

Propozycja wzmocnienia łukowego zadaszania ABM240

Dr hab. inż. Ryszard Walentyński, prof. nzw. uczelni, mgr inż. Maciej Wiśniowski, mgr inż. Krzysztof Kozieł, Politechnika Śląska

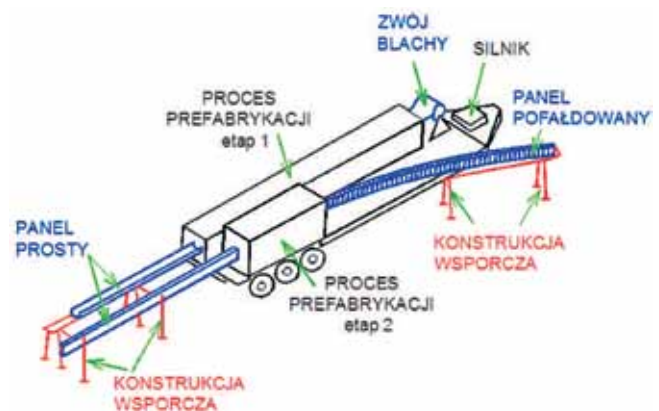
1. Wprowadzenie

W ostatnich latach zaobserwowaliśmy znaczny wzrost zainteresowania budownictwem systemowym. Nie jest to nowy wynalazek, bowiem znane są przykłady niemieckiej myśli technicznej – systemowych budynków jeszcze sprzed okresu II wojny światowej (nawet na terenie Polski). Każdego roku pojawiają się nowi producenci oraz nowe systemy budowlane na polskim rynku. Coraz częściej determinantem wyboru technologii wznoszenia konstrukcji jest nie koszt materiałów, a pracochłonność oraz czas wznoszenia. Budownictwo systemowe wydaje się spisywać tutaj idealnie, gdyż część robót wykonywana jest w zakładach prefabrykacji, równoległe z pracami przygotowawczymi na placu budowy, a całość zadania kończy szybki montaż konstrukcji.

Pomimo ogromu zalet systemy mają również pewne wady i ograniczenia. Przykładem są ograniczenia w nośności i rozmiarach konstrukcji. Wzniesienie konstrukcji o innych wymiarach lub większej nośności niż przewiduje to dostawca systemu, bywa uciążliwe, a czasami niemożliwe. Przykładem takiego systemu, gdzie przekroczenie nośności tworzy nie lada wyzwanie dla projektanta, jest system łukowych przekryć ABM (*Automatic Building Machine*), dostarczony przez firmę MIC Industries.

1.1. System ABM

Sam system nie jest niczym nowym na rynku. Powstał już w latach 70. ubiegłego wieku z myślą o szybkim wzniesieniu konstrukcji tymczasowych i stałych dla armii amerykańskiej. Obecnie znajduje zastosowanie w budownictwie cywilnym. Sam proces produkcji opiera się o samobieżną maszynę która, jak podano w pracach [4, 6], z rulonu blachy o grubości około 1 mm na początku wygina profil blachy trapezowej, a następnie ten wygina w łuk, wykonując „fałdowanie” jednej ze stron blachy. W ten sposób wyginane są pasma łuku o szerokości około 60 cm. Maszyna, która wykonuje fałdowanie, nie ma ograniczeń co do długości elementu (jedynym ograniczeniem jest długość pasu blachy na rolce). Jest również możliwa regulacja promienia gięcia blachy w łuk. W związku z powyższym można wykonać w technologii ABM240 lub ABM120 (bo takie systemy powstały) zadaszanie łukowe o niemal dowolnej geometrii, pamiętając jednak o ograniczeniach wynikających ze stanów granicznych nośności i użyteczności. Obecnie firma MIC Industries nie produkuje już urządzeń ABM, które zostały zastąpione modelem UBM [9].



Rys. 1. Urządzenie do produkcji łukowych hal, znalezione na internetowej aukcji [4] oraz mechanizm procesu prefabrykacji według [2]

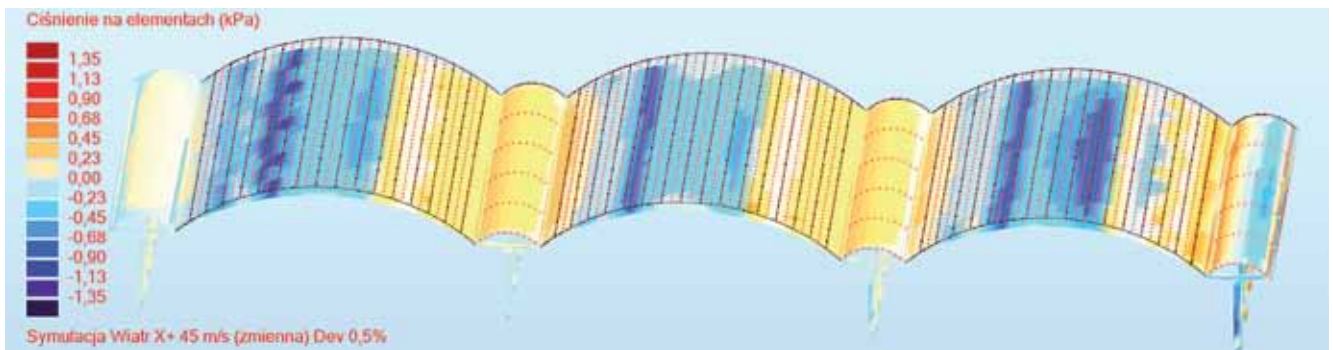
Ze względu na agresywne dla stali środowisko w klimacie umiarkowanym ABM cieszy się znacznie większą popularnością w krainach, gdzie wilgoć jest rzadkością i panują wysokie temperatury. Pustynny klimat nie sprzyja postępującej korozji, więc wiele konstrukcji wykonanych w systemie ABM120 i ABM240 można znaleźć w krajach Zatoki Perskiej. Dominuje tam obciążenie porywistym wiatrem niosącym ze sobą drobinki piasku. Nie spotyka się natomiast obciążenia śniegiem. Szybkość wznoszenia i niska pracochłonność są kolejnymi argumentami, gdyż praca latem w podwyższonych temperaturach jest bardzo uciążliwa.

