WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA

im. Jarosława Dąbrowskiego



ROZPRAWA DOKTORSKA

„Badania obciążeń mostów pływających o różnych strukturach łączenia bloków pontonowych”

mgr inż. Marcin DEJEWSKI

Promotor: **prof. dr hab. inż. Lucjan ŚNIEŻEK**

Promotor pomocniczy: **dr inż. Tomasz MUSZYŃSKI**

Warszawa 2026

Spis treści

Spis użytych oznaczeń i skrótów 4

Wprowadzenie..... 8

1. Przegląd konstrukcji mostów pontonowych 10

2. Analiza problematyki badawczo-konstrukcyjnej mostów pontonowych..... 23

2.1. Problemy konstrukcyjne wojskowych środków przeprawowych 23

2.2. Problemy badawcze dotyczące wojskowych środków przeprawowych 34

2.2.1. Zakres analizy 34

2.2.2. Badania mostów stałych..... 35

2.2.3. Badania mostów tymczasowych 38

2.3. Podsumowanie 46

3. Cel i zakres pracy 49

4. Plan i metodyka badań 50

5. Założenia do opracowanie ogólnej postaci modelu symulacyjnego 53

5.1. Model mostu..... 53

5.2. Modelowanie pojazdu 53

5.3. Modelowanie oddziaływań środowiska wodnego..... 54

5.4. Modelowanie sztywności kątowej i luzu w połączeniach bloku pontonowego 56

6. Badania identyfikacyjne..... 71

6.1. Założenia do budowy modeli doświadczalnych..... 71

6.2. Badania identyfikacyjne parametrów hydrodynamicznych nurzania mostu.. 74

6.3. Badania identyfikacyjne charakterystyki ugięcia mostu i fali czołowej 87

7. Opracowanie modelu uogólnionego fali czołowej..... 105

8. Implementacja do modelu symulacyjnego zidentyfikowanych odwzorowań masy wody towarzyszącej, fali czołowej i charakterystyki lepkości wody . 110

9. Badania walidacyjne modelu symulacyjnego 114

9.1. Zakres badań walidacyjnych..... 114

9.2. Badania walidacyjne procesu nurzania pontonów 114
9.3. Badania walidacyjne charakterystyki ugięcia mostu podczas przeprawiania pojazdów 116
10. Badania symulacyjne obciążeń mostów pływających o różnych strukturach łączenia bloków pontonowych 120
10.1. Modele badawcze 120
10.2. Plan badań 122
10.3. Metodyka oceny wyników badań 124
10.4. Wyniki badań 127
10.4.1. Momenty gnące 127
10.4.2. Przemieszczenia pionowe mostu 132
11. Podsumowanie i wnioski końcowe 137
Bibliografia 144
Spis rysunków 148
Spis tabel 157
Streszczenie rozprawy doktorskiej 159
Ph.D. thesis abstract 161

Spis użytych oznaczeń i skrótów

$E \cdot I$– sztywność giętna bloku pontonowego

F_{B} – siła wyporu

$F_{\mathrm{B},ij}$ – siła wyporu oddziałująca na sektor *ij*

F_{D} – siła oporu tłumiącego wody oddziałująca na blok pontonowy

$F_{\mathrm{D},ij}$ – siła oporu tłumiącego wody oddziałująca na sektor *ij*

F_{Imt} – siła bezwładności masy wody towarzyszącej

$F_{\mathrm{Imt},ij}$ – siła bezwładności masy wody towarzyszącej oddziałująca na sektor *ij*

F_{Ip} – siła bezwładności konstrukcji

F_{Q} – siła ciężkości

F_{fI} – siła ciężkości pojedynczego obciążenia, generującego strzałkę ugięcia f_{I}

F_{fII} – siła ciężkości pojedynczego obciążenia, generującego strzałkę ugięcia f_{II}

F_{ij} – siła oddziaływania środowiska wodnego na jeden sektor modelu numerycznego

F_{m} – siła charakterystyczna występująca w modelu

F_{r} – siła charakterystyczna występująca w obiekcie rzeczywistym

F_{y} – suma sił działających w kierunku osi Y

Fr_{m} – liczba Froude'a modelu

Fr_{r} – liczba Froude'a obiektu rzeczywistego

H_{wi} – lokalna wysokość przekroju wody pod kadłubem w obszarze i

H_{m} – wysokość modelu bloku pontonowego

KC – liczba Keulegana–Carpentera

L_{m} – wymiar modelu

L_{r} – wymiar obiektu rzeczywistego

L_{ROB} – długość robocza mostu pontonowego

M_{c} – moment sił generowany w połączeniu bloków pontonowych

M_{m} – wartość momentu sił występującego w modelu

M_{max} – wartość maksymalna momentu gnącego

M_{min} – wartość minimalna momentugnącego

M_{r} – wartość momentu sił występującego w obiekcie rzeczywistym

R – współczynnik korelacji

R^2 – współczynnik determinacji

R_{m} promień krzywizny dna modelu bloku pontonowego

R_{y} – zakres zarejestrowanych przemieszczeń y_{p}

RMSE – pierwiastek błędu średniokwadratowego

S_{F}– skala siły

S_{L} – skala geometryczna

S_{a} – skala przyspieszenia

S_{t} – skala czasu

S_{v} – skala prędkości

U – wartość statystyki testowej w teście Manna–Whitneya

V_p – prędkość pojazdu

V_{wi} – prędkość wody w obszarze i

a_{m} – przyspieszenie modelu

a_{r} – przyspieszenie obiektu rzeczywistego

a_{s} – szerokość sektora modelu numerycznego

b_{m} – szerokość dna modelu bloku pontonowego

b_{s} – długość sektora modelu numerycznego

c_{mt} – bezwymiarowy współczynnik masy towarzyszącej

d_{p} – szerokość bloku pontonowego

f_{I} – strzałka ugięcia dla pojedynczego bloku pontonowego

f_{II} – strzałka ugięcia wyznaczona dla dwóch połączonych bloków pontonowych

$f_{\mathrm{II,C}}$ – strzałka ugięcia wynikająca z odkształceń elementów połączenia bloków pontonowych

$f_{\mathrm{II,S}}$ – strzałka ugięcia wynikająca z odkształceń konstrukcji nośnej bloków pontonowych

g – przyspieszenie ziemskie

k_{c}– sztywność kątowa połączenia bloków pontonowych

l_i – długość i–tego odcinka modelu zastępczego belki zginanej

l_{m} – długość modelu bloku pontonowego

l_{p}– długość bloku pontonowego

m_{B} – masa wypartej cieczy

$m_{\mathrm{I-B}}$ – masa pojedynczego obciążenia w wariancie I–B

$m_{\mathrm{I-A}}$ – masa pojedynczego obciążenia w wariancie I–A

$m_{\mathrm{II-A}}$ – masa pojedynczego obciążenia w wariancie II–A

$m_{\mathrm{II-B}}$ – masa pojedynczego obciążenia w wariancie II–B

m_{jn} – masa jednostkowa mostu odniesiona do nośności

m_{mt} masa wody towarzyszącej

m_{m} – masa modelu bloku pontonowego

m_{p} – masa bloku pontonowego

p – empiryczny poziom istotności testu statystycznego (wartość p)

$p_{\mathrm{w}i}$ – ciśnienie wody w obszarze i

q – obciążenie równomiernie rozłożone

t_{m} – czas charakterystyczny modelu

t_{r} – czas charakterystyczny obiektu rzeczywistego

$u_{\mathrm{D}i}$ – ugięcie konstrukcji zmierzone w punkcie pomiarowym Di

$u_{\mathrm{D5,I-B}}$ – przemieszczenie w obszarze podpór zmierzone w wariancie I–B

$u_{\mathrm{śr}}$ – średnia wartość ugięcia

$u_{\mathrm{śr,I-A}}$ – przemieszczenie uśrednione dla wariantu obciążenia I–A

$u_{\mathrm{śr,I-B}}$ – przemieszczenie uśrednione dla wariantu obciążenia I–B

$u'_{\mathrm{D5,II-A}}$ – przemieszczenie w obszarze podpór wyznaczone dla wariantu II–A

v_{m} – prędkość modelu

v_{r} – prędkość obiektu rzeczywistego

$x_{\mathrm{P}i}$ – współrzędna x punktu charakterystycznego Pi

$x_{\mathrm{p}i}$ – położenie pontonu i w osi x

$x_{\mathrm{p}i-\mathrm{v}}$ – położenie pojazdu względem bloku pontonowego i

x_{v} – położenie pojazdu w osi x

$y_{\mathrm{P}i}$ – współrzędna y punktu charakterystycznego Pi

$y_{\mathrm{p}i}$– przemieszczenie pionowe (zanurzenie pozorne) bloku pontonowego i

$y_{\mathrm{p-w},ij}$ – przemieszczenie pionowe względem wody sektora *ij*

$y_{\mathrm{p-w}i}$ –przemieszczenie pionowe względem wody (zanurzenie rzeczywiste) bloku pontonowego i

$y_{\mathrm{w}i}$– przemieszczenia pionowe lustra wody w lokalizacji bloku pontonowego i

$\dot{y}_{\mathrm{p},ij}$ – prędkość pionowa sektora *ij* bloku pontonowego

$\dot{y}_{\mathrm{p-w},ij}$ – prędkość pionowa względem wody sektora *ij*

$\dot{y}_{\mathrm{p}i}$– prędkość pionowa bloku pontonowego i

$\dot{y}_{w,ij}$ – prędkość pionowa lustra wody w lokalizacji sektora *ij* bloku pontonowego

$\ddot{y}_{\mathrm{p-w},ij}$ – przyspieszenie pionowe względem wody sektora *ij*

$\ddot{y}_{\mathrm{p}i}$ – przyspieszenie pionowe bloku pontonowego i

$\ddot{y}_{\mathrm{w},ij}$ przyspieszenie pionowe wody w sektorze ij bloku pontonowego

$\ddot{y}_{\mathrm{p},ij}$ przyspieszenie pionowe sektora ij pontonu

z_{stat} – zanurzenie statyczne

z_0 – amplituda nurzania

α – przyjęty poziom istotności testu statystycznego (dopuszczalne prawdopodobieństwo popełnienia błędu I rodzaju)

α_p– kąt wzajemnego położenia bloków pontonowych

α_1 – składowa kąta wzajemnego położenia bloków pontonowych wynikająca z obrotu w przegubie w zakresie luzu

α_2 – składowa kąta wzajemnego położenia bloków pontonowych wynikająca z podatności elementów połączenia bloków pontonowych

α_3 – składowa kąta wzajemnego położenia bloków pontonowych wynikająca ze zginania konstrukcji nośnej bloków pontonowych

α_{fc} – kąt ugięcia sprężystego w przegubie

α_{g}– graniczny kąt luzu w przegubie

δy –odchylenie zanurzenia względem wartości odniesienia

ΔF_{B} – niepewność pomiarowa siły wyporu

ΔF_{Ip} – niepewność pomiarowa siły bezwładności pontonu i obciążenia

$\Delta(F_{\mathrm{Imt}} + F_{\mathrm{D}})$ – niepewność pomiarowa sumy sił oporu hydrodynamicznego i bezwładności masy towarzyszącej

ΔL_{P}– luz początkowy w łączeniu bloków pontonowych

ΔM – zakres zmienności momentu gnącego

Δm_{mt} – niepewność pomiarowa masy wody towarzyszącej

Δt – krok czasowy pomiaru

$\Delta y_{\mathrm{p-w}}$ – niepewność pomiarowa przemieszczenia pionowego bloku pontonowego

$\Delta \dot{y}_{\mathrm{p-w}}$– niepewność pomiarowa prędkości pionowej bloku pontonowego

$\Delta \ddot{y}_{\mathrm{p-w}}$– niepewność pomiarowa przyspieszenia pionowego bloku pontonowego

ρ – gęstość cieczy

Wprowadzenie

Mosty pontonowe, określane również jako mosty pływające, stanowią szczególną grupę konstrukcji, w których element nośny oparty jest na podporach pływających, zastępujących konwencjonalne podpory stałe. Podstawową zaletą tego rodzaju przepraw jest krótki czas budowy oraz możliwość ich zastosowania w warunkach, w których realizacja obiektu stałego byłaby utrudniona. Z tego względu mosty pontonowe odgrywają istotną rolę zarówno w zastosowaniach wojskowych, gdzie służą zapewnieniu mobilności wojsk i ciągłości działań operacyjnych, jak i w zastosowaniach cywilnych, zwłaszcza w lokalizacjach charakteryzujących się dużą głębokością.

Jednym z kluczowych zagadnień związanych z projektowaniem i eksploatacją mostów pontonowych jest identyfikacja oddziaływań środowiskowych decydujących o wielkości i rozkładzie obciążeń działających na konstrukcję. Oddziaływania te w znacznym stopniu determinują sposób kształtowania struktury nośnej mostu, a jednocześnie same rozwiązania konstrukcyjne wpływają na charakter generowanych obciążeń. Szczególne znaczenie ma w tym kontekście sposób łączenia bloków pontonowych, który może wpływać zarówno na globalną sztywność mostu, jak i na lokalny stan wytężenia jego elementów. W dostępnej literaturze zagadnienie to nie zostało dotychczas rozpoznane w stopniu wystarczającym, zwłaszcza w odniesieniu do mostów pontonowych typu wstęga.

Przedmiotem niniejszej rozprawy jest analiza wpływu sposobu łączenia bloków pontonowych na stan obciążeń w mostach pontonowych typu wstęga. Znaczenie podjętej tematyki wynika zarówno z jej aspektu poznawczego, związanego z pogłębieniem wiedzy o mechanizmach pracy tego rodzaju konstrukcji, jak i z wymiaru aplikacyjnego. Rozpoznanie wpływu struktury połączeń na rozkład momentów gnących oraz przemieszczenia pionowe bloków pontonowych może stanowić podstawę do usprawnienia procesu kształtowania mostów, poprawy właściwości użytkowych projektowanych w przyszłości obiektów oraz zwiększenia bezpieczeństwa ich eksploatacji.

Celem pracy jest zbadanie wpływu sposobu łączenia bloków pływających na obciążenia konstrukcji mostu pontonowego typu wstęga oraz określenie wytycznych projektowych uwzględniających sposób łączenia bloków w mostach pontonowych nowej generacji.

Układ rozprawy podporządkowano realizacji przyjętego celu badawczego. W rozdziałach 1 i 2 przedstawiono analizę obszaru badawczego, obejmującą

charakterystykę mostów pontonowych oraz przegląd literatury przedmiotu, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu parametrów połączeń bloków pontonowych na właściwości użytkowe mostów oraz metod modelowania ich pracy. W rozdziale 3 sformułowano cel i zakres badań, natomiast w rozdziale 4 przedstawiono plan i metodykę badań.

