaniu wiat o jednakowej wielkości dachu, ale również wtedy, kiedy zachowuje się pierwotny rozstaw słupów, a powierzchnię dachu zwiększa się o połacie wysunięte wspornikowo.**

Choć wiat ma znacznie większy dach, to ma lżejszą konstrukcję. Jest to szczególnie korzystne, gdy konieczne jest zachowanie rozstawu słupów, np. w przypadku wiat parkingowych. Dachy wysunięte wspornikowo warto jest zastosować w przypadku wiat farm fotowoltaicznych, gdy przestrzeń zasłonięta przez dach często nie ma charakteru użytkowego, a słupy można rozmieszczać zupełnie swobodnie, oraz w przypadku wiat parkingowych, w których dach ma po bokach dodatkowe zadaszenie chroniące przed opadami.

PODSTAWOWE ROZWIĄZANIA UKŁADÓW PŁATWIOWYCH WIAT

Aby poznać możliwości bardziej zaawansowanego kształtowania płatwi wiat, warto w pierwszej kolejności omówić standardowe i najczęściej stosowane schematy statyczne, ich mocne strony oraz wady. Przy odpowiednich modyfikacjach wady można ograniczyć lub zupełnie wyeliminować. Korzystne modyfikacje zostaną omówione dalej.

Schematy statyczne płatwi pełnościennej dobiera się w pierwszej kolejności na podstawie przyjętego typu przekroju. Płatwie dachowe wykonuje się z kształtowników walcowanych albo profilowanych na zimno. W przypadku kształtowników walcowanych stosuje się dwuteowniki równoległosienne IPE lub przekroje zamknięte prostokątne RHS. Natomiast jako kształtowniki profilowane na zimno sto-

suje się głównie zetowniki, przy czym równie skuteczne są ceowniki sigma. Ceowniki standardowe są niekorzystne w przypadku znacznych oddziaływań unoszących.

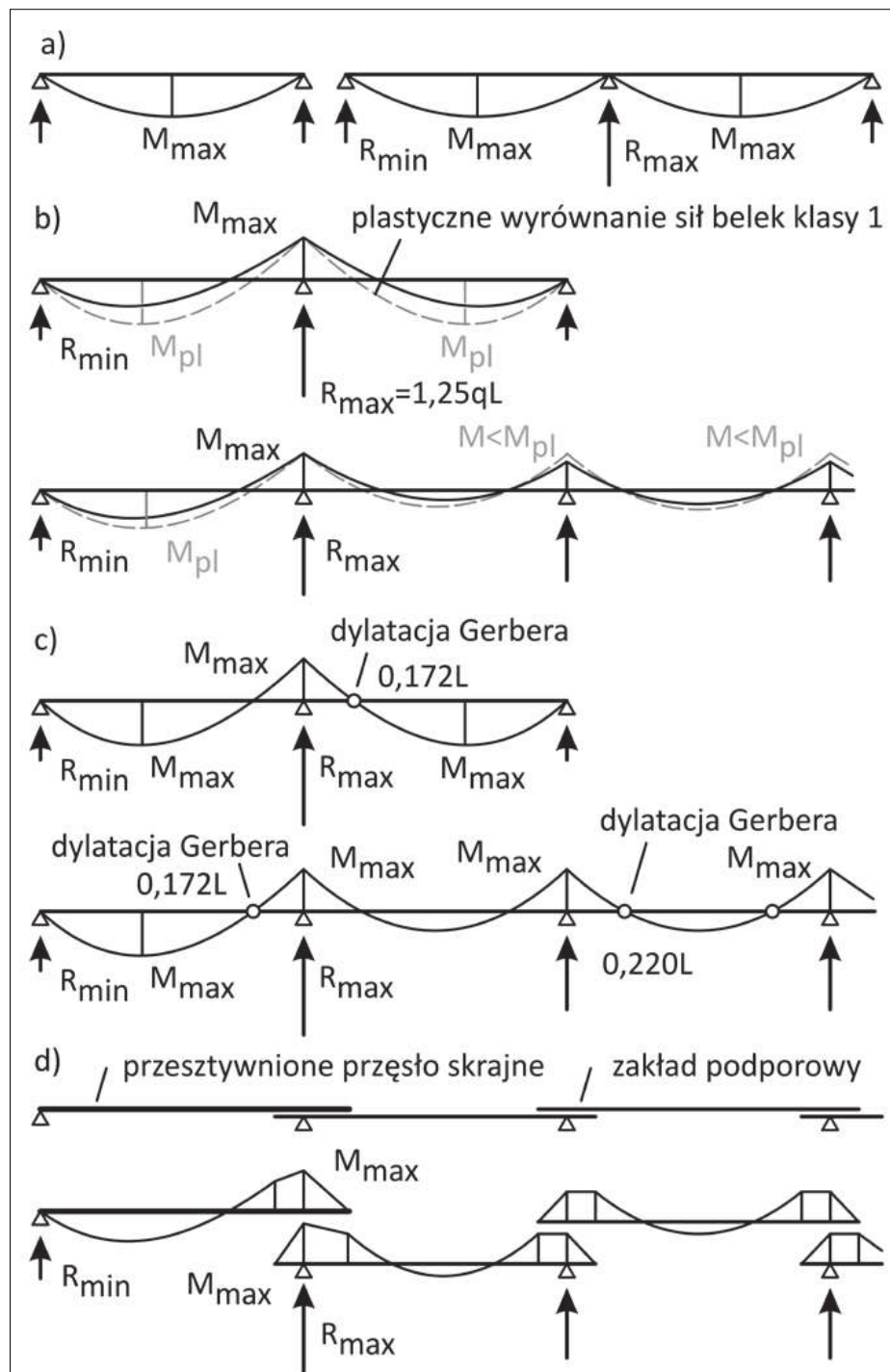
Drugim kryterium branym pod uwagę przy doborze konstrukcji dachu wiaty jest rodzaj poszycia. Najczęściej stosuje się poszycie z blachy fałdowej. Jest to rozwiązanie praktyczne i najsukursniejsze pod względem konstrukcyjnym. W rozwiąza-

niach, w których priorytetowy jest aspekt wizualny czy reprezentacyjny, wykorzystuje się poszycie ze szkła hartowanego. Do tego rodzaju poszycia należy również zaliczyć panele fotowoltaiczne mocowane bezpośrednio do rusztu konstrukcji dachu. W najtańszych rozwiązaniach stosuje się transparentne panele polimerowe.