Producent ABM na podstawie swoich doświadczeń deklaruje maksymalne rozpiętości łukowego przekrycia w zależności od wyniosłości łuku oraz możliwych obciążeń. Problem pojawia się jednak, gdy planujemy wzniesienie konstrukcji o znacznie większej rozpiętości. Rozważymy możliwości

Fot. Abdel Rahman Youssef, 2019



Rys. 2. Deformacja łukowego przekrycia ABM240 spowodowana oddziaływaniem wiatru



Rys. 4. Mapy ciśnienia wiatru wygenerowane za pomocą programu Autodesk Robot

wykonania wzmocnienia łukowego przekrycia ABM240 tak, aby było możliwe zbudowanie zadaszania o rozpiętości 36 m, zlokalizowanego w miejscu występowania porywistego wiatru.

1.2. Cel analizy

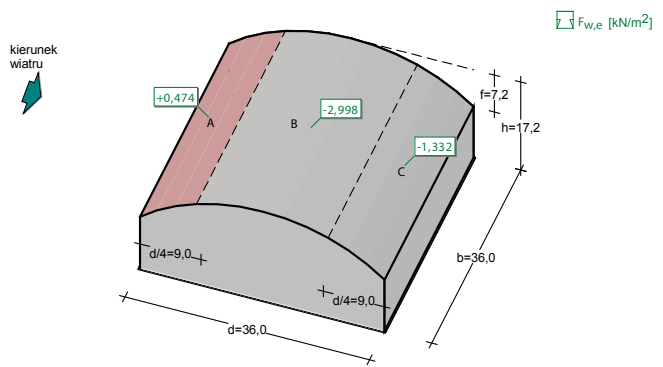
Analizie możliwości wzmocnienia została poddana istniejąca konstrukcja zlokalizowana w Zatoce Perskiej, na nizinym, płaskim obszarze. Konstrukcja wzniesiona nad płytą lotniska na 10-metrowych słupach, dodatkowo wystawiona jest na działanie wiatru. Wykonanie łuku o długości 36 m nie powiodło się, ponieważ w trakcie montażu wiatr doprowadził do znacznych trwałych deformacji konstrukcji, co pokazano na rysunku 2. Według szacowań – pierwsze uplastycznienie pojawiło się już przy 40% maksymalnego obciążenia wiatrem. Z tego względu wzmocnienie konstrukcji lub zastosowanie innego systemu okazuje się być niezbędne.

2. Geneza problemu

2.1. Obciążenia

W analizowanym przypadku dominuje obciążenie wiatrem. Ponieważ lokalne przepisy zezwalają na dowolny wybór normy obciążeniowej, w tym przykładzie posłużymy się normą EN1991-1-4 [7] do wyznaczenia obciążenia wiatrem. Dla zadanej konstrukcji rozkład obciążenia wiatrem został pokazany na rysunku 3.

Norma nie wskazuje jednak rozkładu obciążenia na konstrukcję



Rys. 3. Rozkład obciążenia wiatrem dla łukowego zadaszania hali według eurokodu [7]

pozbawioną ścian, co może prowadzić do zaniżenia wartości obciążeń. Z tego względu lepiej posłużyć się rozkładem obciążenia wiatrem wyznaczonym przy użyciu prostej symulacji obciążenia wiatrem, przeprowadzonej przy użyciu programu Autodesk Robot – rysunek 4.

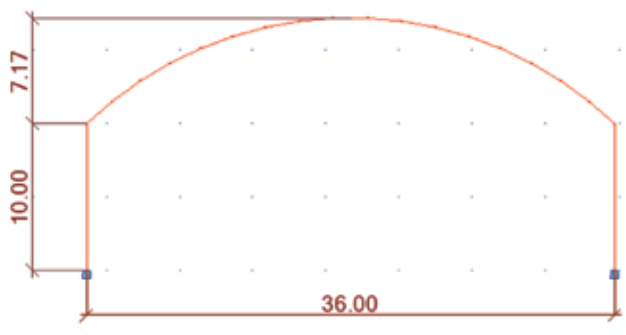
2.2. Parametry materiałowe

Wyznaczenie parametrów mechanicznych czy choćby nawet przekroju poprzecznego w łukowych konstrukcjach typu ABM240 nie jest prostym zadaniem. Szczegółowo problematykę zagadnienia opisano w [1, 2, 3]. Do wykonania prętowego modelu obliczeniowego niezbędne są takie parametry jak sztywność przekroju poprzecznego oraz wytrzymałość (do oceny nośności). Ponadto wraz ze zmianą promienia gięcia profilu ABM zmieniają się jego imperfekcje dolnego pasa. W związku z powyższym parametry mechaniczne konstrukcji wykonanej w tej technologii powinny być dobierane indywidualnie do każdego typu konstrukcji. W analizowanym przypadku parametry mechaniczne są następujące:

- moment plastyczny $M_{pl} = 20 \text{ kNm/m}$,
- moment bezwładności $I = 700 \text{ cm}^4/\text{m}$,
- pole przekroju poprzecznego $A = 8,35 \text{ cm}^2/\text{m}$.