W rozdziale 5 zaprezentowano wstępną budowę opracowywanego w pracy modelu numerycznego oraz opisano sposób kształtowania jego elementów. Dokonano również identyfikacji parametrów konstrukcyjnych obiektu rzeczywistego, co umożliwiło ich uwzględnienie zarówno w modelu numerycznym, jak i doświadczalnym. W rozdziale 6 przedstawiono badania identyfikacyjne parametrów hydrodynamicznych mostu oraz zjawiska fali czołowej. Rozdział 7 poświęcono opracowaniu uogólnionego modelu fali czołowej, którego przygotowanie miało na celu uzyskanie możliwości symulowania tego zjawiska w środowisku numerycznym dla zróżnicowanych parametrów badanych konstrukcji.

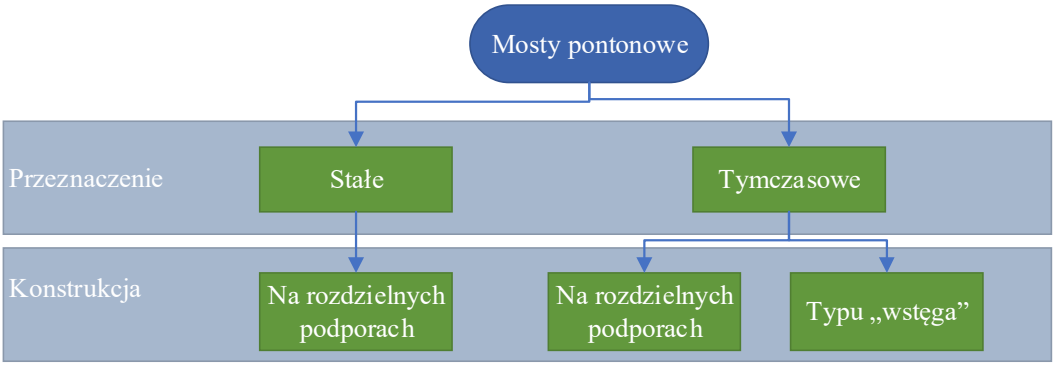
W rozdziałach 8 i 9 zaprezentowano implementację wyznaczonych odwzorowań w modelu numerycznym oraz przeprowadzono walidację całego modelu. W rozdziale 10 przedstawiono warianty konstrukcji mostu wyznaczone do badań porównawczych, zaprezentowano plan badań oraz omówiono uzyskane wyniki.

W pracy wykorzystano źródła obejmujące literaturę naukową dotyczącą badań mostów pontonowych, a także instrukcje techniczne i materiały informacyjne umożliwiające określenie parametrów oraz charakterystyki analizowanych konstrukcji. Wykorzystano również źródła prezentujące wyniki badań obiektu rzeczywistego — mostu IRB (ang. Improoved Ribbon Bridge) — które stanowiły podstawę identyfikacji parametrów konstrukcji odniesienia przyjętej do badań porównawczych. Ponadto korzystano z podręczników dotyczących modelowania obiektów w skali oraz z dokumentacji oprogramowania obliczeniowego. W celu wizualizacji wybranych zagadnień wykorzystano także materiały graficzne dostępne w źródłach internetowych.

1. Przegląd konstrukcji mostów pontonowych

Mosty pływające można podzielić na konstrukcje stałe i tymczasowe, co bezpośrednio wynika z ich przeznaczenia oraz warunków eksploatacji. Mosty o charakterze stałym projektowane są z myślą o długotrwałym użytkowaniu w jednym miejscu, bez konieczności relokacji. Takie założenie umożliwia budowę konstrukcji o znacznych rozmiarach, dużym zapasie stateczności oraz wysokiej zdolności do przenoszenia obciążeń użytkowych. Z tego względu znajdują one zastosowanie głównie w infrastrukturze cywilnej, gdzie kluczowe znaczenie mają: trwałość, niezawodność oraz odporność konstrukcji na zmienne warunki środowiskowe a mobilność nie jest wymagana. Stałe mosty pontonowe budowane są zazwyczaj jako konstrukcje na rozdzielnych podporach pływających połączonych przęsłami. Z kolei mosty o charakterze tymczasowym projektowane są w taki sposób, aby zapewnić łatwość transportu, szybki montaż i demontaż, a także możliwość wielokrotnego wykorzystania w różnych lokalizacjach. Ich struktura jest modułowa, co pozwala na elastyczne dostosowanie długości i geometrii mostu do aktualnych warunków terenowych i hydrologicznych. Konstrukcje tego typu są powszechnie stosowane przez wojska inżynieryjne do tworzenia przepraw tymczasowych, gdzie poza zapewnieniem wymaganej nośności i przepustowości, kluczowe znaczenie mają mobilność oraz krótki czas budowy.

W zależności od sposobu rozmieszczenia i współpracy podpór, wyróżnia się dwa podstawowe typy tego rodzaju obiektów: mosty na rozdzielnych podporach oraz konstrukcje w systemie ciągłym, w których podpory pozostają w nieprzerwanym kontakcie z powierzchnią wody na całej długości konstrukcji. Szczególną odmianą mostów ciągłych są mosty pontonowe typu wstęga. Charakteryzują się one tym, że są zbudowane z jednolitych bloków pontonowych (bloków pływających, pontonów) połączonych w konstrukcję ciągłą, spełniającą jednocześnie rolę podpór, konstrukcji nośnej oraz jezdni [1]. Omówioną klasyfikację zilustrowano na Rys. 1.1.



Rys. 1.1. Klasyfikacja mostów pontonowych

Wprowadzanie do eksploatacji pojazdów wojskowych o coraz większej masie oraz rosnące wymagania dotyczące tempa działań bojowych wymuszają zmiany w konstrukcji mostów pontonowych. Pierwsze konstrukcje mostów pontonowych typu wstęga powstały w latach 60. XX wieku. Od tego czasu były one wielokrotnie modernizowane. Udoskonalenia obejmowały materiały, konstrukcję oraz technologie montażu i umożliwiły zwiększenie ich nośności, trwałości oraz funkcjonalności. Współczesne mosty pontonowe stanowią zaawansowane technicznie systemy modułowe, pozwalające na tworzenie przepraw dostosowanych do aktualnych wymogów działań taktycznych.

W siłach zbrojnych najczęściej wykorzystywane są mosty tymczasowe typu wstęga. System komponentów pozwalających na budowę i utrzymanie mostu pontonowego nazywany jest przez wielu producentów parkiem pontonowym. Każda konstrukcja tego typu składa się z następujących komponentów:

- rzecznych bloków pontonowych, tworzących główną część mostu;
- brzegowych bloków pontonowych lub ramp, umożliwiających wjazd pojazdów na rzeczne bloki pontonowe;
- kutrów lub innych środków napędowych, umożliwiających manewrowanie blokami pontonowymi na przeszkodzie wodnej oraz utrzymywanie mostu w zadanej osi podczas realizacji przeprawy (zwłaszcza na wodach płynących).

Na przestrzeni lat, w wyniku doświadczeń zdobytych podczas eksploatacji, zmieniających się wymagań wojska oraz pojawiania się nowych możliwości technicznych i technologicznych, poszczególne elementy tych konstrukcji podlegały ewolucji. Niniejszy przegląd zawiera analizę głównych obszarów wprowadzanych zmian oraz wynikających z nich kierunków rozwoju mostów pontonowych. Analizie poddano mosty pontonowe, które powszechnie wykorzystywane w armiach różnych państw

i reprezentują istniejące rozwiązania oraz tendencje rozwojowe w zakresie projektowania tego typu konstrukcji.

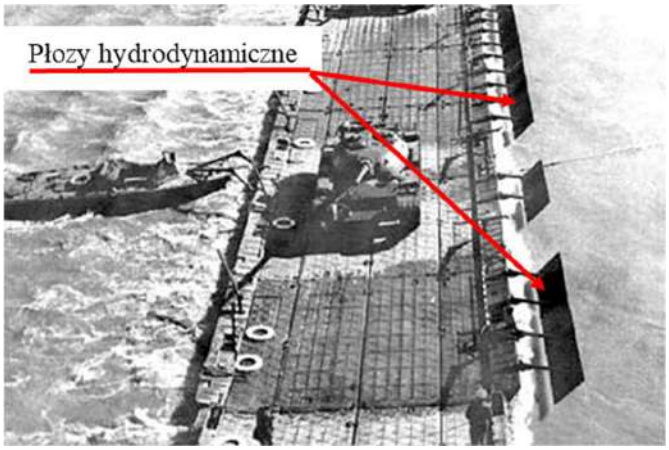
Pierwszym rozwiązaniem mostu pontonowego typu wstęga był rosyjski park PMP, wprowadzony do użytku w 1962 roku. Przy prędkości nurtu wody do 2 m/s charakteryzował się on nośnością 60 ton i zapewniał możliwość przeprawiania pojazdów po jednym pasie o szerokości 4,5 m lub po dwóch jednokierunkowych pasach o sumarycznej szerokości 6,5 m.

Park PMP składa się z mobilnych bloków pontonowych, które w konfiguracji złożonej (Rys. 1.2), mogą być załadowane na pojazdy i transportowane. W trakcie budowy mostu bloki pontonowe są rozkładane, co umożliwia uzyskanie odpowiedniej szerokości, wodowane i łączone ze sobą, tworząc konstrukcję mostową (Rys. 1.3). Taki sposób funkcjonowania jest charakterystyczny dla wszystkich współczesnych mostów pontonowych. Łączenie PMP odbywa się przy życiu zamków znajdujących się w dolnej części burt (Rys. 1.2). Pojedynczy blok pontonowy pozwala na wykonanie 6,91 m odcinka mostu. [2]



Rys. 1.2. Blok pontonowy parku PP-2005 w położeniu transportowym, oznaczono zamek do łączenia pontonów [3]

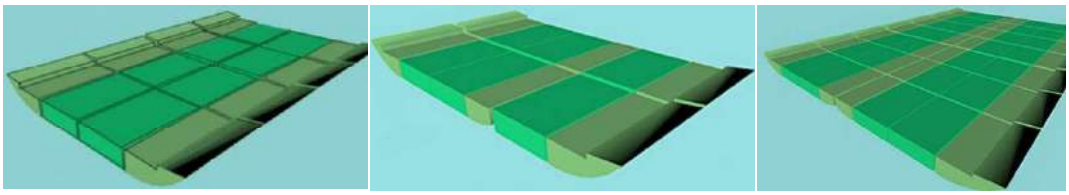
Na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat wprowadzano kolejne wersje tego mostu o ulepszanej konstrukcji. Zmodernizowana wersja PMP-M z 1975 r. wyposażona została w płozy hydrodynamiczne, pozwalające na ograniczenie negatywnego wpływu na most nurtu cieku wodnego o względnie dużej prędkości (Rys. 1.3). Umożliwiły one zwiększenie dopuszczalnej prędkości nurtu wody z 2 m/s do 3 m/s.



Rys. 1.3. Most PMP-M z rozłożonymi płozami hydrodynamicznymi [4]

W 1984 r. wprowadzono do eksploatacji most PPS – 84. Główną modyfikacją poprzedniej konstrukcji tego mostu (Rys. 1.4a) było zwiększenie jego szerokości poprzez zastosowanie dodatkowego segmentu odpowiadającego połowie bloku pontonowego – „konfiguracja 1,5" (Rys. 1.4b) oraz całego dodatkowego bloku pontonowego – konfiguracja podwójna (Rys. 1.4c). Pozwoliło to na zwiększenie nośności mostu do 90 t dla wstęgi w „konfiguracji 1,5" oraz do 120 t dla wstęgi w „konfiguracji 2" oraz zwiększenie dopuszczalnej prędkości nurtu wody do 4 m/s dla wstęgi podwójnej. Wraz ze zwiększeniem szerokości mostu wprowadzono także zmodernizowane kutry holownicze o dwukrotnie większej mocy. Nowa wersja pontonów została także wydłużona do 7,36 m. [2]

a) b) c)



Rys. 1.4. Warianty mostów pontonowych budowanych z parku PP-84: a) konfiguracja 1, b) konfiguracja 1,5, c) konfiguracja 2 [5]

Wprowadzony w 1991 r. most PP–91 wyposażony został w zmotoryzowane bloki pontonowe (Rys. 1.5a), które zastąpiły 4 z 6 kutrów napędowych będących na wyposażeniu pojedynczego zestawu parku (Rys. 1.5b). Pozwalają one na zwiększenie długości mostu, a także na uproszczanie i ustabilizowanie środków napędowych. Zmotoryzowane bloki pontonowe nie mogą być wpięte w mosty w „konfiguracji 1,5" oraz „konfiguracji 2", w związku z czym do ich budowy nadal niezbędne są standardowe kutry holownicze.

a) b)



Rys. 1.5. Jednostki napędowe parku PP-91: a) blok zmotoryzowany MZ-235 wpięty w oś mostu (kolor czerwony), b) kuter holowniczy BMK-255 [6]

Najnowsza modernizacja parku pontonowego PP-91 do wersji PP-2005 obejmowała wyłącznie zmianę środków transportowych. Nie dokonano modyfikacji konstrukcji mostowej.

W 1964 roku wprowadzono na wyposażenie Sił Zbrojnych RP mobilny park pontonowy PP-64 przeznaczony do budowy mostów pływających i promów. Park ten składa się z 48 bloków pontonowych rzecznych (Rys. 1.6) i 6 bloków brzegowych.



Rys. 1.6. Blok pontonowy parku PP-64 [7]

Wymiary pontonów parku PP-64 są znacznie mniejsze niż w przypadku parku PMP, co wynika z wielkości dostępnego ówcześnie środka transportowego w postaci samochodu STAR 660 o ładowności w warunkach terenowych 2500 kg [8]. Wykorzystując ten park pontonowy, w zależności od wymaganej nośności mostu i prędkości nurtu wody, można zbudować most w następujących konfiguracjach:

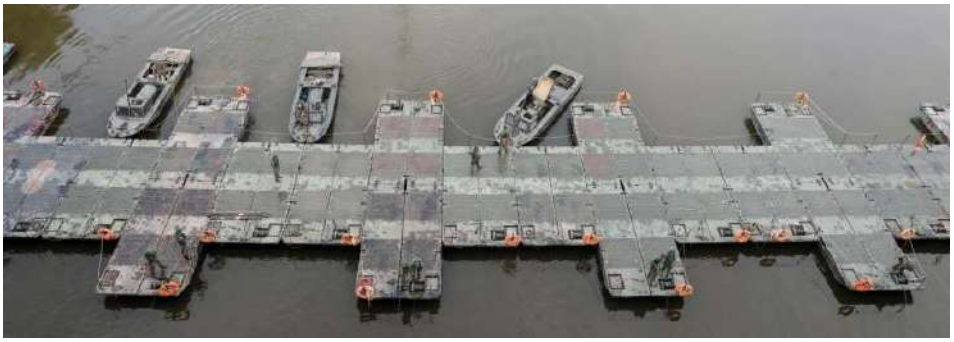
- wstęga pojedyncza - nośność 40 t - długość całkowita 186 m;
- wstęga podwójna - nośność 80 t - długość całkowita 97 m (Rys. 1.7a);
- wstęga mieszana typu “A” - nośność 40 t - długość całkowita 152 m;
- wstęga mieszana typu “B” - nośność 40 t - długość całkowita 145 m;
- wstęga mieszana typu “C” - nośność 50 t - długość całkowita 133,8 m (Rys. 1.7b);

– wstęga mieszana typu “D” - nośność 50 t - długość całkowita 122,7 m.

a)



b)



Rys. 1.7. Mosty zbudowane z wykorzystaniem PP-64: a) konfiguracja wstęgi mieszanej typu C [9], b) konfiguracja wstęgi podwójnej [10]

Łączenie bloków pontonowych w most odbywa się w tym rozwiązaniu przy życiu zamków znajdujących się w dolnej części burt. Zamki te tworzą przeguby łączące pontony w pasie dolnym mostu, w pasie górnym w stanie nieobciążonym występuje luz. W stanie obciążonym pontony swobodnie opierają się o siebie krawędziami stykowymi (Rys. 1.8.).