Reguły racjonalnego doboru belek z kształtowników walcowanych i profilowanych na zimno różnią się całkowicie. Belka z kształtownika walcowanego na gorąco jest najbardziej efektywna przy zupełnie innym schemacie statycznym niż belka z kształtownika profilowanego na zimno. W przypadku obu rozwiązań spotyka się wiele opinii czy utartych przekonań odnośnie do optymalnych sposobów ich kształtowania. Niestety, nie zawsze są to opinie uzasadnione. **Belki o schematach statycznych, powszechnie uznawanych za najbardziej efektywne, często można skutecznie poprawić pod względem osiąganego obciążenia granicznego zarówno w stanie granicznym nośności (ULS), jak i użytkowości (SLS).** Przy odpowiedniej modyfikacji, czasami nawet zupełnie niewielkiej, zmiana obciążenia granicznego może być znaczna. Wybór racjonalnego rozwiązania może być inny nawet w przypadku różnych typów kształtowników walcowanych: dwuteownika i rury prostokątnej. **Rury prostokątne są rozwiązaniem najbezpieczniejszym w przypadku poszycia ze szkła hartowanego.**

Standardowym schematem statycznym płatwi jest układ jedno- lub wieloprzęsłowy, bez przewieszów wspornikowych skrajnych przęseł. Do tego przypadku zalicza się również płatwie z przewieszami wspornikowymi o niewielkim wysięgu, stosowanym dla ułatwienia montażu.

Podstawowym schematem statycznym jest **układ jednoprzęsłowy** (rys. 3a). Wykorzystywany jest najczęściej w wiatkach o najprostszym kształcie, gdy pod względem geometrycznym jest jedynym możliwym rozwiązaniem. Niestety równie często jest wybierany z powodu niewymagającego podejścia do projektowania. Jego zaletą są proste do wykonania połączenia



Rys. 3. Podstawowe schematy statyczne płatwi

przegubowe, równomierny rozkład reakcji oraz, wbrew powszechnym opiniom, duże obciążenie graniczne ULS. Wadą jest mała sztywność i niskie obciążenie graniczne SLS. Dysproporcja obciążeń granicznych ULS i SLS jest na tyle duża, że nie pozwala w pełni wykorzystać nośności. W efekcie niemal zawsze trzeba stosować belki jednoprzęsłowe o zwiększonym przekroju, a rozwiązanie, choć proste w realizacji, staje się niestety drogie. Nieco inny schemat stanowią belki jednoprzęsłowe połączone przegubowo w układ o wielu przęsłach, czyli **zwielokrotniony układ jednoprzęsłowy**. Pojawia się tutaj problem znacznej różnicy reakcji przekazywanych na ramy skrajne i wewnętrzne. W wiatach zazwyczaj nie różnicuje się między sobą ram i ich fundamentów. Ich dobór zależy zatem od maksymalnej reakcji przekazywanej z płatwi. Efektywność poprzecznych układów nośnych jest zależna od różnicy pomiędzy minimalną a maksymalną reakcją przekazywaną z płatwi. Ramy skrajne i ich fundamenty są wykorzystane tylko w połowie. Duża część masy poprzecznego układu nośnego (powszechne określenie: konstrukcja główna) jest wykorzystana niejednorodnie, więc nieefektywnie.

Największym problemem płatwi jednoprzęsłowych jest ich nadmierne uginanie się pod obciążeniem (problem SLS, nie ULS), dlatego zwielokrotnione układy jednoprzęsłowe zastępuje się **układami ciągłymi wieloprzęsłowymi** (rys. 3b).

Wykazują one znacznie zwiększone obciążenie graniczne SLS (zależnie od liczby przęseł od 2,0 do 2,4 razy). Płatwie wieloprzęsłowe mają znacznie zróżnicowane reakcje podporowe: ramy skrajne są wykorzystane zaledwie w 30–40%, a ramy przedskrajne są dociążone w zakresie 110–125%. **O ile schemat wieloprzęsłowy z powodu ugięć pozwala w lepszym stopniu spożytkować kształtownik płatwi, o tyle jest on przyczyną dużej, wręcz nieakceptowalnej niejednorodności sił przekazywanych na ramy i fundamenty.** Znaczna część poprzecznego układu nośnego pod płatwiami wieloprzęsłowymi jest wykorzystana niejednorodnie i bar-

dzo nieefektywnie. Najbardziej niekorzystną dysproporcję rozdziału sił ma układ ciągły dwuprzęsłowy.

Można spotkać się często z opinią dotyczącą układów wieloprzęsłowych, że mają większe obciążenie graniczne ULS, ale tak nie jest. Wykorzystanie w pełni plastycznej lub sprężystej nośności przekroju ogranicza zwichrzenie przęsła przedskrajnego (obciążenia grawitacyjne) lub skrajnego (obciążenia unoszące). Zysk wynika wyłącznie z poprawy sztywności układu i realnego poszerzenia zakresu wykorzystania nośności, choć ta jest zmniejszona. Obciążenie belki od zginania jest bardzo niejednorodne. Decydujący jest zawsze moment nad podporą przedskrajną. Pewną przewagę mają tu **płatwie z kształtownikami RHS**. Z uwagi na znaczną sztywność skrętną GIT kształtowniki zamknięte w praktyce nie ulegają zwichrzeniu. Stan graniczny nośności jest osiągany z chwilą wyczerpania plastycznej nośności belki w jej najbardziej wyężonym przekroju. Dodatkową korzyścią jest to, że w **belkach statycznie niewyznaczalnych klasy 1, wolnych od zwichrzenia, można wykorzystać znaczący zapas rezerwy plastycznej schematu statycznego (plastyczna redystrybucja sił z wyrównaniem momentów)**. W przypadku belek wieloprzęsłowych obciążenie graniczne ULS można zwiększyć o 25%, w belce dwuprzęsłowej o 46%, a w przęsłach wewnętrznych o 33% (schemat bliski belce dwustronnie utwierdzonej). Ten **ostatni przypadek stosuje się w modyfikacjach schematów statycznych płatwi**.