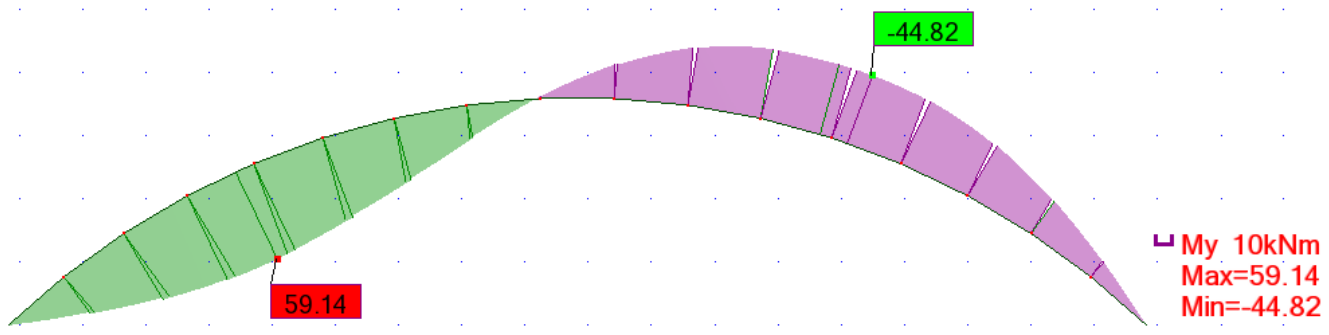
2.3. Zniszczenie konstrukcji

Rozważmy, jak zachowa się konstrukcja bez żadnego wzmocnienia, poddana obciążeniu wiatrem. Prosty prętowy model obliczeniowy, w którym przekroje słupów mają nieskończoną

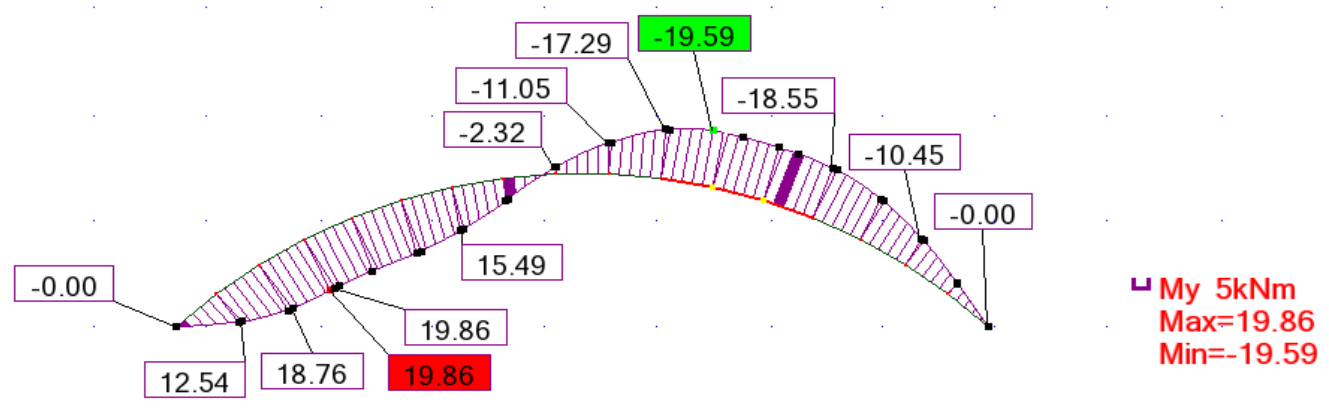


Rys. 5. Prętowy model obliczeniowy

szttywność, natomiast parametry mechaniczne łuku odpowiadają sztywności pasma konstrukcji ABM240 o szerokości 1 m (jak podano w poprzednim punkcie) przedstawia rysunek 5. Wykres momentów zginających dla wiatru otrzymany z analizy liniowej pokazany został na rysunku 6. Uzyskane wyniki nie mają sensu fizycznego, gdyż największy uzyskany moment zginający przekracza 59 kNm, natomiast moment uplastyczniający pasmo przekrycia o szerokości 1 m wynosi 20 kNm. Do dokładnego wyznaczania momentów zginających należy posługiwać się analizą plastyczną.



Rys. 6. Wykres momentów zginających, uzyskany z liniowej analizy w programie Autodesk Robot; wielkości podano w kNm



Rys. 7. Rozkład momentów zginających otrzymany z analizy statycznej z uwzględnieniem plastyczności; rozkład uzyskano dla obciążenia nie większego niż 40% możliwego obciążenia wiatrem

Rozkład momentów otrzymany z analizy statycznej łuku z uwzględnieniem plastyczności materiału, przy 40% zadanej obciążenia przedstawiono na rysunku 7. Dalsza analiza kończy się niepowodzeniem, bowiem już przy 40% obciążeniu w układzie pojawia się drugi moment plastyczny, a cała konstrukcja zamienia się w mechanizm. Plan deformacji konstrukcji naniesiono na obraz rzeczywistego zniszczenia konstrukcji zaobserwowanego po silnym wietrze jeszcze w trakcie montażu (rys. 8).