Rys. 1.8. Rozmieszczenie łączników burtowych mostu PP-64 [11]

W wojsku polskim wykorzystywany jest również Park Pontonowy Morski PPM–71. Jest to zmodernizowana wersja parku PP-64, w której zwiększono wyporność, wzmocniono konstrukcję oraz zastosowano amortyzatory hydrauliczne w układzie łączenia bloków pontonowych. Amortyzatory zastosowano w celu zminimalizowania skutków dynamicznych przemieszczeń bloków pontonowych związanych z falami morskimi [1].

Armia Stanów Zjednoczonych w 1973 roku wprowadziła na wyposażenie przedstawiony na Rys. 1.9 most IFB/RB (Improved Float Bridge/Ribbon Bridge), który pod wieloma względami stanowi kopię parku PMP. W konstrukcji tej zachowano między innymi zbliżone do PMP: geometrię kadłuba, system składania bloków pontonowych do pozycji transportowej oraz sposób ich łączenia, jednak do jej wykonania, w odróżnieniu do PMP, zastosowano stop aluminium, co umożliwiło redukcję masy pojedynczego bloku pontonowego o 20 % [12]. Most ten został zmodernizowany w 2002 roku, a jego nowa wersja, nazwana IRB (Improved Ribbon Bridge) charakteryzuje się zwiększoną nośnością maksymalną do klasy MLC 105T/105W. Wymiary, sposób rozkładania oraz łączenia bloków mostu pozostały bez zmian, jednak jego masa wzrosła w porównaniu z IFB/RB do 6350 kg (o blisko 17 %). Jest to skutek wzmocnienia konstrukcji nośnej pontonu, mającego na celu zapewnienie przenoszenia większych obciążeń.



Rys. 1.9. Most pontonowy IRB w czasie budowy przeprawy [13]

Nośność maksymalna mostu IRB jest wyznaczona w warunkach wody stojącej i maleje wraz ze wzrostem prędkości nurtu oraz spadkiem głębokości przeszkody wodnej. Przy prędkości nurtu wody 2,7 m/s nośność nominalna mostu zapewnia możliwość

przeprawiania pojazdów klasy MLC 55, lecz maleje w przypadku przeszkód wodnych o głębokości poniżej 2 m. Dopuszczalna prędkość przejazdu pojazdów, przy klasie nośności mostu powyżej MLC 40, wynosi 25 km/h [14]. Bloki łączone są z wykorzystaniem przegubów umiejscowionych w dolnym pasie mostu, analogicznie jak w moście PMP. W 2017 roku powstała wersja stalowa mostu RB – SRB (Steel Ribbon Bridge), która umożliwia zwiększenie nośności mostu do klasy MLC 120W/85T, jednak całkowita masa pojedynczego bloku tej wersji mostu wynosi 7900 kg i jest większa o 25% w porównaniu z aluminiowym mostem IRB [15].

W 1985 roku w armii francuskiej wdrożony został pontonowy most PFM (franc. Pont Flottant Motorisé) (Rys. 1.10). Jest to najnowsze generacyjnie rozwiązanie tego typu konstrukcji, różniące się istotnie od wcześniej opisanych mostów pontonowych. Dzięki wykorzystaniu ciągników siodłowych do transportu mostu możliwe było zwiększenie wymiarów bloków pontonowych do 10,2 m długości i 9,8 m szerokości. Rozkładanie bloków pontonowych w położenie robocze realizowane jest przed rozpoczęciem procesu zrzutu do wody za pomocą siłowników hydraulicznych umieszczonych na pojeździe transportowym.



Rys. 1.10. Przeprawa mostowa zrealizowana z wykorzystaniem PFM [16]

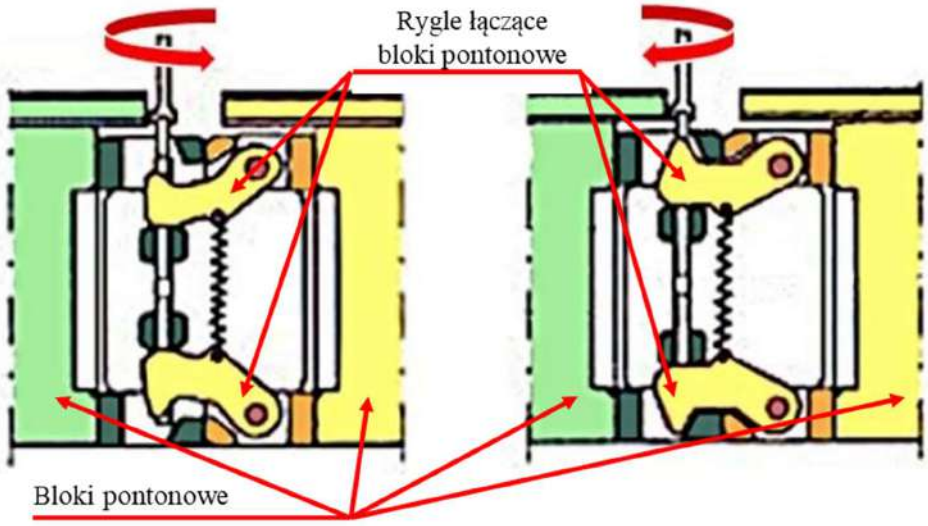
Pojedynczy blok pontonowy mostu PFM zbudowany jest z sekcji centralnej, dwóch sekcji bocznych oraz pływaków. Sekcje centralna oraz boczne wykonane są ze stopów aluminium i łączone są stalowymi przegubami, z kolei pływaki wykonane są z kompozytu szklanego. Konstrukcja ta umożliwia przeprawianie pojazdów o maksymalnej klasie nośności MLC80W/70T. Nośność ta zmniejsza się wraz ze wzrostem prędkości i głębokości nurtu cieku wodnego. Dla przeszkody o prędkości nurtu 2 m/s i głębokości 3 m, klasa nośności tego mostu wynosi MLC60W. W odróżnieniu do pozostałych, opisanych powyżej mostów, w tym rozwiązaniu

rejestrowana jest liczba przejazdów, na podstawie której ustalany jest termin przeglądu technicznego (Tabela 1.1).

Tabela 1.1. Liczba przeprawianych pojazdów po której należy przeprowadzić przegląd główny [17]

MLC	Liczba cykli	
	Pojazdy gąsienicowe	Pojazdy kołowe
30	59 787	-
40	21 350	-
50	7 654	-
60	2 755	-
70	-	2 838
80	-	1 020

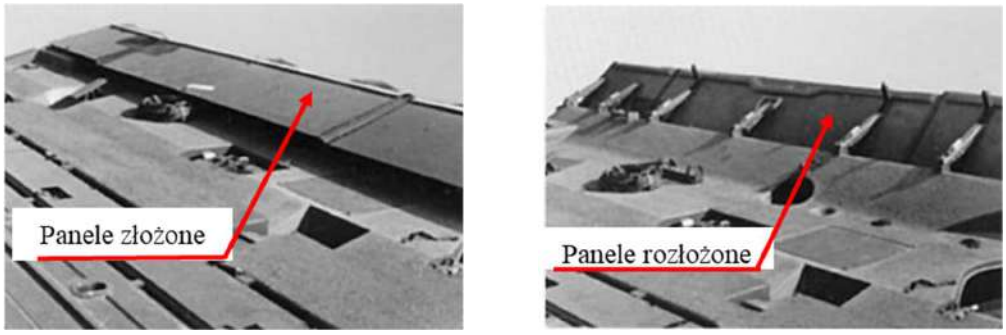
Most PFM jako jedyny charakteryzuje się sztywnym łączeniem bloków pontonowych. W miejsce stosowanych przez innych producentów przegubów, zastosowano urządzenia zapewniające sztywne ryglowanie sąsiadujących bloków pontonowych (Rys. 1.11).



Rys. 1.11. Schemat łączenia bloków pontonowych PFM [17]

W celu zwiększenia wysokości wolnej burty, bloki pontonowe zostały wyposażone również w panele, przedstawione na Rys. 1.12.

a) b)



Rys. 1.12. Panele zwiększające wysokość wolnej burty w moście PFM: a) konfiguracja transportowa, b) konfiguracja robocza [17]

W celu ograniczenia liczby pojazdów potrzebnych do transportu mostu PFM, w konstrukcji tego mostu zastosowano zintegrowane z pontonem pędniki (Rys. 1.13a) oraz rampy najazdowe (Rys. 1.13b). Zastosowanie zintegrowanych pędników zmniejsza również czas budowy przeprawy, ponieważ każdy blok pontonowy posiada własny napęd mechaniczny, usprawniający manewrowanie tymże blokiem. W 2020 roku wprowadzono wersję mostu PFM F2 o klasach nośności MLC 90T dla pojazdów gąsienicowych i MLC 100W dla pojazdów kołowych.

a) b)



Rys. 1.13. Widok konstrukcji mostu PFM: a) zintegrowany pędnik [18], b) prom z widocznymi rampami najazdowymi[18], [19]

Alternatywą dla mostów pontonowych typu wstęga są konstrukcje oparte na niezależnych podporach. Przykładem współczesnego rozwiązania tego typu jest most M3 – eksploatowany od lat 90 XX wieku w siłach zbrojnych Niemiec i Wielkiej Brytanii, samobieżny system pontonowy produkowany w Niemczech (Rys. 1.14). Charakterystyczną cechą konstrukcji mostu M3 jest możliwość szybkiego tworzenia przepraw mostowych jak i promowych. Pojedynczy moduł M3 stanowi w pełni zintegrowany, czterokołowy pojazd z napędem na wszystkie koła, wykonany głównie ze stopów aluminium. Moduł taki wyposażony jest w instalację hydrauliczną umożliwiającą zdalne rozkładanie bocznych pływaków bezpośrednio przed wejściem do

wody. Połączenie kolejnych modułów w linię mostu realizowane jest za pomocą hydraulicznie rozkładanych ramp montowanych przy pomocy pokładowego dźwigu (Rys. 1.14). Każdy pojazd może również funkcjonować niezależnie jako prom.

Do budowy pełnowymiarowego mostu o długości około 100 metrów i klasie nośności MLC 70 wymaganych jest osiem modułów. Ostateczna nośność mostu zależy od liczby wykorzystanych modułów, warunków hydrologicznych (takich jak prędkość przepływu i głębokość wody) oraz prędkości przejazdu pojazdów.

Wprowadzone modernizacje systemu M3 znacząco skróciły czas montażu oraz uprościły obsługę operacyjną. Zwiększono także długość pojazdu oraz wprowadzono możliwość uniesienia kół po wejściu do wody, co ogranicza opory hydrodynamiczne i poprawia sterowność w wodzie.



Rys. 1.14. Przeprawa mostowa zrealizowana z wykorzystaniem M3 [20]

Zestawienie podstawowych cech konstrukcyjnych i parametrów użytkowych opisanych powyżej mostów pontonowych przestawiono w Tabela 1.2. Na przestrzeni lat obserwuje się wyraźny trend zwiększania nośności eksploatowanych mostów, co osiągano głównie poprzez wzmacnianie elementów struktury nośnej. Takie podejście skutkowało jednak istotnym wzrostem masy całkowitej konstrukcji. Pod względem rozwiązań kinematycznych przez długi czas zmiany były niewielkie –dominowały układy przegubowe – dopiero wprowadzenie mostu PFM stanowiło przełom w podejściu do zastosowanego rozwiązania konstrukcyjnego.

Tabela 1.2.Zestawienie podstawowych cech konstrukcyjnych i parametrów użytkowych analizowanych mostów pontonowych

	PMP	PMP-M	PPS-84	PP-91/PP-2005	PP-64	RB/IFB	IRB	SRB	PFM	PFM F2	M3
Rok wprowadzenia	1962	1975	1984	1991	1964	1973	2002	2017	1985	2020	1982
Konstrukcja połączeń bloków pontonowych	przegubowa								sztywna		oddzielne podpory
Cechy szczególne	1 pas 4,5 m 2 pasy 6,5 m	płozy hydrodyn.	konfiguracja 1/1,5/2	kutry w osi mostu	konfiguracja 1/ 2	1 pas 4,1m	stopy lekkie	1 pas 4,5 m 2 pasy 6,5 m	zintegrowany napęd		konstrukcja samojezdna
Materiał konstrukcyjny	stal					stal, stop aluminium		stal	stal, stop aluminium, kompozyt		
Masa bloku pontonowego	6 910	6 910	8550		3 600	5 579	6350	7 900	11000	-	25 300
Masa jednostkowa mostu/nośność [kg/m/t]	17,2	17,2	19,3		24	11,9	9,8	9,8	13,5	-	54
Dopuszczalna prędkość nurtu wody (MLC 60)	2	3	3/3/4*		-/-/2,5*	-	2,4	-	2,8	-	3,5
Długość bloku pontonowego	6,7	6,7	7,36		3,7	6,7	6,9	6,7	10,2	10,2	6,6
Liczba pontonów na 100m mostu	15	15/22,5/30*			27/-/54*	15	15	15	10	10	8
Szerokość mostu [m]	8,3	8,28	8,28/11,89/15,5*		6,25	8,4	8,63	8,6	10,2	10,2	13
Wysokość/wysokość konstrukcji nośnej	1,1 / 0,75				0,85	1,12		1,4	1,18/0,72	0,96	
Maks. prędkość jazdy pojazdów kołowych [km/h]	czołgi do 30 km/h pojazdy kołowe bez ograniczeń				kołowe: 40 gąsienicowe 15	< MLC40: 40 km/h >MLC40: 25 km/h		-	kołowe: 25 gąsienicowe: 15	-	b.d.
Nośność nominalna jeden pas	60 t	60/90/120 t*			40/-/80 t*	MLC 70	MLC96 W/ 80T	MLC120W /85T	MLC80W/ 70T	MLC 100W/ 90T	MLC70T

*konfiguracje 1/1,5/2

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu rozwiązań konstrukcyjnych można stwierdzić, że rozwój mostów pontonowych był dotychczas w dużym stopniu zdeterminowany koniecznością jednoczesnej poprawy trzech kluczowych parametrów użytkowych: nośności, przepustowości oraz mobilności systemu. W konstrukcjach starszej generacji dla wstęgi pojedynczej uzyskiwano nośność rzędu 40–60 t (PP-64, PMP), podczas gdy rozwiązania nowsze osiągają wartości 90–110 t (np. IRB/SRB, PFM F2). Zwiększenie nośności osiągano poprzez wzmocnienie struktury nośnej oraz poszerzenie mostu, realizowane m.in. w konfiguracjach „1,5" i „2". Należy jednak podkreślić, że zwiększanie nośności mostu wiąże się ze wzrostem jego masy oraz gabarytów bloków pontonowych, co prowadzi do obniżenia mobilności parku. Ograniczanie tego niekorzystnego efektu osiągano poprzez stosowanie materiałów o korzystnym stosunku wytrzymałości do masy (stopy lekkie, kompozyty) oraz integrację wyposażenia dodatkowego z blokami pontonowymi (np. pędniki, rampy). W parkach starszego typu manewrowanie i pozycjonowanie mostu realizowano z wykorzystaniem kutrów holowniczych, natomiast w konstrukcjach nowszych obserwuje się zastosowanie: napędu zintegrowanego (PFM), bloków zmotoryzowanych (PP-91) lub rozwiązań samobieżnych (M3). Dzięki temu możliwe jest skrócenie czasu budowy przeprawy oraz zmniejszenie liczby pojazdów wymaganych do przewozu parku.