W przypadku belek z kształtowników walcowanych warto rozważyć **układ Gerbera** (rys. 3c). Po pierwsze, wykonanie połączeń przegubowych charakterystycznych dla tego rozwiązania jest łatwe (w przeciwieństwie do złączy sztywnych belek wieloprzęsłowych). Po drugie, **przy odpowiednio rozłożonych dylatacjach przegubowych w układach Gerbera można doprowadzić do jednorodnego zginania belki na wszystkich podporach i w skrajnych przęsłach jednocześnie**. Uzyskuje się ten sam efekt jak przy plastycznej redystrybucji sił, tylko w stanie sprężystym. Schematy Gerbera są statycz-

nie wyznaczalne, przez co do ich zniszczenia dochodzi z chwilą pierwszego wyczerpania nośności przekroju. Przy odpowiednim ustawieniu przegubów belka niszczy się jednocześnie w kilku przekrojach, gdy układ ulega załamowi w wielokrotny mechanizm. W odniesieniu do belek wieloprzęsłowych obciążenie graniczne ULS można zwiększyć o 25%, a belek dwuprzęsłowych – o 46%. Warto zwrócić uwagę na fakt, że są to dokładnie te same poziomy uzyski co w przypadku plastycznego wyrównania momentów belek RHS. Wadą układów Gerbera jest za to zredukowana sztywność układu i obniżone obciążenie graniczne SLS.

Belki zetowe (rys. 3d), jeśli mają być wykorzystane racjonalnie, kształtuje się niemal wyłącznie jako układy wieloprzęsłowe łączone na zakłady podporowe. Układ łączy się z jednoprzęsłowych prefabrykatów wysuniętych wspornikowo na sąsiadujące przęsła [2]. Belki zetowe wymagają stabilizacji bocznej przez poszycie. Teoretycznie ich użycie jest ograniczone do poszycia z blachy trapezowej. Nie jest jasne, jaką stabilizację boczną zapewnia poszycie ze szkła hartowanego lub paneli fotowoltaicznych.

Opisane wcześniej podstawowe schematy statyczne pozwalają z różną efektywnością wykorzystać płatwę w stanach granicznych użyteczności i nośności. Jeśli jako kluczowy przyjąć stan graniczny nośności, to schematem o największym obciążeniu granicznym jest schemat Gerbera lub układ z plastyczną redystrybucją sił. Niestety w praktyce projektowej oba te schematy niepotrzebnie są postrzegane jako rozwiązania stosowane dawniej, gdy współczesnym trendem jest wybór układu wieloprzęsłowego. **Wszystkie schematy podstawowe, z wyjątkiem schematu jednoprzęsłowego, nierównomiernie obciążają ramy poprzecznego układu nośnego, przez co nie jest możliwe ich w pełni efektywne wykorzystanie.**

KORZYSTNE MODYFIKACJE PŁATWI WIAT

W artykule zaproponowane zostaną rozwiązania układów płatwiowych, które poprawiają obciążenie graniczne płatwi, a dodatkowo przyczyniają się do wyrównania

obciążenia wszystkich ram. **W proponowanych modyfikacjach najistotniejsza jest kwestia, czy w projektowanej wiacie architekt i inwestor zdecydują się na dach wysunięty wspornikowo poza obrys słupów, czy nie.**

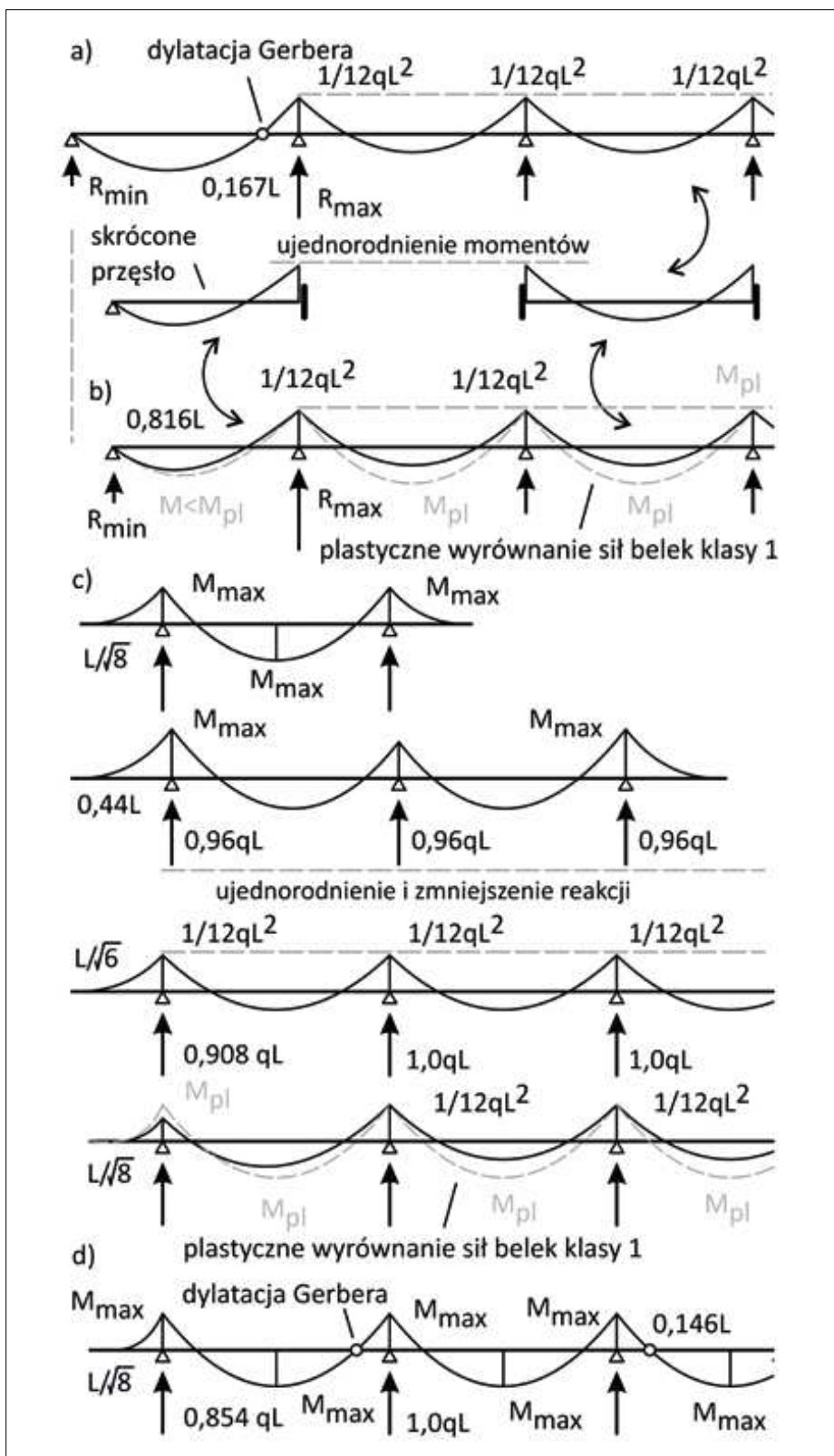
Pierwszym zmodyfikowanym schematem statycznym jest **układ wieloprzęsłowy mieszany z układem Gerbera** (rys. 4a). Dach jest bez wsporników. Nieznacznej modyfikacji ulegają jedy-