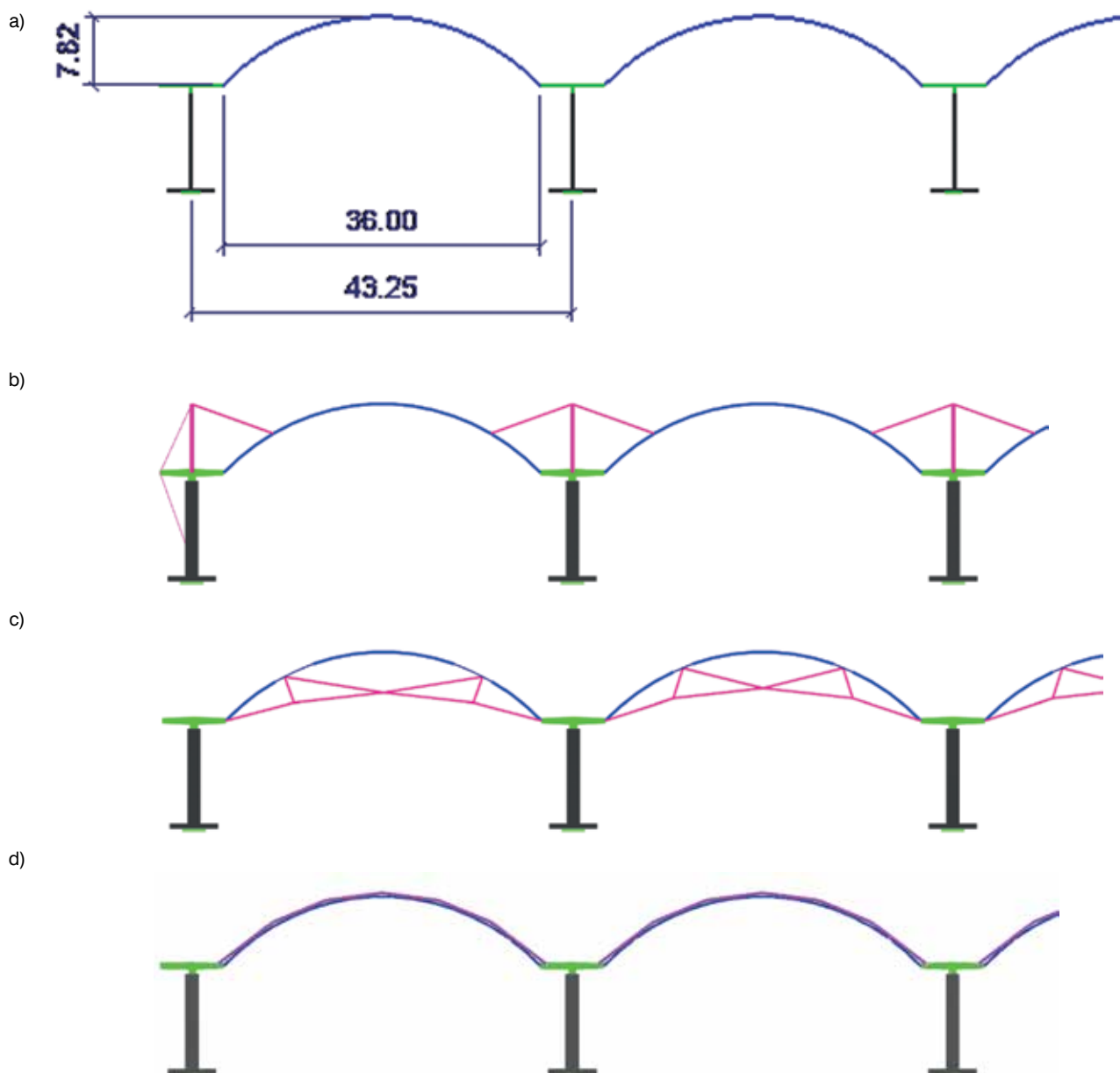


Rys. 8. Deformacja konstrukcji od obciążenia wiatrem nałożona na obraz deformacji konstrukcji

3. Wzmocnienia łukowego przekrycia

3.1. Warianty wzmocnienia

Estetyka łukowych konstrukcji stawia pewne ograniczenia w stosowaniu wzmocnień, konstrukcja traci bowiem swój



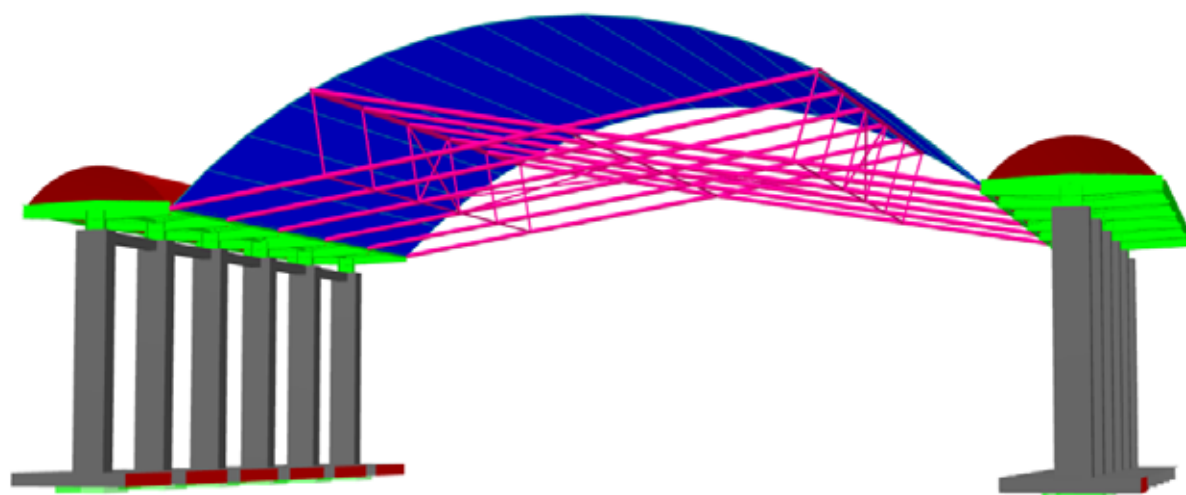
Rys. 9. Warianty wzmocnienia konstrukcji: a) podstawowa geometria konstrukcji, b) wzmocnienie „górq”, c) wzmocnienie „dołem”, d) wzmocnienie „łukiem” równoległe do konstrukcji