Większość oferowanych na rynku mostów pontonowych wykorzystuje przegubowe systemy łączenia bloków. Pierwsze tego typu rozwiązania wprowadzono już w pierwszych parkach wprowadzonych do eksploatacji w 1962 r. i mimo upływu czasu, pozostają one najbardziej rozpowszechnionymi. Alternatywny systemem sztywnego łączenia bloków pontonowych, wprowadzono w 1985 r. w mostach PFM. Produkująca je o firma CNIM jest jedyną, która wykorzystuje ten system również w najnowszych generacjach swojego produktu. Zastosowanie odmiennego sposobu łączenia bloków potencjalnie zmienia wartość zanurzenia oraz sił przekrojowych i momentów gnących obciążających strukturę mostu. Należy podkreślić, że z uwagi na militarne przeznaczenie analizowanych konstrukcji dostęp do dotyczących ich wyników badań oraz możliwość ich publikacji są znacząco ograniczone. W konsekwencji napotkano trudności w uporządkowaniu wpływu zaprezentowanych sposobów łączenia bloków mostów pontonowych na wartości obciążeń, odpowiedź dynamiczną oraz właściwości użytkowe tychże konstrukcji.

2. Analiza problematyki badawczo-konstrukcyjnej mostów pontonowych

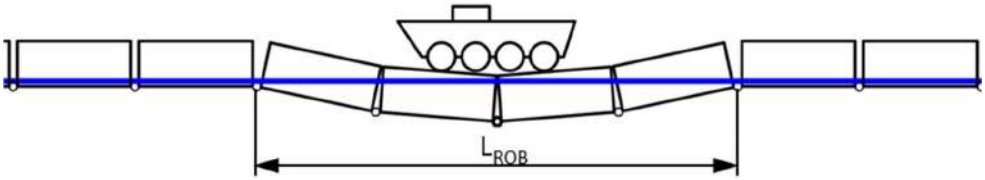
2.1. Problemy konstrukcyjne wojskowych środków przeprawowych

Konstrukcje wojskowych środków przeprawowych muszą spełniać szereg wymagań technicznych i taktycznych, które decydują o funkcjonalności i efektywności ich użycia na polu walki. Najważniejszymi parametrami do oceny konstrukcji mostów pontonowych są:

- nośność określająca maksymalną masę lub klasę MLC pojazdów, które mogą poruszać się po moście;
- dopuszczalne prędkości poruszania się pojazdów;
- dopuszczalne odległości między pojazdami;
- dopuszczalna prędkość nurtu wody, przy której most zapewnia wymaganą nośność;
- minimalna głębokość przeszkody wodnej przy której most zapewnia wymaganą nośność;
- czas budowy przeprawy;
- siły i środki potrzebne do budowy przeprawy [21].

Z taktycznego punktu widzenia najważniejszymi parametrami mostów pontonowych są nośność oraz przepustowość, która wynika z dopuszczalnych prędkości i odległości między pojazdami. Z uwagi na zwiększającą się masę wykorzystywanego sprzętu wojskowego, mosty muszą zapewniać odpowiednie wartości nośności dostosowane do stawianych wymagań. Dopuszczalne prędkości oraz odległości między pojazdami określane są przez producentów w zależności od klas obciążeń pojazdu (lub jego masy i typu). Oba te parametry przekładają się na przepustowość przeprawy, która odgrywa kluczową rolę w tempie przerzutu sił i środków przez przeszkodę wodną. Jej zwiększenie przyspiesza prowadzenie działań. Ponadto skrócenie czasu przeprawiania sprzętu jest szczególnie istotne, ponieważ stanowi ona łatwy i znaczący cel dla przeciwnika. [22], [23]

Mosty pontonowe typu wstęga wykonywane są jednolitych bloków pływających (pontonów/bloków pontonowych), które łączone są w ciągłą konstrukcję. Pod wpływem ciężaru pojazdu most ugina się w łuk o długości L_{ROB} definiowanej jako długość robocza (Rys. 2.1). Na tym odcinku mostu przenoszone są obciążenia wynikające z ciężaru pojazdu.



Rys. 2.1. Schemat układania się mostu pontonowego obciążonego ciężarem pojazdu na powierzchni wody

Wartość siły wyporu, wymagane zanurzenie konstrukcji oraz oddziaływanie nurtu cieku wodnego wpływają na warunki pracy mostu pływającego, determinując jego nośność i przepustowość. Decydujące znaczenie dla właściwej eksploatacyjnego obiektu pływającego ma zachowanie odpowiedniego marginesu bezpieczeństwa w odniesieniu do dwóch kryteriów:

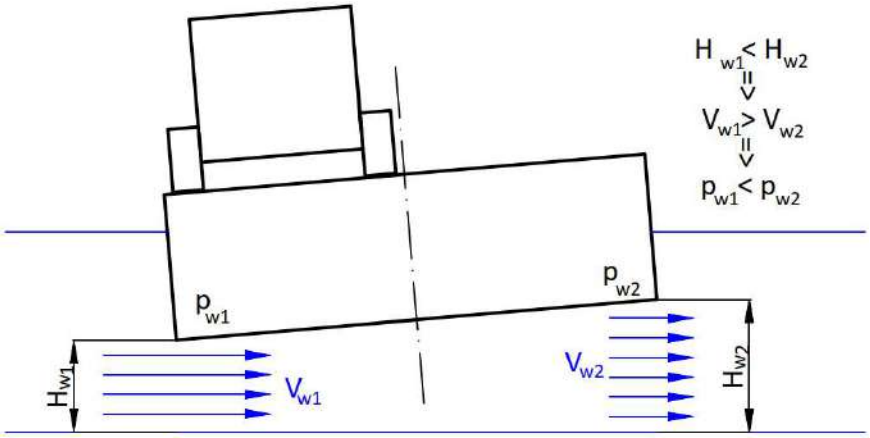
- pływalności;
- stateczności poprzecznej.

Siła wyporu generowana przez most pontonowy zależy od jego szerokości i długości roboczej oraz od średniego zanurzenia. Jej wartość musi równoważyć ciężar przeprawianego pojazdu wraz z obciążeniami dodatkowymi, w tym obciążeniami dynamicznymi. Jednocześnie dopuszczalne maksymalne zanurzenie powinno pozostawać mniejsze od wysokości burty, z zachowaniem odpowiedniego zapasu. Zapas ten określa się jako zapas pływalności lub wysokość wolnej burty.

Dodatkowo na wartość sił oddziaływania środowiska wodnego na most wpływ ma falowanie powierzchni wody, które może być generowane przez środowisko zewnętrzne oraz przez sam most. W czasie przejazdu pojazdów po mostach zanurzenia kolejnych bloków pontonowych generują powstanie fali czołowej [1]. Przemieszcza się ona wzdłuż osi mostu i może prowadzić do zmian rozkładu lokalnych wartości zanurzenia poszczególnych pontonów, a w konsekwencji wpływać na rozkład sił wyporu w strefie przenoszenia obciążeń od pojazdów, co bezpośrednio przekłada się na wartości momentów gnących oddziałujących na konstrukcję mostu.

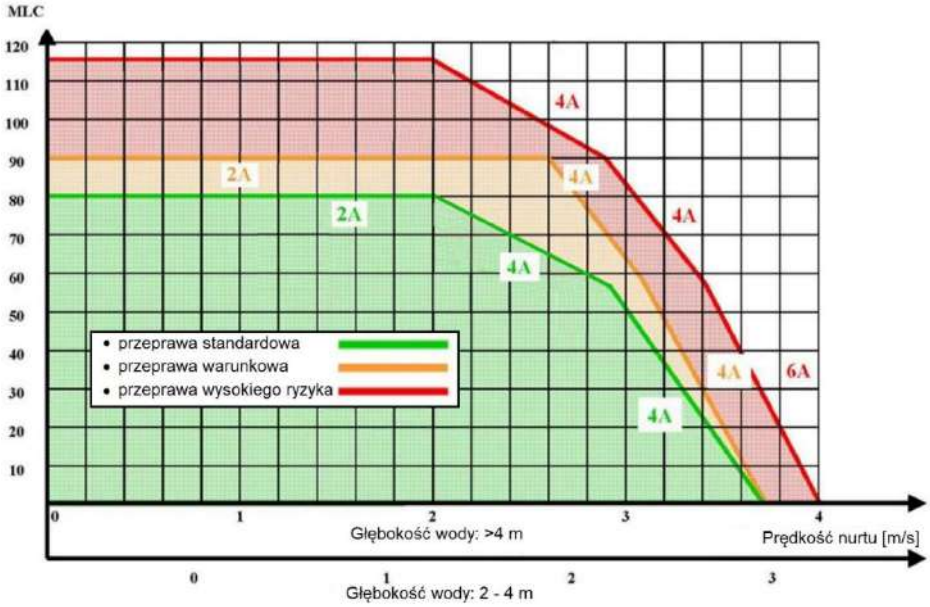
Zachowanie stateczności poprzecznej stanowi istotne wyzwanie, zwłaszcza ze względu na możliwość powstania momentu wywracającego wywołanego hydrodynamicznym oddziaływaniem nurtu wody. W przypadku mimośrodowego obciążenia mostu, na przykład gdy pojazd zjedzie z osi jezdni, konstrukcja ulega przechyłowi. Skutkuje to zwiększeniem zanurzenia jednej strony pontonu, przez co w jej obszarze następuje zmniejszenie przekroju przepływu, wzrost prędkości strugi wody V_{w1}

i spadek ciśnienia hydrostatycznego p_{w1}. Z kolei pod mniej zanurzoną częścią pontonu przekrój przepływu jest większy, dlatego prędkość V_{w2} jest mniejsza, a ciśnienie p_{w2} – większe (Rys. 2.2). Różnica wartości ciśnień p_{w1} i p_{w2} powoduje powstanie momentu destabilizującego, który sprzyja dalszemu przechylaniu się pontonu. Efekt ten jest szczególnie znaczący w przypadku przeszkód wodnych o małej głębokości, a w skrajnym przypadku może prowadzić do zalania pokładu oraz utraty stateczności konstrukcji [50].



Rys. 2.2. Rozkład prędkości wody i ciśnienia hydrostatycznego pod niesymetrycznie obciążonym blokiem pontonowym (p_w – ciśnienie hydrostatyczne pod dnem pontonu, V_w – prędkość wody, H_w – wysokość przekroju wody pod kadłubem)

Problematyka stateczności oraz pływalności mostów pontonowych jest ujęta w dokumencie normalizacyjnym STANAG 2021. W normie tej zdefiniowano 16 klas obciążenia, oznaczonych od MLC 4 do MLC 150. Każdej klasie odpowiada obciążenie mostu wywołane przez wzorcowy pojazd kołowy lub gąsienicowy o określonej masie, układzie jezdnym i wymiarach. Nośność mostu wyznacza się poprzez porównanie efektów obciążenia generowanych przez analizowany pojazd z efektami obciążenia odpowiadającymi pojazdowi wzorcowemu dla danej klasy MLC. Zgodnie z normą producenci mostów określają dla danej konstrukcji jej nośność i przepustowość z uwzględnieniem prędkości nurtu oraz głębokości przeszkody wodnej. Maksymalne wartości tych parametrów mogą być osiągane jedynie w korzystnych warunkach, tj. przy braku nurtu oraz dużej głębokości przeszkody wodnej. Pogorszenie tych warunków, w szczególności wzrost prędkości nurtu lub zmniejszenie głębokości zanurzenia, skutkuje koniecznością obniżenia dopuszczalnej nośności i przepustowości przeprawy. Przykładową charakterystykę nośności mostu pontonowego przedstawiono na Rys. 2.3.