nie skrajne przęsła, w których rozmieszcza się dylatacje Gerbera w pozycji $5/6 L$. Przęsła wewnętrznych się nie modyfikuje. W układach wieloprzęsłowych mieszanych momenty podporowe wyrównują się ($1/12 qL^2$), a wszystkie przęsła wewnętrzne zyskują nośność i sztywność belki dwustronnie utwierdzonej. Ten schemat niepotrzebnie traktowany jest wyłącznie jako teoretyczny, tymczasem łatwo jest go uzyskać wskutek dylatacyjnego wymuszenia podporowych warunków symetrii (zasady jak przy utwierdzeniu). Obciążenie graniczne ULS zwiększa się o 27% względem belki wieloprzęsłowej. Reakcje pławki pozostają niejednorodne.

Identyczny efekt wyrównania momentów podporowych ($1/12 qL^2$) można uzyskać inaczej. Belka wieloprzęsłowa pozostaje ciągła, przy czym skracą się przęsła skrajne do długości $\sqrt{2/3}L$. Jest to **układ wieloprzęsłowy o skróconych przęsłach skrajnych** (rys. 4b). Zaburza to równomierną geometrię podziału wiaty, co architektonicznie jest pewną niedogodnością. Przęsła wewnętrzne mają nośność i sztywność belki dwustronnie utwierdzonej. Przęsło skrajne odpowiada modelowi belki jednostronnie utwierdzonej (kolejny schemat postrzegany w praktyce projektowej wyłącznie jako teoretyczny). Układ jest 2,5 razy sztywniejszy niż belka wieloprzęsłowa. Płatew ma doskonale wyrównane momenty i deformacje. Co więcej, przy zastosowaniu kształtowników RHS obciążenie graniczne ULS można zwiększyć wskutek plastycznej redystrybucji sił o kolejne 33% (razem do 69% względem belki wieloprzęsłowej). Reakcje pozostają niejednorodne.

Najdoskonalszą modyfikacją pławki, szczególnie łatwą do wykonania i wygodną w użytkowaniu w wiatach otwartych, jest zastosowanie przewieszzeń wspornikowych skrajnych przęseł (rys. 4c).

Belka jednoprzęsłowa z przewieszaniem $L/\sqrt{8}$ zwiększa obciążenie graniczne ULS 2,0 razy, a SLS – 2,5 razy. Reakcje są równe, przy czym jest to jedyny



Rys. 4. Zmodyfikowane schematy statyczne pławki

schemat płatwi z przewieszeniami wspornikowymi, w przypadku którego przy rozbudowie dachu zwiększa się konstrukcja ram. W wiatkach o dwóch i większej liczbie prześłach ich konstrukcja ramowa się zmniejsza. Przewieszenia wspornikowe mogą albo wyrównywać momenty zginające płatwi, albo reakcje przekazywane na ramy. Na przykład w układzie dwuprzęsłowym, gdy powierzchnia zadaszona zwiększy się wskutek wysunięć wspornikowych o ok. 40%, to obciążenie ram ujednotodni się i zmniejszy do 80%. Obciążenie graniczne ULS płatwi zwiększy się o 50%. Jeśli dodać plastyczne wyrównanie momentów w belkach RHS (wysunięcie $L/\sqrt{8}$), to obciążenie graniczne wzrośnie o dodatkowe 33%. Wysunięcia wspornikowe $L/\sqrt{6}$ w dowolnych belkach wieloprzęsłowych wyrównują wszystkie prześła (również skrajne) do schematu belki dwustronnie utwierdzonej. Przestaje być decydujące lokalne zaburzenie momentu nad podporą przedskrajną. Wsporniki można również skutecznie łączyć ze schematami Gerbera (rys. 4d). Nie jest jasne, dlaczego tak skuteczny zabieg konstrukcyjny jest tak rzadko stosowany w układach płatwiowych wiat.

Płatwie wysunięte wspornikowo powinno się na swobodnych końcach wzajemnie między sobą przewiązać przy użyciu belki oczepowej.