wdzięk, gdy nad lub pod łukiem znajdzie się zbyt masywny ruszt wzmocniający. Kilka wariantów wzmocnienia konstrukcji przedstawiono na rysunku 9.

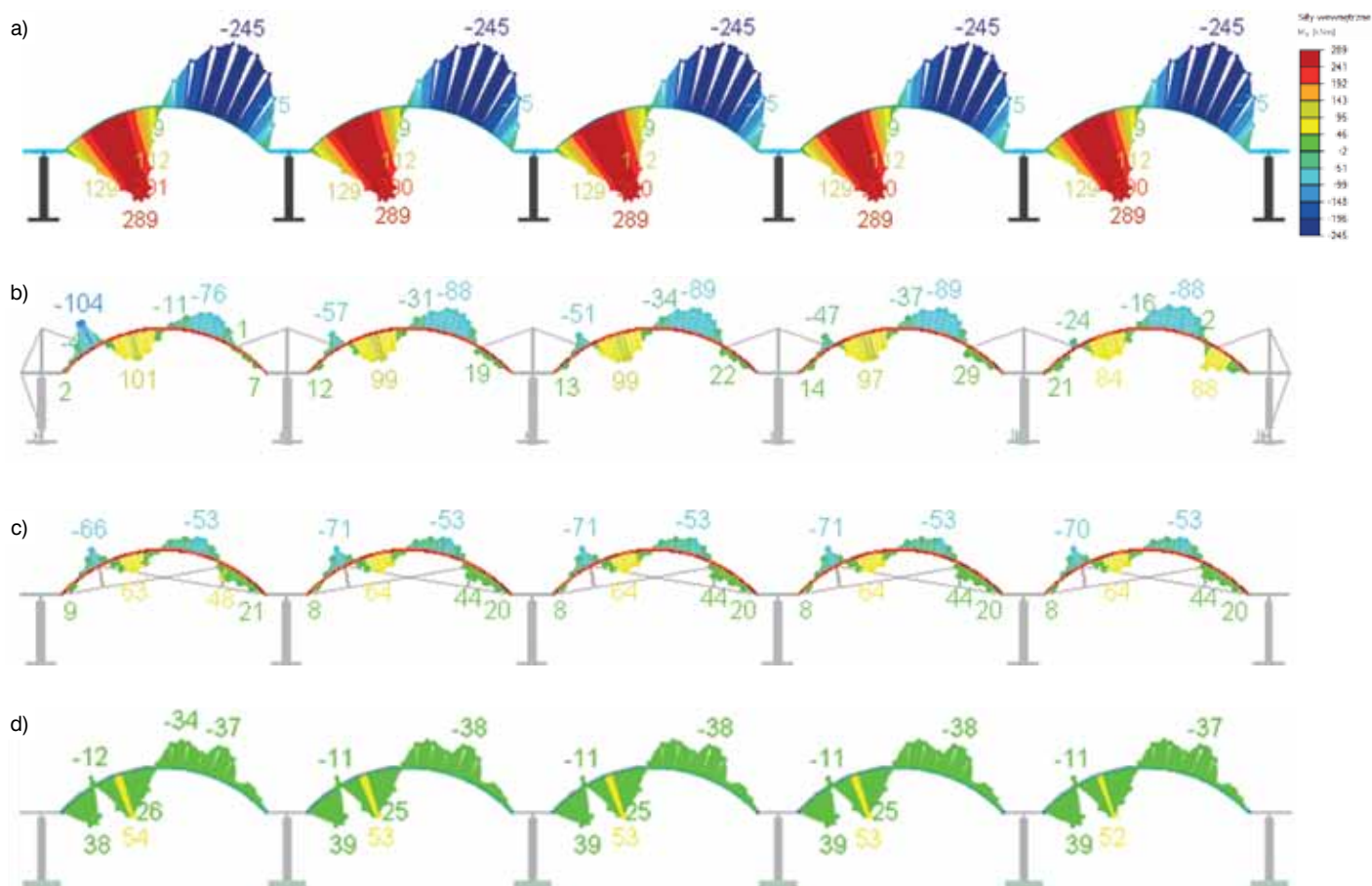
Każdy wariant konstrukcji zakłada prętowe wzmocnienie w układzie co 6 m. Taki podział wynika z napotkanego rozstawu słupów i belek podpierających łuk. Podstawową konstrukcję bez żadnych wzmocnień pokazano na rysunku 9 a. Warianty wzmocnienia konstrukcji znajdują się na rysunkach 9a–d. Pręty oznaczone kolorem szarym oznaczają żelbetową podkonstrukcję, kolorem zielonym – stalowy ruszt nad głowicami słupów, niebieskim – łukowe pasmo przekrycia o szerokości 6 m, natomiast kolorem różowym oznaczono prętowe układy wzmocniające.