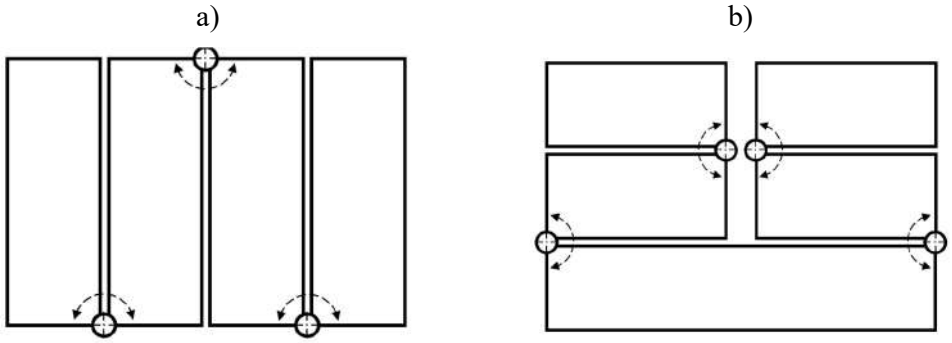
Rys. 2.3. Nośność mostu PFM dla różnych wartości prędkości nurtu i głębokości wody [17]

Dopuszcza się warunkowe zwiększenie nośności mostu przy zachowaniu zaostrzonych warunków bezpieczeństwa. Odbywa się to jednak kosztem obniżenia przepustowości przeprawy. W normie STANAG 2021 zdefiniowane zostały trzy klasy zaostrzonych warunków bezpieczeństwa:

- przeprawa standardowa (ang. normal crossing) – dopuszcza mimośrodowość obciążenia do 0,5 m, minimalną odległość między pojazdami 30 m, prędkość jazdy 25 km/h dla MLC 30 i 15 km/h dla pojazdów powyżej MLC 30;
- przeprawa warunkowa (ang. caution crossing) – zwiększająca dopuszczalną nośność – wymaga zaostrzonych warunków bezpieczeństwa: brak dopuszczalnej mimośrodowości obciążenia (konieczność prowadzenia pojazdu przez przewodnika), odległość między pojazdami określona przez producenta (zwykle około 50 m), prędkość jazdy 5 km/h, zakaz przyspieszania i hamowania;
- przeprawa wysokiego ryzyka (ang. risk crossing) – pozwalająca na uzyskanie maksymalnej nośności – najbardziej restrykcyjne warunki: brak mimośrodowości obciążenia (pojazd prowadzony przez przewodnika), na moście dopuszczalny tylko jeden pojazd, maksymalna prędkość 5 km/h, zakaz przyspieszania i hamowania. [24]

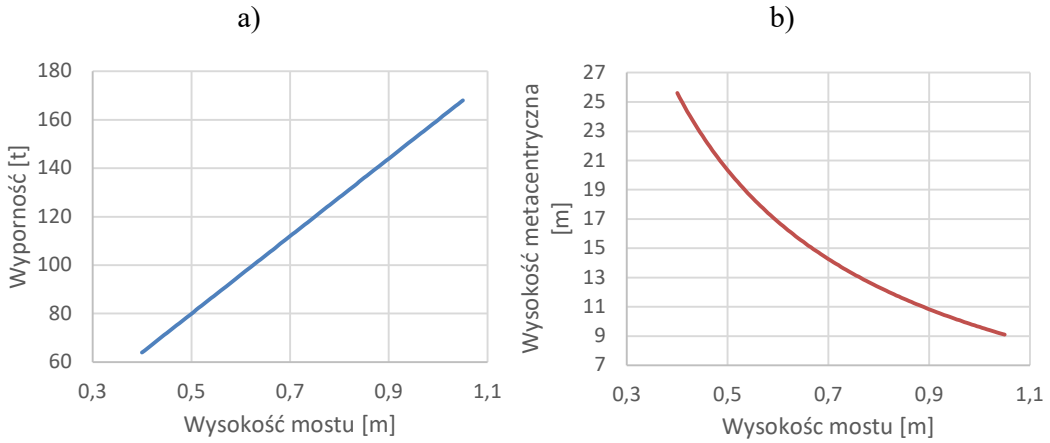
Zaostrzenie warunków bezpieczeństwa ma na celu ograniczenie ryzyka powstania mimośrodowego obciążenia, mogącego prowadzić do powstawania momentów wywracających, wywołanych przepływem wody wokół konstrukcji.

Wpływające na zapas stateczności wysokość i szerokość bloku pontonowego są ograniczone wymiarami przestrzeni ładunkowej środków transportu, co wynika bezpośrednio z wymagań mobilności systemu. We współczesnych rozwiązaniach, takich jak mosty z grupy PMP i IRB lub PFM, bloki pontonowe ułożone są na środkach transportu wzdłuż kierunku jazdy pojazdu. Zastosowanie mechanizmów rozładunkowych pozwala po rozłożeniu uzyskać szerokość mostu wielokrotnie większą niż szerokość pojedynczego bloku w konfiguracji transportowej (Rys. 2.4). Ponieważ pole przekroju bloku nie może przekroczyć pola przekroju przestrzeni ładunkowej, zwiększanie szerokości może odbywać się wyłącznie kosztem jego wysokości. Z tego względu wzrost jednego z wymiarów mostu (szerokości lub wysokości) wymusza zmniejszenie drugiego.



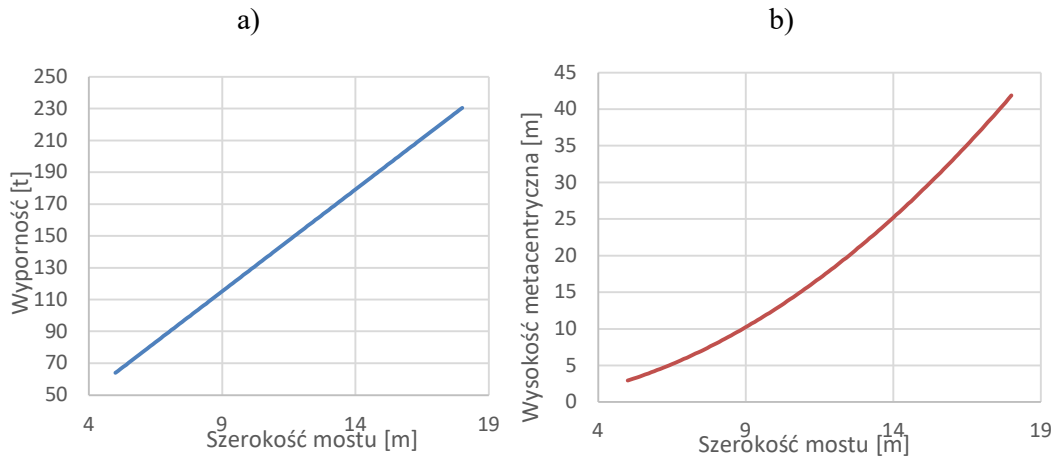
Rys. 2.4. Schematy składania bloków pontonowych na czas transportu (widok od czoła pontonu): a) mosty z grupy PMP i IRB, b) most PFM

Z punktu widzenia zjawisk hydrostatycznych, wysokość mostu wpływa przede wszystkim na jego wyporność oraz stateczność. Zwiększanie wysokości pontonów wpływa na wzrost zapasu pływalności (Rys. 2.5.a), z drugiej strony prowadzi do zmniejszenia wysokości metacentrycznej, która jest wskaźnikiem stateczności początkowej obiektu pływającego (Rys. 2.5.b). W związku z tym maksymalizacja sił wyporu poprzez zwiększanie wysokości pontonów może negatywnie wpłynąć na stateczność mostu.



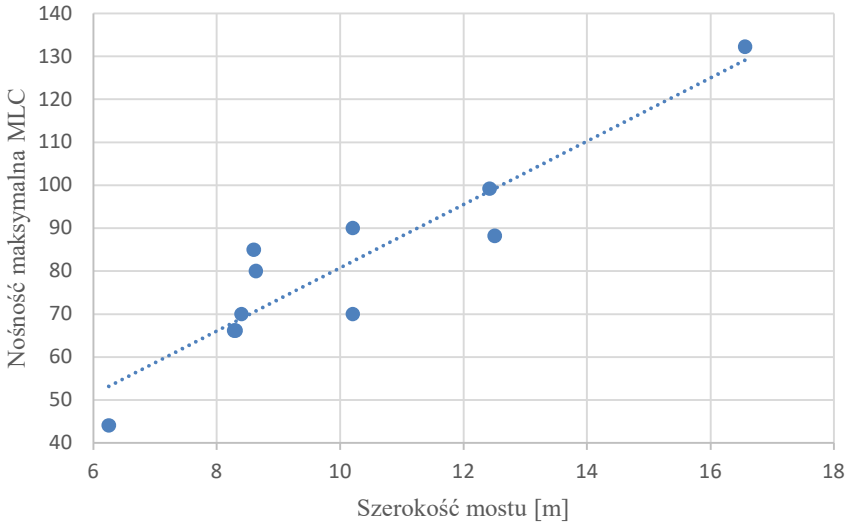
Rys. 2.5. Zmiany parametrów użytkowych mostu w funkcji jego wysokości wyznaczone dla mostu o szerokości 10 m, długości roboczej 20 m, zapasie wyporności 0,8 i środku ciężkości 0,2 m nad jezdnią mostu): a) zmiana wyporności, b) zmiana stateczności [opracowanie własne]

Zwiększanie szerokości bloków pontonowych prowadzi zarówno do wzrostu zapasu pływalności (Rys. 2.6.a) jak i poprawy stateczności mostu (Rys. 2.6.b). W związku z tym zwiększenie wyporu na skutek wzrostu szerokości mostu jest znacznie bardziej korzystne niż w przypadku wzrostu szerokości.



Rys. 2.6. Zmiany parametrów użytkowych mostu w funkcji jego szerokości wyznaczone dla mostu o długości roboczej 20 m, wysokości 0,8 m, zapasie wyporności 0,8 i środku ciężkości 0,2 m nad jezdnią mostu): a) zmiana wyporności, b) zmiana stateczności [opracowanie własne]

Pozytywny wpływ zwiększania szerokości mostu na jego nośność, widoczny jest również w na podstawie zastawienia tych parametrów dla mostów pontonowych analizowanych w rozdziale 1 (Rys. 2.7).



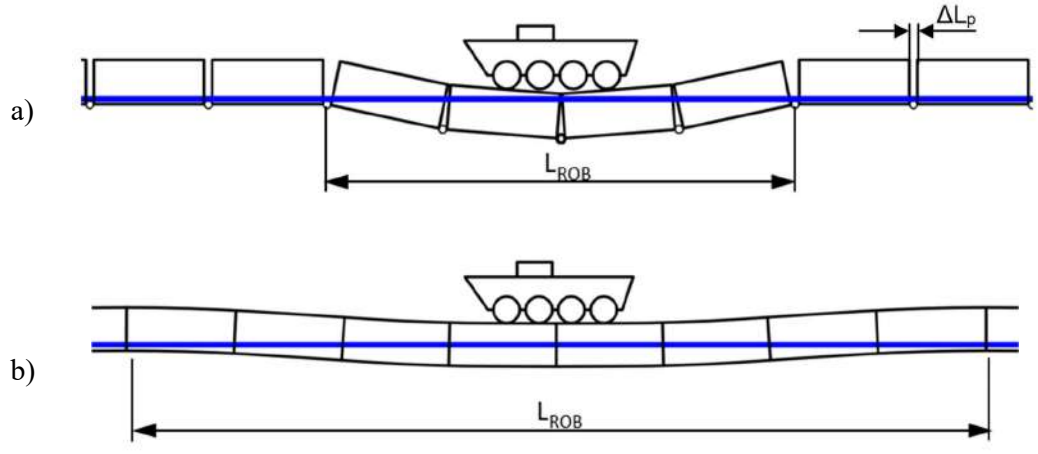
Rys. 2.7. Wpływ szerokości mostu na jego nośność dla analizowanych konstrukcji mostów pontonowych: PMP MLC66, PMP-M (wstęga 1,5) MLC 99, PMP-M (wstęga 2) MLC 132, PP-64 (wstęga 1) MLC 44, PP-64 (wstęga 2) MLC 88, RB/IFB MLC80, IRB MLC 80, SRB MLC 85, PFM MLC 70, PFM F2 MLC 90

Z uwagi ograniczenia transportowe nie można dowolnie kształtować struktury wytrzymałościowej i wyporności pontonów, a tym samym zwiększać nośności mostów. Niektórzy producenci rozwiązują ten problem umożliwiając budowę wstęgi poszerzonej w „konfiguracji 1,5" i „konfiguracji 2". To jednak zwiększa liczbę środków niezbędnych do budowy i utrzymania przeprawy. Wymiary przekroju poprzecznego mostu i ograniczenia dotyczące dopuszczalnej masy bloków pontonowych determinują postać struktury wytrzymałościowej mostu oraz dobór materiału zastosowanego do jego budowy. To z kolei bezpośrednio przekłada się na dopuszczalną wartość przynoszonego przez konstrukcję momentu gnącego oraz wartość odkształceń występujących podczas jej użytkowania.

Długość bloków pontonowych wpływa przede wszystkim na właściwości transportowe systemu. Zwiększenie długości bloków umożliwia ograniczenie liczby pontonów niezbędnych do budowy przeprawy, co przekłada się na zmniejszenie zapotrzebowania na sprzęt transportowy oraz liczbę personelu zaangażowanego w proces montażu. Przykładowo, wykonanie 100-metrowego odcinka mostu wymaga zastosowania 26 bloków PP-64 (w układzie wstęgi podwójnej) lub jedynie 9 bloków PFM. Ponieważ pontony są łączone w jednolitą wstęgę, ich długość nie ma istotnego wpływu na geometrię ani charakterystykę pracy mostu. Głównym czynnikiem ograniczającym długość bloków pontonowych jest ładowność pojazdów transportowych.

Parametrem istotnym z punktu widzenia wyporności jest długość robocza. Zależy ona od sztywności giętnej konstrukcji oraz luzu w połączeniach bloków pontonowych. Zwiększenie długości roboczej wpływa korzystnie na zapas pływalności, jednak prowadzi do wzrostu momentu gnącego. Konstrukcja połączeń bloków pontonowych w mostach typu wstęga ma postać przegubową lub sztywną (Rys. 2.8). Wszyscy producenci, poza jednym, wykorzystują do łączenia bloków pontonowych przeguby, znajdujące się w dolnym pasie konstrukcji. Wielkość obrotu w przegubach w kierunku, w którym górne pasy bloków pontonowych zbliżają się do siebie jest organiczna wartością początkowego luzu ΔL_P (Rys. 2.8a), pozwalając na swobodny obrót w ograniczonym zakresie. Po jego osiągnięciu możliwość dalszego obrotu w przegubie jest blokowana. Przemieszczenie kątowe bloków w przeciwnym kierunku, w warunkach rzeczywistej eksploatacji, nie przekracza 7-15 stopni i nie występuje ograniczenie ruchliwości przegubu w tym zakresie. Zwiększenie wielkości luzu skraca długość roboczą, przez co redukowane są momenty gnące w konstrukcji, jednocześnie pogłębiając zanurzenie mostu. O ile obniżenie poziomu obciążeń jest korzystne, to zwiększenie zanurzenia negatywnie wpływa na zapas pływalności oraz stateczność. Odpowiednie ukształtowanie długości roboczej stanowi więc istotne wyzwanie projektowe.

W mostach PFM oraz PFM F2 opracowanych przez CNIM zastosowano sztywne połączenia bloków pontonowych. W tym przypadku nie ma luzów, a ograniczenie długości roboczej wynika wyłącznie z podatności konstrukcji nośnej mostu (Rys. 2.8b).



Rys. 2.8. Schemat obciążonych mostów o różnych typach łączenia bloków pontonowych: a) łączenia przegubowe, b) połączenia sztywne

Długość robocza jest w tym przypadku determinowana wyłącznie przez sztywność giętną konstrukcji wynikającą z modułu Younga materiału konstrukcyjnego oraz momentu bezwładności przekroju konstrukcji nośnej. Mosty o sztywnych połączeniach wykonane są ze stopów aluminium, które charakteryzują się trzykrotnie mniejszą wartością modułu Younga w porównaniu ze stalą [17], [25]. Zastosowanie tego materiału ma więc istotny wpływ na kształtowanie długości roboczej mostów o sztywnej konstrukcji.

Materiały konstrukcyjne stosowane w obecnie eksploatowanych mostach pontonowych, w zależności od ich generacji, to przede wszystkim stale i stopy lekkie na bazie aluminium. Wprowadzony do użytku w 1962 roku most typu wstęga PMP i kolejne jego modernizacje (PMP–M, PPS-84, PP-91) a także polski most PP-64 wykonane są ze stali. Do konstrukcji amerykańsko-niemieckiego mostu IRB oraz najpóźniej skonstruowanych mostów PFM i PFM F2 zastosowano stopy aluminium. Zestawienie najczęściej stosowanych materiałów w konstrukcjach wojskowych mostów pontonowych przedstawiono w Tabela 2.1.