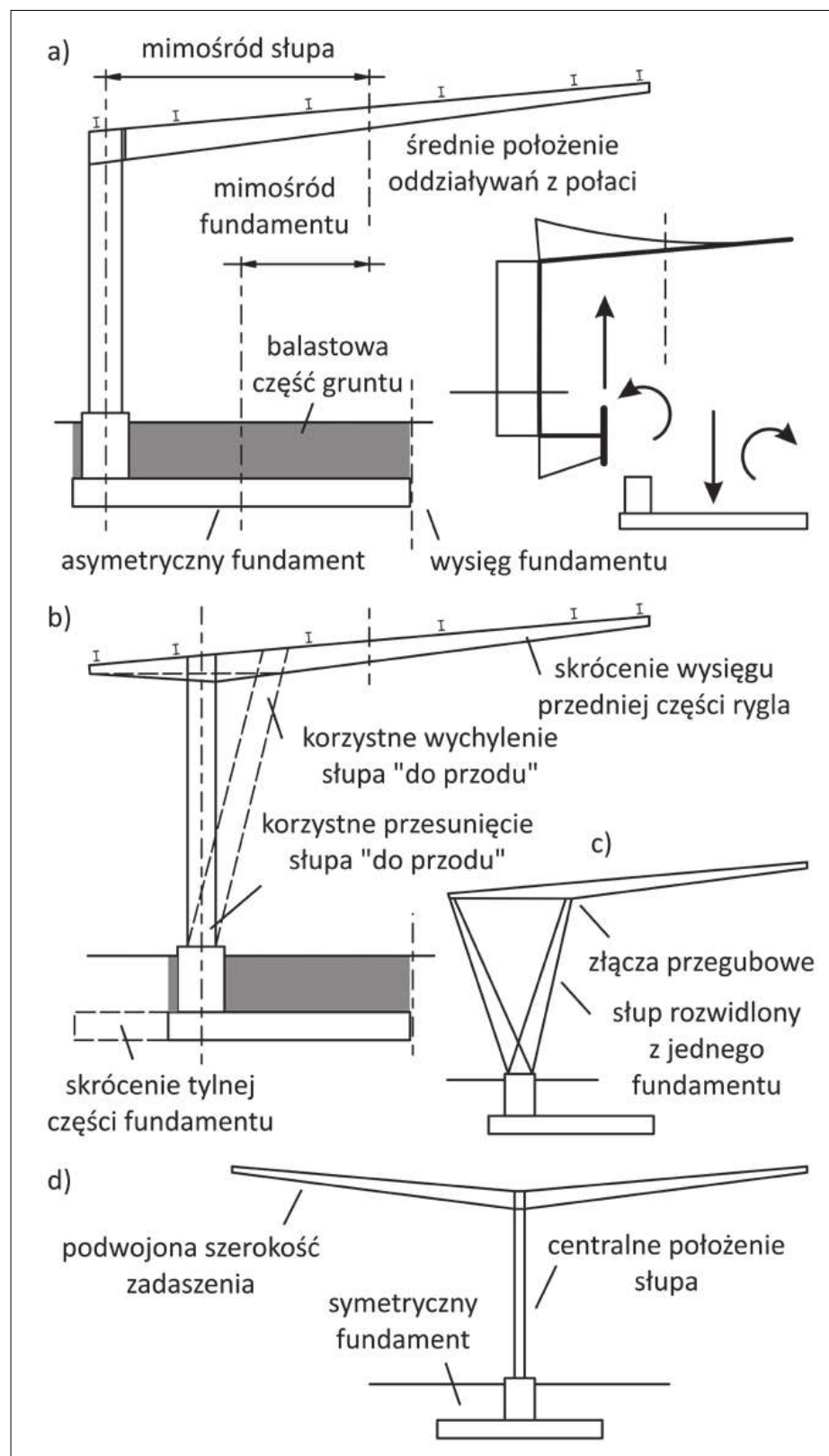
Ostatnią modyfikacją jest zmiana równomiernego rozstawu belek dachu na **zagęszczony rozstaw płatwi przy krawędziach** (rys. 2b i 2d). Rozstaw płatwi w praktyce projektowej w ogóle nie jest postrzegany jako parametr optymalizacji, tymczasem pozwala ujednotodnić wykorzystanie poszczególnych płatwi.

UKŁADY RAMOWE I FUNDAMENTOWE WIAT WSPORNIKOWYCH

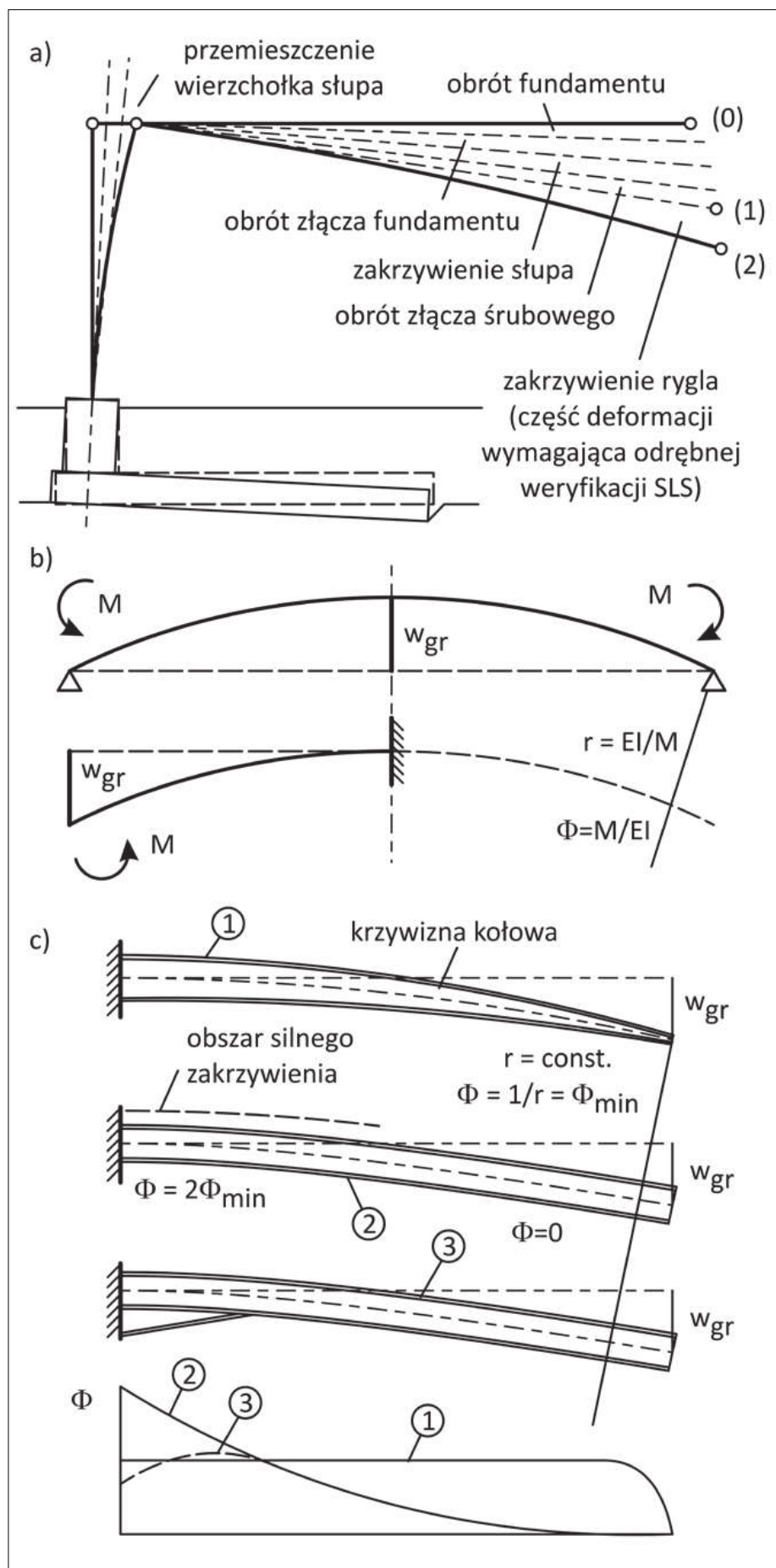
W przypadku ram i fundamentów wiat wspornikowych kluczowymi parametrami geometrycznymi są: szerokość i nachylenie połaci dachu, usytuowanie i nachylenie słupów oraz rozstaw ram. Konstrukcja składa się z połączonych ze sobą wsporników.