3.2. Porównanie sił wewnętrznych

Sprawdźmy, co daje zastosowanie poszczególnych wariantów wzmocnień. Przedstawione w tym punkcie wykresy pokazują siły dla wycinka konstrukcji o szerokości 6 m. Na początek przyjrzyjmy się wykresowi momentów zginających łuk. Dla pasma o szerokości 6 m moment uplastyczniający konstrukcję wynosi 120 kNm. W przedstawionym przypadku bez wzmocnienia momenty przekroczone są o 140%. W pozostałych przypadkach przekroje poprzeczne wzmocnień dobrano tak, aby zredukować momenty zginające w przekryciu do pożądanego poziomu. Każdy wariant wzmocnienia spełnia kryterium zdolności od obniżenia momentów zginających w przekryciu. Sprawdźmy jednak, jak zastosowane wzmocnienie wpływa na zmianę rozkładu sił wewnętrznych



Rys. 10. Wizualizacja modelu numerycznego jednego z wariantów wzmocnienia – widocznego na rysunku 9c

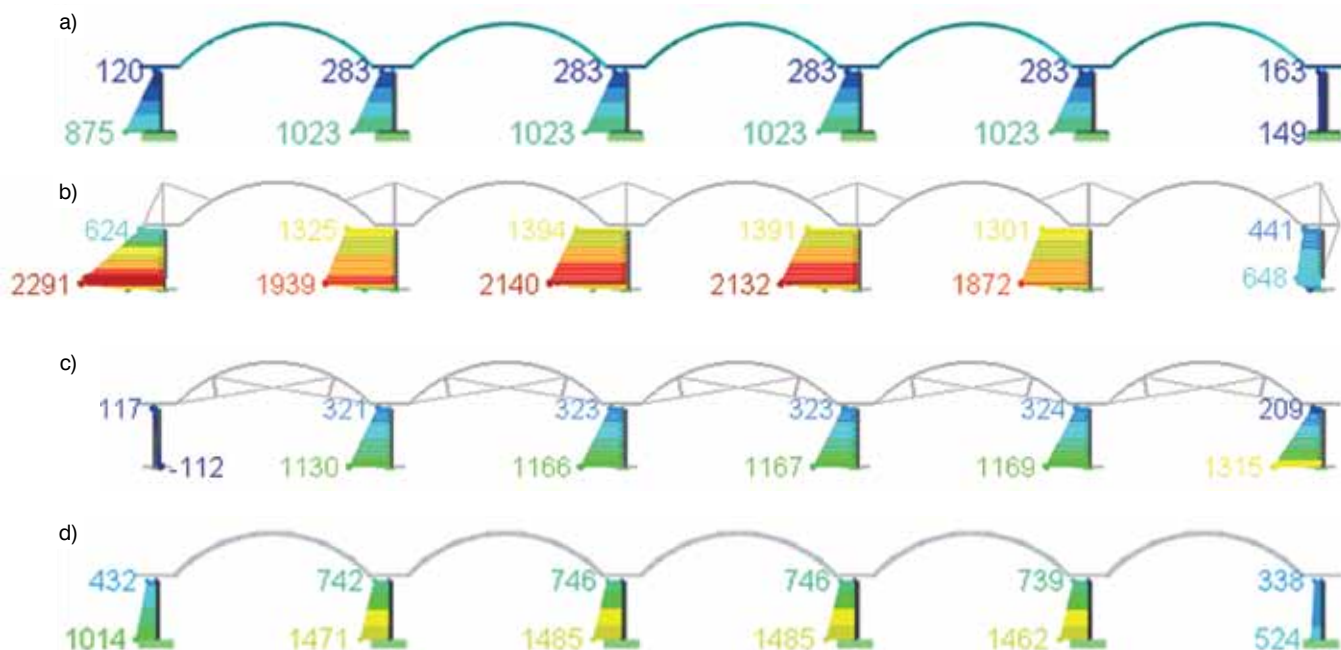


Rys. 11. Momenty zginające w różnych wariantach konstrukcji

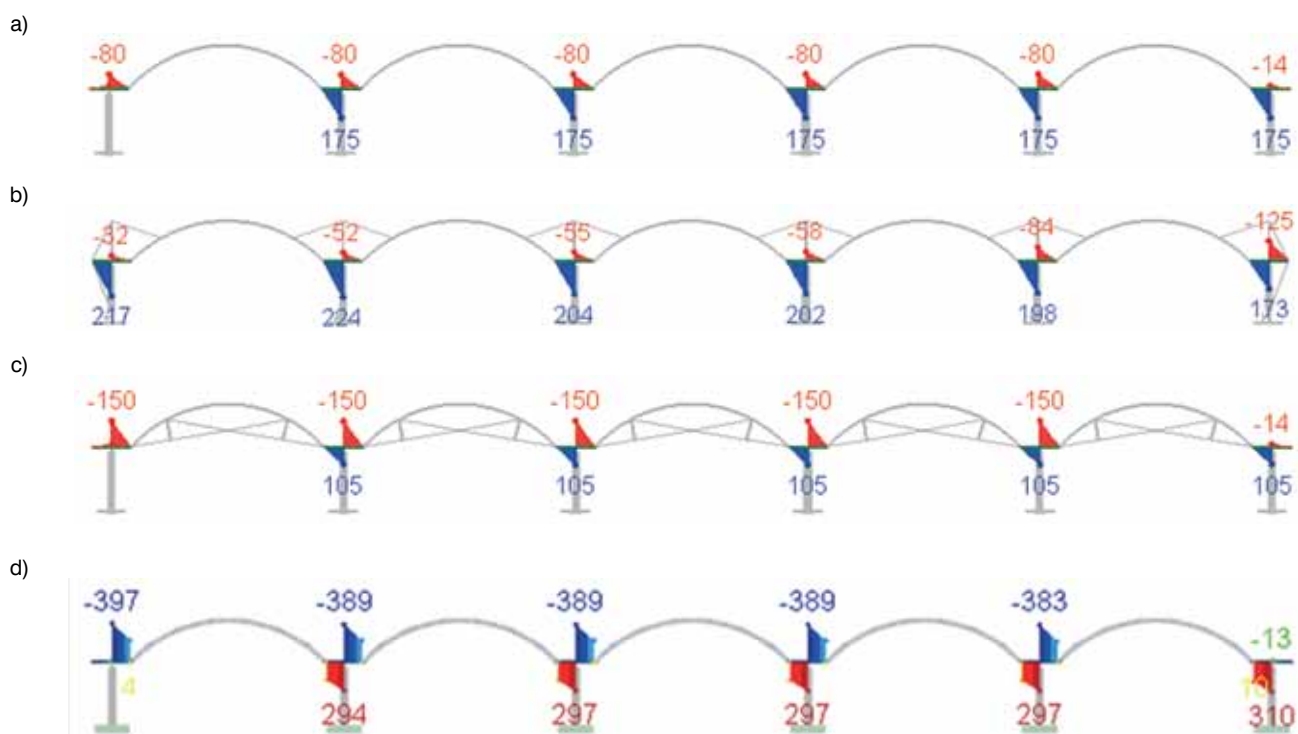
w konstrukcji wsporczej pod łukiem. Przedstawione na rysunkach 12b–d wykresy momentów zginających ukazują pierwszy problem wzmocnienia. Dwukrotny wzrost momentu zginającego w połączeniu słupa ze stopą fundamentową wymaga sprawdzenia nośności. W sytuacji, gdy nośność została przekroczona, należy zrezygnować z wariantu wzmocnienia „górną”, gdyż wzrost momentów zginających