Tabela 2.1.Zestawienie wybranych materiałów stosowanych w wojskowych konstrukcjach mostowych [25]

Materiał	Oznaczenie	Granica sprężystości [N/mm²]	Wytrzymałość na rozciąganie [N/mm²]	Wydłużenie (%)	Spawalność
Aluminium	2219	250–360	370–440	3–6	Tak
	DGFVE 232B	349–368	408–424	11,3–13,2	Tak
	MVEE 1318B	315–425	385–465	6–8	Tak
	7005	262–305	324–345	7–10	Tak
	AlZn4.5Mg1F35	140–290	220–330	8	Tak
	AlZn4.5Mg2F41	335–350	375–410	13–18	Tak
	x7046	117–375	180–420	4–10	No
	7075	145–485	275–540	8	Tak
	7020	270	320	7–10	Tak
	7050	395–476	462–545	7–10	Tak
Stal	S355J2G3	315–355	480–630	20–22	Tak
	T-1 A514	630–700	730–800	17–18	Tak
	18% Maraging	1 400	1 460	4–15	Tak
	4340	482–1,480	760–1,800	10–22	Nie

Wprowadzenie stopów aluminium jako materiału konstrukcyjnego spowodowało zmniejszenie masy bloków pontonowych w stosunku do konstrukcji stalowych, co zaowocowało zwiększeniem podatności transportowej i zapasu ich pływalności [17], [26], [27], [28]. Most PMP o masie bloku 6910 kg cechował się nośnością 60 t (~MLC66). Wykonany ze stopu aluminium most RB o nośności MLC70, o zbliżonej do PPM geometrii kadłuba i nośności, charakteryzuje się masą 5 579 kg. Zatem

zastosowanie w konstrukcji mostu RB stopów lekkich spowodowało zmniejszenia jego masy o 24% przy jednoczesnym wzroście nośności o ok. 6%. W celu porównania masy jednostkowej mostów z uwzględnieniem ich nośności wprowadzono parametr masy jednostkowej odniesionej do nośności m_{jn}, opisaną zależnością (2.1):

$$m_{jn} = \frac{\frac{masa\ mostu}{długośc\ mostu}\left[\frac{kg}{m}\right]}{nośność\ [t]} \tag{2.1}$$

W przypadku konstrukcji mostów PPM i RB zastosowanie stopów lekkich pozwoliło na ograniczenie masy jednostkowej odniesionej do nośności o 38%. Żadna z poddanych analizie konstrukcji nie została wykonana w całości ze stopów lekkich. W związku ze znaczącymi obciążeniami przegubów łączących poszczególne bloki konstrukcyjne, we wszystkich rozpatrywanych przypadkach przeguby te wykonano z wysokowytrzymałych stali.

Syntetyczne ujęcie wpływu omówionych w niniejszym rozdziale cech technicznych na parametry użytkowe oraz wynikające z nich parametry taktyczne mostów pontonowych przedstawiono w formie tabelarycznej (Tabela 2.2), dokonując zarazem zestopniowania intensywności tego wpływu. Wpływ pozytywny oznaczono znakiem „+”, znaczący wpływ pozytywny (np. opisany funkcją kwadratową) oznaczono „++”, natomiast wpływ negatywny oznaczono znakiem „–”. W dwóch ostatnich kolumnach zaprezentowano sumaryczną ocenę wpływu parametrów technicznych na nośność i przepustowość oraz na mobilność.

Tabela 2.2.Zestawienie wpływu parametrów technicznych na parametry użytkowe oraz taktyczne mostów pontonowych

		Nośność/ Przepustowość				Mobilność				
		Zapas pływalności	Wytrzymałość	Stateczność	dopuszczalna odległość między pojazdami	Podatność	Wymagane siły i środki	Czas budowy	Sumaryczna ocena wpływu na nośność i przepustowość	Sumaryczna ocena wpływu
Zmiany parametrów technicznych	Zwiększanie wysokości	+	++	-		-			+2	-1
	Zwiększanie szerokości	+	+	++	+	-			+5	-1
	Zwiększanie długości bloku					-	+	+	0	+1
	Zwiększanie długości roboczej	+	-	+	-				0	0
	Zastosowanie stopów lekkich	+				+			+1	+1
	Zastosowanie zintegrowanego pędnika						+	+	0	+2

Przeprowadzona ocena jakościowa wykazała, że największy pozytywny wpływ na nośność i przepustowość mostu pontonowego ma zwiększenie szerokości bloków pontonowych (ocena +5). Mniejsze znaczenie ma: zwiększenie wysokości (ocena +2) oraz zastosowanie stopów lekkich (ocena +1). Pozostałe cechy konstrukcyjne nie wykazują w ocenie jakościowej zauważalnego wpływu lub wpływy te równoważą się.

W odniesieniu do mobilności pozytywny wpływ ma zastosowanie zintegrowanego pędnika (ocena +2). Ocenę +1 uzyskało zwiększanie długości bloku pontonowego oraz zastosowanie stopów lekkich. Negatywny wpływ ma zwiększanie wysokości i szerokości bloków pontonowych (ocena -1).

Opisane uwarunkowania determinują to, w jaki sposób cechy konstrukcyjne, takie jak: wymiary bloków, konstrukcja połączeń, zastosowane materiały, sztywność giętna struktury wpływają na cechy taktyczne i użytkowe.

2.2. Problemy badawcze dotyczące wojskowych środków przeprawowych

2.2.1. Zakres analizy

Pomimo występowania istotnych różnic konstrukcyjnych, wszystkie mosty pontonowe podlegają hydrodynamicznemu oddziaływaniu wody. W związku z tym analiza zawarta w niniejszym podrozdziale została przeprowadzona w oparciu o prace dotyczące wojskowych mostów pontonowych typu wstęga, jak i mostów o konstrukcji stałej. Na podstawie dostępnych publikacji poświęconych tej tematyce należy stwierdzić, że zdecydowana większość prezentowanych wyników dotyczy badań modelowych. Takie podejście umożliwia weryfikację kluczowych parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych bez konieczności wykonywania obiektów pełnoskalowych. Dzięki temu znacząco ogranicza się koszty, które w przypadku badań rzeczywistych konstrukcji byłyby bardzo duże ze względu na ich znaczące gabaryty, wysoki stopień zaawansowania technologicznego, a także konieczność przygotowania wielu wariantów badanych obiektów.

Prezentowane w publikacjach naukowych wyniki badań koncentrują się głównie na analizie charakterystyk przemieszczeń pionowych oraz wytężenia konstrukcji, wywołanych obciążeniami zewnętrznymi ujmującymi oddziaływania środowiskowe oraz różne warunki przejazdu pojazdów. Wyznaczenie tychże obciążeń możliwe jest przy wykorzystaniu modeli numerycznych, jednak uzyskanie wiarygodnych wyników obliczeń wymaga uwzględnienia wszystkich zjawisk istotnych z punktu widzenia obciążeń mostu. Należy zarazem podkreślić, że zastosowanie w mostach pontonowych podpór pływających powoduje, że rozpatrywane obciążenia konstrukcji są odmienne i bardziej złożone niż w przypadku standardowych rozwiązań mostowych.

Większość publikacji związanych z badaniami konstrukcji mostowych dotyczy konstrukcji stałych, rzadziej podejmowana jest problematyka tymczasowych mostów typu wstęga. Pomimo występowania różnic konstrukcyjnych, wszystkie mosty pływające podlegają tym samym zjawiskom wynikającym ze specyfiki podparcia. Analizę istniejących modeli tego typu konstrukcji przeprowadzono w kontekście:

- odwzorowania zjawisk występujących w środowisku pracy mostu, np. falowania wody i wiatru;
- określenia oddziaływań środowiska wodnego, np. wyporności, oporów tłumiących wody, masy wody towarzyszącej;
- przyjętych obciążeń mostu np. liczby i wielkości przeprawianych pojazdów.

2.2.2. Badania mostów stałych

Wyniki badań reakcji dynamicznych dla projektu cywilnego mostu pływającego na Fjordzie Bjørnafjord, z uwzględnieniem hydrodynamicznej interakcji pływających pontonów, przedstawione zostały w pracy [29]. Badania te przeprowadzono z wykorzystaniem modelu numerycznego, uwzględniającego połączone obciążenia konstrukcji wywołane wiatrem i falami środowiskowymi, lecz nieuwzględniającego obciążeń wywołanych przeprawianymi pojazdami. W pracy nie przedstawiono wartości ani sposobu wyznaczenia współczynników, na podstawie których wyznaczone zostały wartości obciążeń związanych z siłami tłumienia i masą wody towarzyszącej oraz naporem wiatru. Na podstawie wyników obliczeń stwierdzono istotny wpływ hydrodynamicznej interakcji pontonów na siły wewnętrzne w konstrukcji mostu (spowodowała ona wzrost momentów gnących o 89%, sił osiowych o 25% i tnących o 126%). Należy jednak mieć na uwadze, że zaproponowana w pracy metoda obliczeniowa nie została poddana walidacji. Zbliżonej tematyce poświęcono badania, których wyniki opisano w pracy [30]. W tym przypadku badano obciążenia mostu pontonowego wywołane falowaniem wody, z uwzględnieniem tłumienia lepkiego, wzajemnych oddziaływań hydrodynamicznych między pontonami oraz właściwości strukturalnych mostu, takich jak masa i sztywność konstrukcji. Przeprowadzenie w pracy [31] analizy w dziedzinie częstotliwości oraz modelu numerycznego opartego na metodzie elementów skończonych MES i metodzie układów wieloczłonowych MBS (ang. Multibody System). umożliwiło zbadanie dłuższych odcinków mostów pływających. Uwzględniono przy tym obciążenia generowane wskutek falowania, a szczególną uwagę poświęcono przestrzennej zmienności parametrów falowych. Stwierdzono, że często występujące w literaturze założenie jednorodnych warunków falowych odbiega od wyników pomiarów zarejestrowanych podczas pomiarów przeprowadzonych na obiekcie rzeczywistym, co skutkuje przeszacowaniem obliczonych momentów zginających oraz prowadzi do istotnego niedoszacowania siły osiowej. Zaproponowana metoda zadedykowana została również do bardzo dużych konstrukcji pływających poddanych działaniu niejednorodnego pola falowego. Obie analizy nie obejmowały jednak wpływu obciążeń wywołanych przeprawianymi pojazdami. Nie zaprezentowano także walidacji wykorzystanych modeli.

Inną metodykę badawczą przyjęli autorzy pracy [32]. Zrealizowali oni badania laboratoryjne z wykorzystaniem wykonanego w skali modelu mostu, w celu określenia

reakcji mostu na regularne fale środowiskowe, z uwzględnieniem interakcji między pontonami (Rys. 2.9).

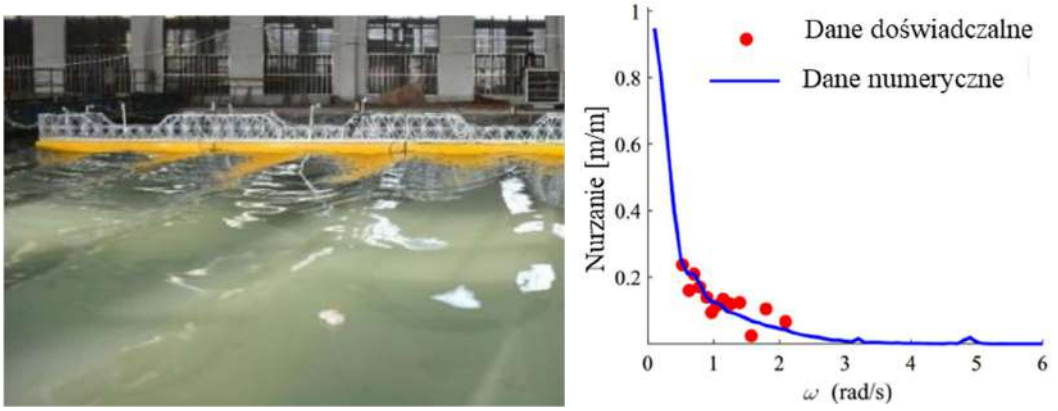


Rys. 2.9. Model doświadczalny mostu do badań reakcji konstrukcji na fale środowiskowe [32]

W czasie badań dokonano pomiarów przemieszczeń wybranych punktów konstrukcji, momentów zginających i sił kotwiczenia. W pracy nie uwzględniono natomiast wpływu ruchu pojazdu na odpowiedzi układu. Na podstawie uzyskanych wyników badań autorzy stwierdzili, że moment zginający obciążający most nie jest proporcjonalny liniowo do wysokości fal.

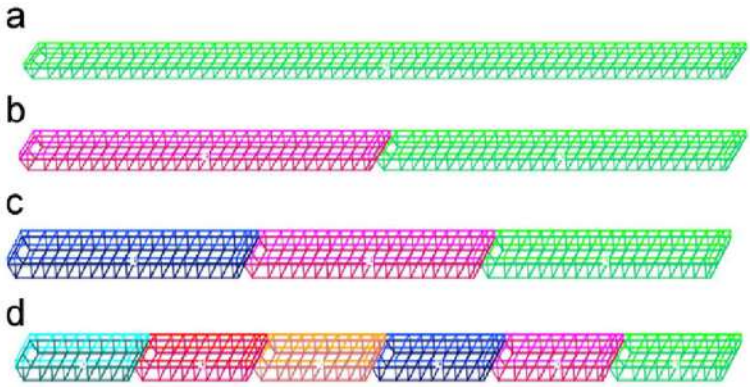
Miao i in. [33] przeprowadzili zarówno badania laboratoryjne, jak i obliczenia numeryczne rozpatrywanej konstrukcji mostu pływającego, dokonując wzajemnej walidacji metod na podstawie otrzymanych charakterystyk przemieszczeń (Rys. 2.10). Opracowany model numeryczny posłużył do wyznaczenia charakterystyk ruchu oraz sił obciążających konstrukcję dla różnych parametrów fal środowiskowych.

a) b)



Rys. 2.10. Walidacja modelu numerycznego: a) wykorzystany model doświadczalny, b) porównanie wartości operatora amplitudy odpowiedzi (RAO, ang. Response Amplitude Operator) dla badan numerycznych oraz laboratoryjnych [33]

Na podstawie wyników badań stwierdzono, że długość fali ma istotny wpływ na siły wewnętrzne w konstrukcji mostu pływającego. Autorzy wskazali, że zrealizowane badania dotyczyły mostu pływającego o jednej analizowanej długości i jednej sztywności połączeń, dlatego konieczne są dalsze analizy numeryczne w celu oceny wpływu sztywności na zachowanie długich mostów pontonowych. Porównanie zachowania różnych konstrukcji bloków pontonowych mostu, poddanych oddziaływaniu fal środowiskowych przedstawiono w [34]. Wykazano, że zastosowanie krótszych bloków pontonowych powoduje zwiększenie amplitudy nurzania, a także kołysania burtowego oraz postępowego. Porównanie wielu wariantów konstrukcyjnych było możliwe dzięki wykorzystaniu modelu numerycznego (Rys. 2.11). Nie podano informacji o walidacji wykorzystywanego modelu.