Pod względem architektoniczno-użytkowym wiaty wspornikowe dzieli się na asymetryczne jednostronne i symetryczne dwustronne. Wiaty jed-

nostronne najczęściej mają mniejszą szerokość. Przy zwiększonej szerokości dachu stosuje się wiaty dwustronne. Kluczową cechą wiat wspornikowych jest



Rys. 5. Wolno stojące wiaty wspornikowe: a) układ o skrajnej asymetrii, b) układ z korzystnym przesunięciem słupa do wnętrza wiaty, c) układ ze słupami rozwidlonymi, d) symetryczne układy dwustronne



Rys. 6. Deformacje układów wspornikowych

minimalna liczba słupów w odniesieniu do podpieranej powierzchni poszycia oraz takie ich usytuowanie, aby nie przeszkadzały w wygodnym użytkowaniu zadanej przestrzeni. Najbardziej wymagającym problemem projektowym dotyczącym wiat wspornikowych jest ich wywracanie (utrata stateczności globalnej).

Z wiat jednostronnych najwygodniejsza użytkowo jest ta **ze słupami usytuowanymi skrajnie** (rys. 5a), przy krawędzi dachu. Jest to przypadek szczególnie wymagający konstrukcyjnie. Siły we wszystkich elementach konstrukcyjnych zależą kwadratowo od wysięgu wsporników. Przy określonej powierzchni zadania, w wiatkach o słupach położonych skrajnie powstaną największe siły wewnętrzne.

Jeśli słupy ram przesunie się do wnętrza wiaty, to możliwe jest istotne zmniejszenie konstrukcji (rys. 5b). Trzeba wówczas rozważyć ewentualne utrudnienia w użytkowaniu. Przy słupach wsuniętych w głąb wiaty dach składa się z dwóch części wspornikowych: dłuższej – w przedniej i krótszej – w tylnej części. Poprawę efektywności konstrukcji uzyskuje się wskutek skrócenia części przedniej. Korzystne jest również nachylenie słupa „do przodu”. Słupy najczęściej są pryzmatyczne. Są to najsilniej obciążone pręty układu nośnego.

Fundament jednostronnej wiaty wspornikowej musi być asymetryczny, masywny i sięgać daleko w jej głąb. **Wiatą stabilizowaną jest grawitacyjnie przez ciężar fundamentu i gruntu na nim zalegającego. Kluczowy jest mimośród, a nie sama wartość sił – te zazwyczaj nie są duże w konstrukcjach lekkich.**

Ciekawą alternatywą względem rozwiązań typowych zarówno konstrukcyjnie, jak i architektonicznie, są słupy rozwidlające się z jednego fundamentu (rys. 5c).

Symetryczne wiaty dwustronne (rys. 5d) w porównaniu z jednostronnymi najczęściej mają podwojoną szerokość połączy dachu. Centralne usytuowanie słupa jest bardzo korzystne.

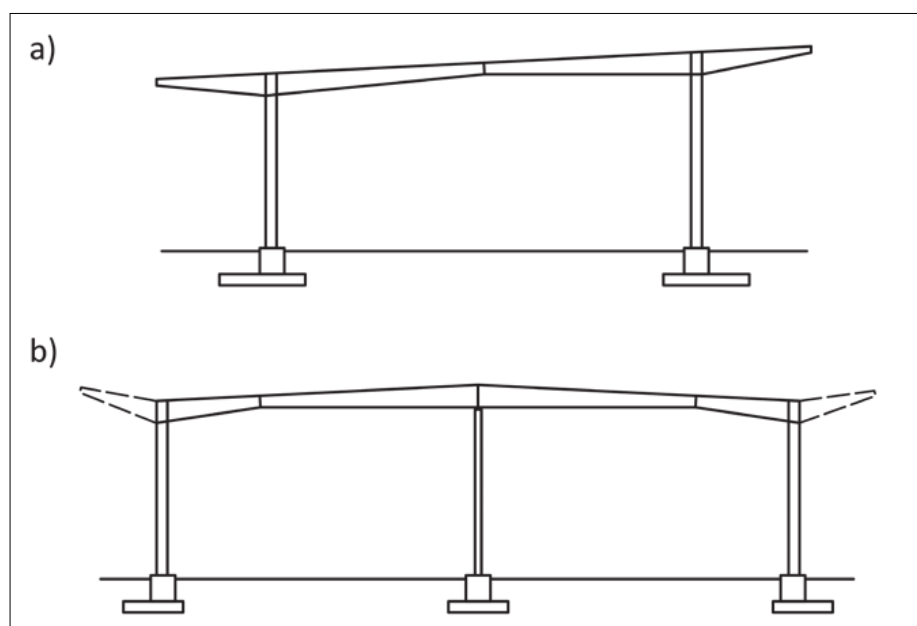
Obciążenia z dwóch części dachu wzajemnie się równoważą, jeśli nie w całości, to w przeważającej części. Wsporniki rygla muszą mieć dużą nośność i sztywność. Rygle przekazują na słup i fundament głównie siły pionowe. Mimośród tych sił zazwyczaj nie jest duży. Choć zadanie symetrycznej wiaty dwustronnej jest większe, to fundamenty są porównywalne względem asymetrycznej wiaty jednostronnej.