w podstawie słupa może doprowadzić do katastrofy konstrukcji. Jedynie wzmocnienie dołem nie prowadzi do wzrostu sił wewnętrznych w słupach.

Mniej uciążliwym problemem jest wzrost sił wewnętrznych na konstrukcji stalowej na górze słupów. Stalową konstrukcję można wzmocnić, przez dospawanie lub dokręcenie profili dosztywniających do belek, włączając je do współpracy.



Rys. 12. Momenty zginające w żelbetowych słupach



Rys. 13. Momenty zginające w stalowej podkonstrukcji podpierającej lukowe przekrycie

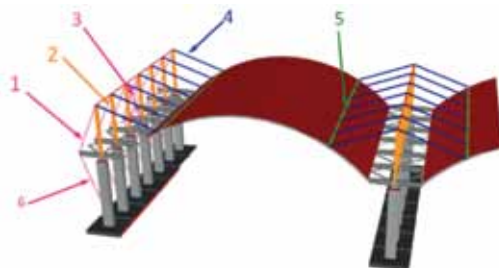
Wzrost momentów zginających na stalowej konstrukcji towarzyszy wzmocnieniom „górną” oraz „łukiem” – rysunki 13 b i d. W analizowanym przypadku b) jest wymagane zastosowanie wzmocnienia stalowej konstrukcji (na przykład przez dospawanie do niej od spodu połówek dwuteownika HEA280).

3.3. Porównanie kosztów wariantów

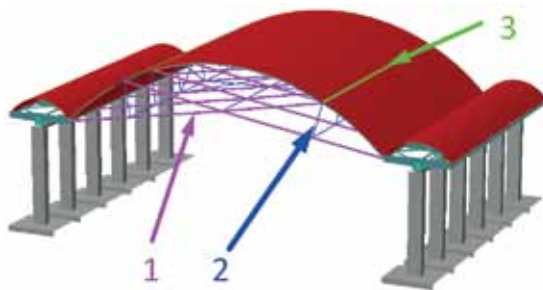
Kolejnym kryterium wyboru wzmocnienia konstrukcji jest całkowity koszt wzmocnień. Szacowane ilości stali konstrukcyjnej niezbędnej do wykonania poszczególnych wariantów wzmocnień zestawiono w tabelach 1–3. Koszt wykonania wzmocnienia nie zawsze jest proporcjonalny do

Tabela 1. Wzmocnienie „górq”