Rys. 2.11. Warianty konstrukcyjne porównywanych mostów pontonowych [34]

Odmienne podejście zaprezentowali autorzy pracy [35]. Wykorzystali oni dane pomiarowe z rzeczywistego mostu pontonowego (Rys. 2.12) do analizy wpływu fal środowiskowych na most. W pracy analizowano wpływ warunków atmosferycznych na falowanie powierzchni wody, a także na przyspieszenia i przemieszczenia wybranych węzłów mostu. Wykazano, że fale środowiskowe generują dominujące obciążenia mostu, a inne czynniki, w tym obciążenia od pojazdów, nie mają istotnego wpływu na zachowanie mostu.

a) b)



Rys. 2.12. Czujniki do badania rzeczywistego mostu pontonowego: a) akcelerometr, b) radar mierzący falowanie wody [35]

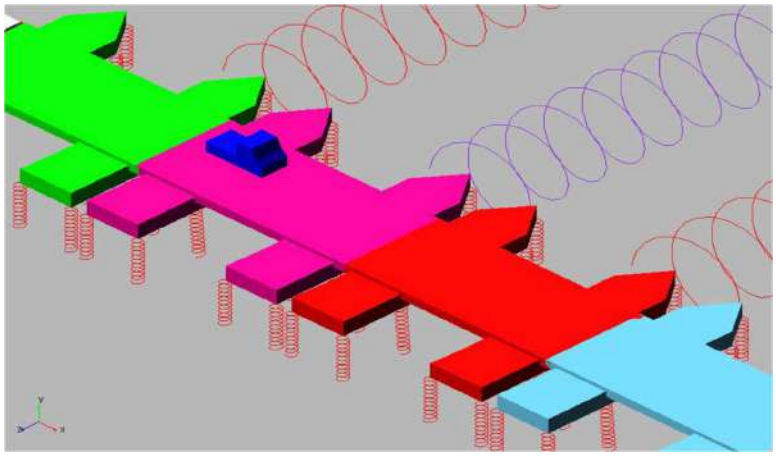
W pracy [36] rozwinięto analizy zaprezentowane w [35], opierając się na modelu symulacyjnym konstrukcji. W tym celu sformułowano model numeryczny, który poddano eksperymentalnej kalibracji z wykorzystaniem parametrów modalnych wyznaczonych na obiekcie pełnoskalowym, a następnie zaktualizowano przez dopasowanie częstości własnych i postaci drgań. Uzyskany model umożliwił wyznaczenie odpowiedzi dynamicznej mostu w postaci przemieszczeń i przyspieszeń w wybranych punktach konstrukcji. W ramach tych analiz nie uwzględniono oddziaływania ruchu pojazdów.

2.2.3. Badania mostów tymczasowych

W dostępnej literaturze napotkano niezbyt liczną grupę prac poświęconych wynikom badań mostów tymczasowych. W pracy [37] przedstawiono wyniki analizy wpływu obciążeń wywołanych poruszającymi się pojazdami na konstrukcje typu wstęga oraz na most o oddzielnych podporach. W pracy wykorzystano model analityczny, oparty na teorii belki. Brak jest jednak informacji o jego walidacji. Współczynniki hydrodynamiczne wprowadzone do modelu analitycznego zostały wyznaczone na podstawie badań numerycznych przeprowadzonych z wykorzystaniem metody elementów brzegowych BEM (ang. Boundary Element Method). Wykorzystany model nie odwzorowuje przegubowych łączeń bloków pontonowych. Sformułowanie równań możliwych do rozwiązania na drodze analitycznej wymagało przyjęcia uproszczenia konstrukcji mostu do belki ciągłej o skończonej sztywności giętnej. Pominięto także bezwładność pojazdów oraz zjawisko fali czołowej. Na podstawie badań autorzy

stwierdzili, że głębokość wody ma niewielki wpływ na przemieszczenia i częstotliwości hydrodynamiczne mostów.

W pracy [38] przedstawiono wyniki badań obciążeń dynamicznych mostu pływającego obciążonego przemieszczającymi się pojazdami, przeprowadzone z wykorzystaniem oprogramowania MSC Adams/View, opartego na metodzie MBS (Rys. 2.13). Badano wpływ uwzględnienia układu zawieszenia pojazdu na zachowanie mostu pontonowego. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że wprowadzenie czynnika uwzględniającego zawieszenie pojazdu skutkuje zmianami wyliczonych wartości sił kontaktu między pojazdem i mostem oraz sił tnących między blokami pontonowymi.

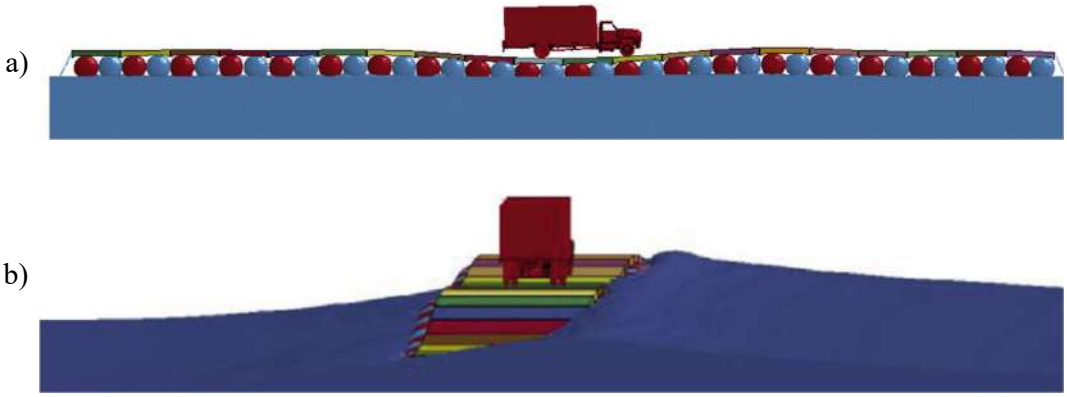


Rys. 2.13. Model numeryczny mostu pontonowego wykonany z wykorzystaniem metody wieloczłonowej [38]

Wykorzystany podczas obliczeń model umożliwia również uwzględnienie przegubowego łączenia bloków pontonowych. Odwzorowana konstrukcja nie uwzględnia ograniczeń przemieszczeń względnych w przegubach, przez co odbiega od rzeczywistych warunków pracy połączeń w mostach typu „wstęga". Nie uwzględniono również falowania wody, a także nie przedstawiono sposobu odwzorowania sił oporów generowanych w czasie nurzania mostu. Wartość masy wody towarzyszącej została wyznaczona na podstawie zależności zaczerpniętej z literatury, wyznaczonej z procedury obliczeniowej opracowanej dla statków i nie potwierdzono jej poprawności dla mostów pontonowych. Model nie został również zwalidowany.

Autorzy patentu [39] przedstawili wyniki badań systemu pływającego obciążonego przemieszczającymi się pojazdami i falowaniem wody. Podczas badań wykorzystano opracowane modele: analityczny, numeryczny oraz doświadczalny (Rys. 2.14). W modelu doświadczalnym badano wpływ obciążeń statycznych od pojazdu oraz

obciążeń dynamicznych od fal środowiskowych. Modelowany most zbudowany jest z segmentów połączonych przegubami o nieograniczonym kącie obrotu. W modelu analitycznym uproszczono obiekt do belki ciągłej, nie odwzorowano w związku z tym występowania przegubów występujących w obiekcie rzeczywistym. Model nie został zbadany pod kątem obciążeń dynamicznych pochodzących od ruchu pojazdu po moście.



Rys. 2.14. Badania numeryczne systemu pływającego: a) statyczne badania obciążeń konstrukcji pojazdem, b) dynamiczne badania obciążeń konstrukcji falą środowiskową [40]

Wyniki badań przeprowadzonych na modelu mostu pływającego w warunkach doświadczalnych posłużyły Autorom pracy [40] do walidacji modelu numerycznego. Autorzy porównali przebiegi jedynie pod kątem maksymalnego zanurzenia, bez analizy charakterystyk czasowych tego parametru. Zastosowany model, oparty na metodzie ALE (ang. Arbitrary Lagrangian–Eulerian), pozwolił na odwzorowanie zjawiska fali czołowej, jednak model nie został zwalidowany w tym zakresie. Autorzy na podstawie badań stwierdzili, że oddziaływanie fal środowiskowych ma istotny wpływ na przemieszczenia pionowe mostu.

W pracy [41] przedstawiono wyniki badań wpływu zmian konstrukcyjnych na przemieszczenia mostów pontonowych. Opracowane modele analityczne i numeryczne zostały poddane walidacji na podstawie wyników badań w warunkach statycznych obciążeń zewnętrznych opisanych w pracy [42]. Wyniki badań obejmują ocenę wpływu sztywności giętnej konstrukcji na wartości kątów obrotu i przemieszczeń pionowych konstrukcji mostu. Badania wykazały, że charakter deformacji mostu zależy od sztywności obrotowej. Przy niskiej sztywności ugięciu ulegają 2–3 przęsła, natomiast wraz ze wzrostem sztywności obrotowej obszar ugięcia obejmuje większą liczbę przęseł. Przeprowadzono wyłącznie analizę statyczną, bez uwzględnienia falowania wody ani poruszania się pojazdów. W analizach nie uwzględniono konstrukcji o przegubowym

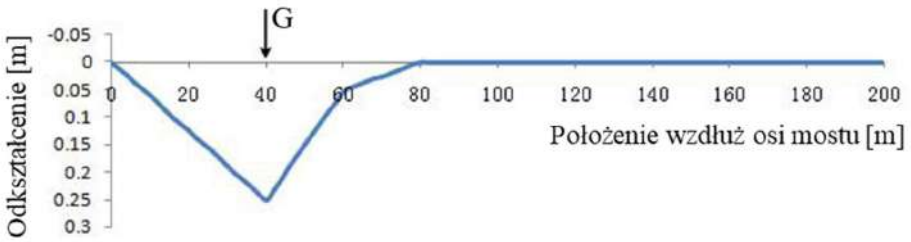
łączeniu pontonów, typowym dla mostów typu wstęga, a jedynie porównano struktury o różnej sztywności giętnej.

W pracy [43] Autorzy przedstawili wyniki badań konstrukcji pojedynczego bloku, umożliwiającego połączenie dwóch mostów pontonowych typu wstęga. Wykorzystany do badań model numeryczny bloku został dostrojony oraz poddany walidacji wyłącznie w zakresie obciążeń statycznych, na podstawie pomiarów przeprowadzonych na obiekcie rzeczywistym (Rys. 2.15).



Rys. 2.15. Obiekt rzeczywisty rozpatrywany w pracy [43] obciążony ładunkiem

W pracy [44] przedstawiono wyniki badań mostów pontonowych usadowionych na oddzielnych podporach pod kątem wpływu zmian rozmiaru pływaka oraz sztywności konstrukcji na lokalizację i wartości maksymalnych odkształceń konstrukcji. Wykorzystano w tym celu modele analityczny oraz numeryczny, które zostały poddane walidacji z wykorzystaniem danych pomiarowych zarejestrowanych na obiekcie rzeczywistym. Walidację ograniczono do porównania maksymalnych wartości przemieszczeń pojedynczego bloku pontonowego podczas przeprawy (Rys. 2.16). Parametry hydrodynamiczne wyznaczono z wykorzystaniem metody BEM. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że zmiany rozmiaru pływaka mają większy wpływ na wyznaczone wartości przemieszczeń niż zmiana sztywności konstrukcji.



Rys. 2.16. Przemieszczenia pionowe mostu wywołane obciążeniem od poruszającego się pojazdu [44]

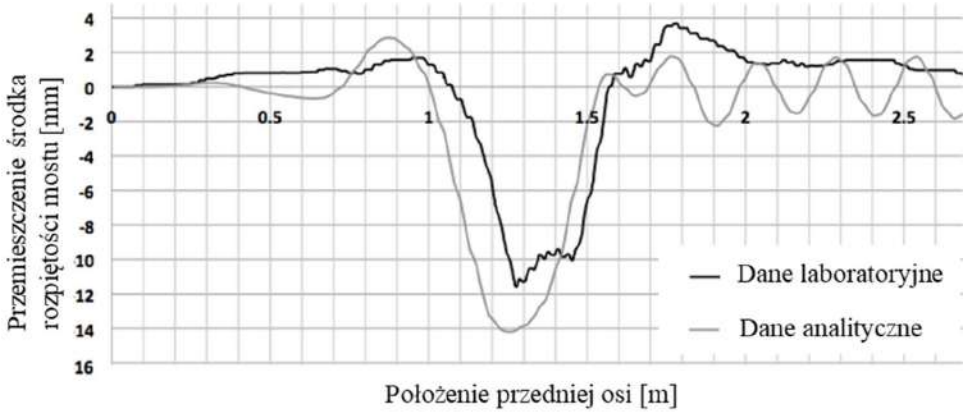
Pełnoskalowy blok pontonowy badali także autorzy pracy [45]. Celem badań było wyznaczenie przemieszczeń pionowych mostu pod wpływem obciążenia statycznego oraz pochodzącego od przemieszczającego się pojazdu. Autorzy wykorzystali charakterystyki nurzania swobodnego badanego bloku do wyznaczenia współczynników oporów tłumiących i sprężystości konstrukcji. Współczynniki te wykorzystano do sformułowania dynamicznego modelu numerycznego.