STAN GRANICZNY UŻYTKOWAŁOŚCI RAM WSPORNIKOWYCH – UGIĘCIA I KRZYWIZNY

Ramy wiat wspornikowych zwykle są wrażliwe na problem nadmiernych deformacji, a stan graniczny użyteczności często jest decydujący. Przy projektowaniu wiat rozpatrywana jest deformacja rygli ram. W tej ocenie często pojawia się uzasadniona wątpliwość, czy powinno się weryfikować ugięcie wsporników czy raczej przemieszczenie ich końców (rys. 6a). Są to dwie różne deformacje. Na przemieszczenie końców rygli składają się deformacje rygli i słupów, podatności połączeń oraz obrót fundamentu w gruncie.

W przypadku wiat symetrycznych przemieszczenie końców rygli można uznać za zbliżone do ich ugięcia. Jeśli poszycie jest elastyczne, to przemieszczenie końców rygli nie powinno przekraczać $2L/250$. Deformację wsporników odnosi się do podwójnego wysięgu ($2L$), ponieważ przy tej samej krzywiznie ich ugięcia są takie same jak dwukrotnie dłuższej belki (rys. 6b). Normowe warunki SLS, choć nie jest to podane wprost, mają również ograniczać krzywiznę. Krzywizna przekłada się proporcjonalnie na stan naprężeń konstrukcji – im jest większa, tym bardziej wyłożony jest materiał. W przypadku ugięcia nie ma tej samej bezpośredniej zależności. Elementy elastyczne mogą znacznie się ugiąć bez istotnego skutku w stanie naprężenia. Krzywiznę graniczną można wyznaczyć w funkcji ugięcia granicznego:

$$\Phi_{gr} = 8w_{gr}/L^2$$



Rys. 7. Wolno stojące wiaty portalowe

W przypadku poszycia wrażliwego na nadmierne deformacje (np. poszycie szklane) warto sprawdzić ugięcie i krzywiznę wspornika. Odrębnie weryfikuje się wówczas dwa warunki: mniej rygorystyczny, dotyczący przemieszczenia końców rygla $2L/250$ i bardziej restrykcyjny, dotyczący ugięcia rygla, np. $2L/400$. Warunki graniczne najczęściej sugeruje producent paneli szklanych. Konstrukcja z poszyciem szklanym powinna być sztywniejsza niż z elastycznym. **Kluczowe dla poprawnej weryfikacji jest nie tylko ugięcie maksymalne, ale również to, czy przyrasta ono równomiernie na długości pręta, tzn. czy jest skutkiem stałej krzywizny.** Szkło najbezpieczniej jest zaginać do określonego ugięcia stałą krzywizną, gdy stan naprężeń jest jednorodny i możliwie najmniejszy. Poszycie przyjmuje krzywiznę konstrukcji, na której się opiera, dlatego wsporniki ram wiat pokrytych poszyciem szklanym powinny być zbieżne. Wybór elementów zbieżnych uzasadniony jest bezpieczeństwem poszycia. **W różnych konstrukcjach o takim samym ugięciu szkło może być bardzo różnie wyłożone.** Element zbieżny obciążony jednorodnie ma niemal stałą krzywiznę (rys. 6c, 6d). Wspornik przyrządkowy o tym samym ugięciu ma silnie zróżnicowaną krzywiznę.

Jest ona dwukrotnie większa niż w przypadku wspornika zbieżnego, co powoduje większe wyłożenie i zwiększone ryzyko pęknięcia. Aby w strefie podporowej wsporników przyrządkowych zredukować problem nadmiernego wykrzywiania szklanego poszycia, warto zastosować skosy podporowe. **Skupiając uwagę wyłącznie na weryfikacji ugięcia, nie mamy możliwości właściwego uchwycenia problemu bezpieczeństwa poszycia szklanego.**

UKŁADY RAMOWE I FUNDAMENTOWE WIAT PORTALOWYCH

W przypadku wiat portalowych należy rozważyć wybór geometrii układu i rozwiązań konstrukcyjnych w odniesieniu do kilku kluczowych kryteriów. Pierwszym, o charakterze architektonicznym i użytkowym, jest wybór pomiędzy rozwiązaniem jedno- i wielonawowym (rys. 7a, 7b). W wiatkach portalowych, w porównaniu do wspornikowych, z założenia stosuje się większą liczbę słupów w odniesieniu do powierzchni zadaszania. W wiatkach o dużej szerokości trzeba rozważyć wybór pomiędzy układem jednonawowym, w którym ramy będą miały większe przekroje poprzeczne, ale za to mniejszą liczbę słupów, a układem wielonawowym (najczęściej dwunawowym),

o mniejszej konstrukcji, ale z dodatkową linią słupów wahaczowych.

Drugim kryterium jest wybór wspornikowych przewieszzeń ramy poza linię słupów. Wsuniecie słupów w głąb zadaszenia zmniejsza rozpiętość głównej części rygla, a w konsekwencji obciążenie słupów i rozpory fundamentów. Wsporniki skracają przęsło oraz w niewielkim stopniu odciażają siłowo wewnętrzną część ramy. Przy tej samej szerokości zadaszenia rama ze wspornikami jest mniejsza, ma większą nośność i jest sztywniejsza. Jedynym problemem może być nieco bardziej kolizyjne usytuowanie słupów. Wiata portalowa ze słupami usytuowanymi na skraju zadaszenia jest wygodniejsza pod względem użytkowym.