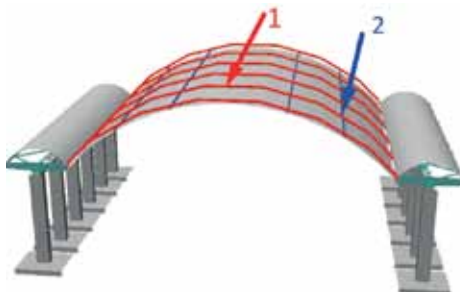
Nr	Profil	Pole przekroju	Długość	Liczba	Masa
		[cm ²]	[m]		[t]
1	RO 193.7x8.0	46,67	8,60	12	3,78
2	HEA 500	195,5	7,80	36	43,09
3	RK 80x4	11,75	6,00	30	1,66
4	RO 193.7x8.0	46,67	9,87	60	21,70
5	RK 250x8	76,8	30,00	10	18,09
6	RK 80x4	11,75	10,64	12	1,18
7	RO 120x5	22,36	30,00	12	6,32
Ilość stali z nadładkiem 15%:					95,81


Tabela 2. Wzmocnienie „dołem”

Nr	Profil	Komentarz	Pole przekroju	Długość	Liczba	Masa
			[cm ²]	[m]		[t]
1	RO 244.5x8.0	Układ główny	59,44	29,76	5x12	83,32
2	RO 114.3x5.0	Układ główny	17,17	3,13	5x12	2,53
3	RK 250x4	Belki poprzeczne	76,80	30	5x2	18,09
2	RO 114.3x5.0	Tężniki poprzeczne	17,17	30	5x2	4,04
2	RO 114.3x5.0	Stężenia	17,17	7,15	5x4	1,93
Ilość stali z nadładkiem 15%:						126,4


Tabela 3. Wzmocnienie „łukiem”

Nr	Profil	Komentarz	Pole przekroju	Długość	Liczba	Masa
			[cm ²]	[m]		[t]
1	RO 355.6x8	Główny łuk	87,40	41,4	5 x 6	85,21
2	HEA 200	Belka poprzeczna	53,8	30	5 x 4	25,34
Ilość stali z nadładkiem 15%:						127,3



ilości stali, ze względu na większą pracochłonność obróbki niektórych profili, ale na podstawie ciężaru stali i zestawienia profili można szacować koszty. Zestawienia materiału dla całej konstrukcji (w sumie 5 przęseł łukowego przekrycia) uwzględniają:

- ciężar głównych układów konstrukcyjnych,
- ciężar belek prostopadłych do głównych układów,
- nadatek stali (15% masy profili) z uwagi na węzły konstrukcji.

4. Podsumowanie

Wzmacnianie konstrukcji już po jej całkowitym lub częściowym wykonaniu zawsze jest powodem dodatkowych kosztów i opóźnień. Cena nie jest jednak jedynym kryterium wyboru sposobu wzmocnienia. Kolejnym istotnym czynnikiem jest czas realizacji zadania – jednak w tym przypadku jest on podobny dla wszystkich wariantów. Często najlepszą metodą wzmocnienia jest dokładne przeliczenie konstrukcji – ale nie zawsze jest to wystarczające. Ostatecznego wyboru metody wzmocnienia dokonuje się metodą eliminacji – odrzucając kolejno warianty, które nie spełniają któregoś kryterium. W analizowanym przypadku wariant wzmocnienia „górną” został odrzucony pomimo niższej masy stali, z uwagi na przekroczenie nośności zakotwienia słupów żelbetonowych w stopach. Problemy, jakie rodzi wzmocnianie konstrukcji żelbetonowej, w znacznym stopniu przewyższają kosztami różnicę w cenie pomiędzy innymi wariantami. Kolejno odrzucony został wariant wzmocnienia „dołem”. Pomimo że wzmocnienie jest schowane w całości pod przekryciem i nie ujmuje wizualnym walorom konstrukcji, zmniejsza światło pod zadaszeniem. Z racji

przeznaczenia budowli okazało się niemożliwe zmniejszenie prześwitu pod zadaszeniem. Jedynym możliwym do zastosowania wzmocnieniem okazało się być przeprowadzenie rur okrągłych wzdłuż łuków ponad konstrukcją, pomimo iż wiąże się to z największymi kosztami.

Wzmacnianie systemowych przekryć łukowych ABM 240 okazuje się bardzo kosztowne, niezależnie od przyjętej metody. Przykład pokazuje, jak ważne jest właściwe dobieranie parametrów konstrukcji zgodnie z zaleceniami producenta. Uświadamia także, zwłaszcza młodym inżynierom, jak bardzo istotne jest obciążenie konstrukcji wiatrem i do czego prowadzi jego lekceważenie.

Grafiki i obliczenia numeryczne do artykułu wygenerowano w programach: RFEM Dlubal, Autodesk Robot Structural Analysis.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Walentyński R., Cybulski R., Knapik J., Budowa modelu teoretycznego podwójnie giętych paneli cienkościennych typu ABM 120, Politechnika Śląska, 2013
- [2] Walentyński R., Cybulski R., Kozieł K., „Pięta Achillesa” samonośnych hal łukowych w technologii ABM
- [3] Piekarczyk A., Nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne hal łukowych dla budownictwa rolniczego, Budownictwo i Architektura 2013
- [4] Roye K. L., Metal building construction using the MIC-240 ABM K-Span machine, 1996
- [5] Biegus A., Kowal A., Katastrofy hal o konstrukcji z blach giętych na zimno, Inżynieria i Budownictwo 10/2011
- [6] Walentyński R., Cybulski R., Kozieł K., Numerical models of ABM K-Span steel arch panels. Architecture, Civil Engineering
- [7] EN 1991-1-4: Oddziaływania na konstrukcje Część 1-4: Oddziaływania ogólne Oddziaływania wiatru
- [8] www.machinio.com (02.2020)
- [9] MIC Industries, <http://www.micindustries.com> (02.2020)