Trzecie kryterium ma charakter konstrukcyjny. W wiatach otwartych najczęściej nie ma możliwości zastoso-

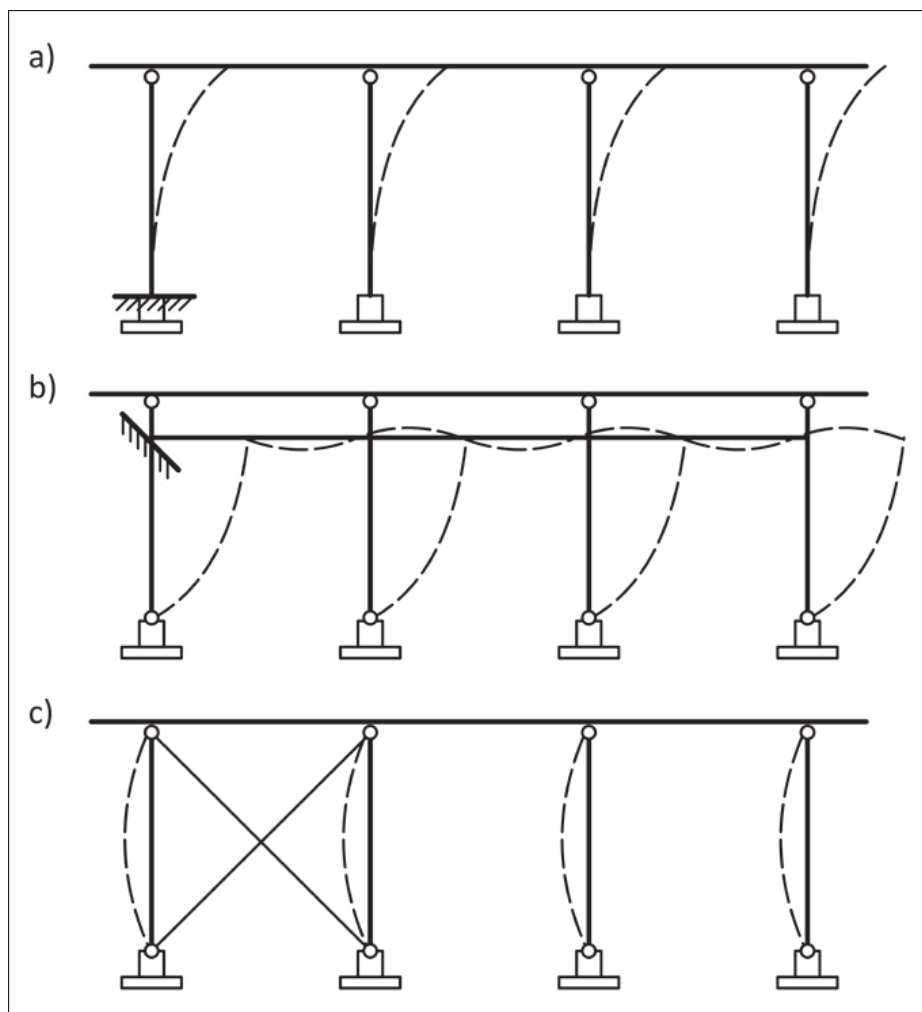
wania pionowego układu stężającego. O sztywności przechyłowej wiaty poprzecznej i podłużnej decydują przyjęte rozwiązania połączeń pomiędzy słupami a fundamentami oraz pomiędzy słupami a ryglami. Sztywność na tych kierunkach musi zapewniać układ nośny, w szczególności słupy i ich sposób osadzenia w układzie dachu albo fundamentach. Kolejnym kryterium doboru konstrukcji ram portalowych jest wybór pomiędzy zastosowaniem prętów przyrzatycznych albo zbieżnych. Oba rozwiązania można ze sobą łączyć. Zazwyczaj wybór pomiędzy tymi rozwiązaniami uzasadnia wielkość konstrukcji – przy układach mniejszych stosuje się kształtowniki walcowane, przy większych – prefabrykaty zbieżne. W przypadku nawet tych mniejszych wiat elementy zbieżne dobiera się ze względów

architektonicznych, aby konstrukcja nie wyglądała zbyt masywnie. Dodatkowym argumentem może być zastosowanie poszycia szklanego. Przy tym poszyciu kluczowa staje się możliwość doprowadzenia do jednorodnego wykrzywiania szkła przy deformowaniu się ramy.

SZTYWNOŚĆ PRZECHYŁOWA PODŁUŻNA WIAT

W wiatach wolno stojących najtrudniejszy do zabezpieczenia jest kierunek przechyłowy podłużny. Podstawowym rozwiązaniem jest zastosowanie słupów sztywno połączonych z rozbudowanymi fundamentami (rys. 8a). Przy mniejszych fundamentach sztywność przechyłową wzdłużną najczęściej uzyskuje się poprzez wykorzystanie stężenia belkowego (rys. 8b), dość charakterystycznego dla konstrukcji wiat. Najskuteczniejsze jest dodanie w wybranych polach przepon kratownicowych, o ile w ogóle jest to możliwe i o ile konstrukcja stężenia nie będzie utrudniać użytkowania wiaty (rys. 8c).

Wiaty wolno stojące są obiektami, w których ze względów architektonicznych można zastosować dużo ciekawych i niezwykle skutecznych rozwiązań konstrukcyjnych, doskonale odpowiadających wielu przypadkom optymalnym w rozumieniu teorii projektowania konstrukcji. ■



Rys. 8. Usztywnianie ram na kierunku przechyłowym podłużnym

Literatura

1. A. Biegus, *Stalowe budynki halowe*, Arkady 2003.
2. J. Goczek, Ł. Supel, *Płatwie z kształtowników profilowanych na zimno*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2017.
3. A. Kozłowski, *Konstrukcje stalowe. Przykłady obliczeń według PN-EN 1993-1, Część 3: Hale i wiaty*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2021.
4. W. Kucharczuk, *Stalowe hale i budynki wielokondygnacyjne*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004.