Do nielicznej grupy prac poświęconych badaniom numerycznym dotyczącym wyznaczenia przemieszczeń mostu pod wpływem obciążeń dynamicznych od poruszającego się pojazdu, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu zmiany długości bloków pontonowych na jego przemieszczenia, należy praca [46]. Należy podkreślić, że opracowany model numeryczny poddano walidacji podczas badań modelu wykonanego w skali 1:23 (Rys. 2.17) poprzez porównanie wyników obliczeń maksymalnych przemieszczeń bloków pontonowych z wynikami pomiarów doświadczalnych (Rys. 2.18). Różnica porównywanych wyników sięgała 24 %. Należy zauważyć, że w modelu numerycznym nie odwzorowano oddziaływania fali czołowej. Ponadto nie odwzorowano ograniczenia luzów w przegubach łączących bloki pontonowe. W pracy [47] przedstawiono rozbudowany model numeryczny, pozwalający na zbadanie wpływu przejazdu wielu pojazdów na dynamiczne zachowanie mostu.

a) b)



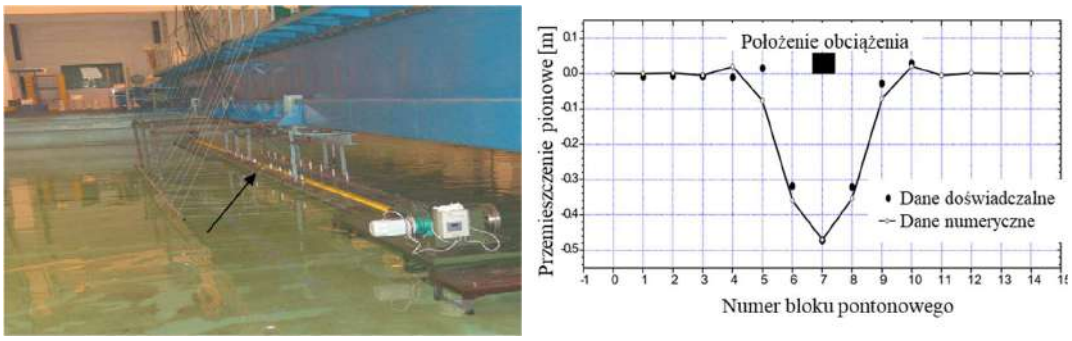
Rys. 2.17. Model doświadczalny do badań przemieszczeń mostu w czasie poruszania się pojazdu: a) model przeszkody wodnej i mostu, b) model pojazdu [46], [47]



Rys. 2.18. Przykładowy wykres porównujący przemieszczenia bloku mostu pontonowego w czasie przemieszczania się pojazdu o masie 1,5 kg z prędkością 0,205 m/s [47]

Walidacja modelu pod kątem obciążeń dynamicznych została również przedstawiona w pracach [42], [48]. Podczas badań wykorzystany zostały modele: doświadczalny, wykonany w skali 1:10 (Rys. 2.19a) i numeryczny uwzględniający siły wyporu, masę wody towarzyszącej oszacowaną na podstawie wzoru empirycznego dla płaskiej płyty oraz tłumienie o wartości wyznaczonej na podstawie modelu Rayleigha. Badano odpowiedzi mostu pływającego typu wstęga zbudowanego z nieliniowo połączonych modułów, obciążonego przemieszczającymi się pojazdami. Wyznaczone doświadczalnie przemieszczenia pionowe mostu pod wpływem poruszającego się pojazdu porównano z wynikami obliczeń numerycznych, dokonując dynamicznej walidacji wykorzystanego modelu numerycznego, w tym porównania przemieszczeń bloków pontonowych (Rys. 2.19b).

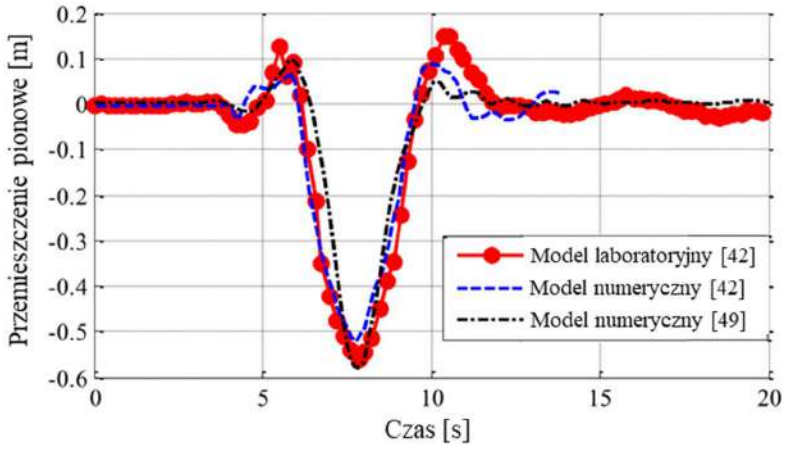
a) b)



Rys. 2.19. Walidacja modelu numerycznego mostu: a) widok modelu doświadczalnego wykorzystanego do wyznaczenia przemieszczeń, b) porównanie przemieszczeń bloków pontonowych w czasie przeprawiania pojazdu, wyznaczone na podstawie metod doświadczalnych oraz numerycznych [42]

Stwierdzono, że podczas badań doświadczalnych wartości zanurzeń poszczególnych bloków pontonowych różniły się między sobą, podczas gdy w badaniach numerycznych nie wystąpiła taka rozbieżność. Ponadto podczas badań modelu laboratoryjnego uzyskano większe wartości maksymalnego wynurzenia bloków pontonowych występującego za pojazdem. Według Autorów przyczyną stwierdzonej rozbieżności mogą być niedokładności wykonania modelu. Należy jednak zauważyć, że w badaniach numerycznych nie odwzorowano fali czołowej. Na podstawie wyników wykazano, że ukształtowanie połączeń między modułami ma istotny wpływ na zachowanie konstrukcji. Należy jednak podkreślić, że badano konstrukcję mostu, w której kąt wzajemnego obrotu bloków pontonowych jest obustronnie ograniczony przez łączniki. W rzeczywistych mostach pontonowych tego typu łączniki nie są wykorzystywane, a ograniczenie kąta obrotu jest jednostronne.

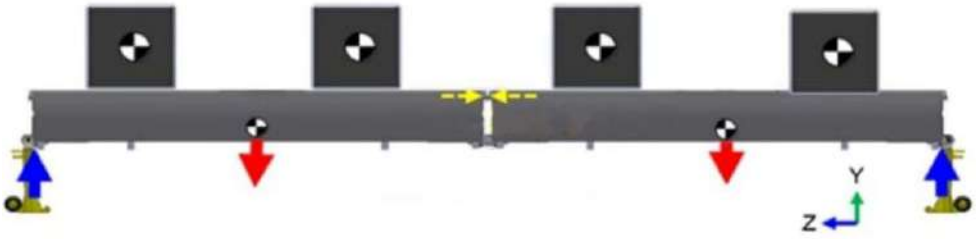
W pracy [49] przedstawiono wyniki badań wpływu prędkości i odległości między pojazdami, a także wysokości i kierunku fal środowiskowych oraz prędkości prądu na przemieszczenia pionowe mostu typu wstęga. Przeprowadzono walidację wykorzystując dane w postaci wyników badań doświadczalnych zamieszczonych w pracy [42] (Rys. 2.20). W zastosowanym modelu, nie uwzględniono wartości luzów, sztywności giętnej bloków pontonowych oraz fali czołowej, co mogło być przyczyną wskazanych przez autorów rozbieżności wyników uzyskanych metodami numerycznymi i doświadczalnymi. Na podstawie uzyskanych wyników wykazano między innymi, że fale środowiskowe o wysokości nie przekraczającej 0,5 m generują mniejsze przemieszczenia mostu niż przejeżdżające pojazdy.



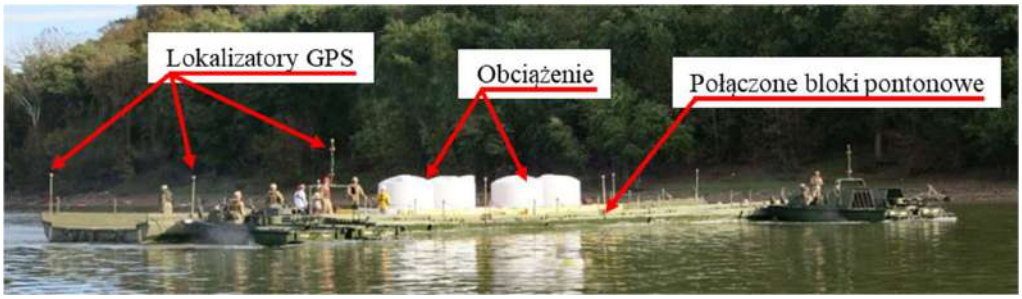
Rys. 2.20. Charakterystyki czasowe przemieszczeń pionowych w czasie przejazdu pojazdu z prędkością 9 m/s, uzyskane na podstawie badań numerycznych i doświadczalnych z pracy [42] oraz badań numerycznych z pracy [49]

W raportach [27], [28] zaprezentowano wyniki testów wytrzymałościowych odcinków mostu pontonowego obciążonych statycznie, umożliwiających identyfikację sztywności giętnej oraz wartości luzów w przegubach łączących bloki pływające mostu IRB. Testy przeprowadzono dla dwóch rodzajów podparcia: pierwsze z nich bazowało na podporach stałych, przymocowanych do uch skrajnych pontonów (Rys. 2.21a), a drugie na bazowało sile wyporu (Rys. 2.21 b), czyli odpowiadało zbliżonym do rzeczywistych warunków użytkowania.

a)



b)



Rys. 2.21. Badania statyczne rzeczywistego mostu pontonowego: a) schemat obciążania skrajnie podpartych bloków pontonowych, b) badania odcinka mostu na przeszkodzie wodnej [27]

W pracy przedstawiono opracowanie i walidację modelu MES mostu pontonowego IRB obciążonego oddziaływaniem nurtu wody i pojazdów. Wykazano, że elementem decydującym o nośności są stalowe sworznie łączące przęsła, natomiast sama konstrukcja aluminiowa zachowuje bezpieczny poziom naprężeń w analizowanych warunkach.

2.3. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza problematyki badawczo-konstrukcyjnej mostów pontonowych wykazała, że ich właściwości użytkowe wynikają ze złożonych, wzajemnie powiązanych oddziaływań pomiędzy parametrami konstrukcyjnymi, warunkami środowiska wodnego oraz ograniczeniami taktycznymi. Kluczowymi parametrami użytkowymi są nośność i przepustowość mostów. Wynikają one z ukształtowania konstrukcji mostu oraz konieczności zachowania odpowiednich zapasów pływalności i stateczności poprzecznej. Zwiększanie nośności mostów pontonowych jest możliwe kosztem obniżenia przepustowości, poprzez wprowadzanie zaostrzonych warunków bezpieczeństwa ruchu pojazdów. Wskazuje to na wzajemne relacje między tymi parametrami i brak możliwości niezależnego ich kształtowania. Przeprowadzona analiza wpływu cech konstrukcyjnych, takich jak szerokość, wysokość, długość robocza, rodzaj połączeń bloków pontonowych oraz zastosowane materiały, na parametry użytkowe wykazała istnienie zarówno powiązań korzystnych, jak i niekorzystnych, często występujących jednocześnie.

W zależności od szeregu uwarunkowań, kształtowanie konstrukcji mostów pontonowych wymaga uwzględnienia wzajemnie powiązanych czynników, których sumaryczne ujęcie w sposób analityczny przysparza wiele problemów. Istnieje zatem potrzeba stosowania skutecznych metod badawczych, w tym wiarygodnych modeli symulacyjnych, umożliwiających ilościową ocenę wpływu zmian cech konstrukcyjnych na obciążenia, stateczność oraz bezpieczeństwo pracy mostów pontonowych w zróżnicowanych warunkach ich eksploatacji.

Występujące w literaturze opisy badań dotyczących mostów pontonowych koncentrują się głównie na wyznaczeniu pionowych przemieszczeń bloków pontonowych oraz wartości sił wewnętrznych i momentów zginających w wybranych przekrojach konstrukcyjnych. Badania te obejmują przede wszystkim ocenę wpływu oddziaływań hydrodynamicznych wywołanych czynnikami zewnętrznymi, takimi jak: fale środowiskowe, prądy wodne czy wiatr, które istotnie determinują warunki pracy konstrukcji. Część analizowanych prac dotyczy zmian charakteru odpowiedzi konstrukcji mostowej, wywołanych modyfikacją jej sztywności giętnej oraz zmianą długości bloków

pontonowych. Uzyskane w tym zakresie wyniki pozwalają oceniać wrażliwość tego typu mostów zarówno na warunki środowiskowe, jak i na modyfikacje rozwiązań konstrukcyjnych, jednak wskazują również na ograniczony zakres badań obejmujących inne aspekty związane z użytkowaniem tych obiektów.

Ważnym aspektem analizowanych prac jest walidacja wykorzystywanych modeli. W większości rozpatrzonych publikacji [38], [39], [41], [43], [44], [48], [49] nie dokonano, bądź nie przedstawiono wyników walidacji modeli obliczeniowych w warunkach dynamicznych, co ogranicza możliwość wykorzystywania ich wyników w obszarach, gdzie zależy nam na poprawnym i wiarygodnym odwzorowaniu rzeczywistych warunków użytkowania. Ten aspekt jest niezwykle istotny podczas wypracowywania założeń projektowych i metodyk badań trwałościowych. Zaledwie w czterech publikacjach [42], [46], [47], [49] przedstawiono wyniki walidacji dynamicznej, bazującej na pomiarach zanurzenia mostu podczas przejazdu pojazdów. Należy jednak podkreślić, że w pracach tych odnotowano istotne różnice pomiędzy wynikami eksperymentalnymi i wynikami obliczeń numerycznych.

W szeregu prac pomijana jest też problematyka oddziaływania mostów na przeszkodę wodną, związana z generowaną przez nie tzw. falą czołową, zaburzającą lokalnie poziom lustra wody. Może to wpływać na wielkość lokalnego zanurzenia pontonów, a poprzez to na wartości i rozkład siły wyporu. Nieuwzględnienie tego zjawiska może stanowić jedną z przyczyn różnic pomiędzy wynikami symulacji i wynikami badań eksperymentalnych, zaobserwowanych w pracach [42], [46], [47], [49]. Problematyka fali czołowej nie została dotychczas w sposób kompleksowy i ilościowy opisana. Uzasadnia to potrzebę podjęcia tego obszaru badań eksperymentalnych, ukierunkowanych na identyfikację jej charakterystyk i wpływu na rzeczywiste zanurzenie pontonów. Wyniki takich badań powinny umożliwić ocenę zasadności uwzględnienia tego zjawiska w przyszłych modelach analitycznych i numerycznych mostów pontonowych typu wstęga.

Analizując modele opisywane w literaturze warto zwrócić uwagę, że w niektórych opracowaniach wprowadzane są istotne uproszczenia w zakresie kinematycznego odwzorowania więzów pomiędzy blokami pontonowymi. W miejscu połączeń przegubowych o jednostronnie ograniczonym obrocie stosowane są połączenia bez ograniczonego obrotu lub o obustronnych ograniczeniach. Podczas badań prowadzonych z wykorzystaniem modeli analitycznych zachodzi konieczność odwzorowania nieliniowego połączenia przegubowego za pomocą podatności sprężystej, co również

stanowi uproszczenie zagadnienia prowadzące do rozbieżności uzyskanych tą drogą wyników w odniesieniu do wyników badań doświadczalnych.

Wyniki przeprowadzonej analizy literaturowej pozwalają na stwierdzenie, że w zakresie prowadzonych dotychczas badań dotyczących mostów pontonowych typu wstęga występują istotne, wymagające podjęcia tematy badawcze związane między innymi z określaniem wpływu sposobu łączenia pontonów na charakter i wartość przenoszonych przez nie obciążeń. Aspekt ten ma wpływ na wierność odwzorowania rzeczywistej elastyczności takich konstrukcji, co w połączeniu z podatnością podpory jaką jest woda, może istotnie zaburzać wzajemne interakcje, a tym samym wartości występujących sił i reakcji. Pomijane najczęściej jest również zagadnienie wpływu na konstrukcję fali generowanej przez sam most, czyli fali czołowej, która zaburza lokalne wartości jego zanurzenia, co również może również mieć wpływ na wartość identyfikowanych obciążeń. Czynniki te mogą być odpowiedzialne za wykazywane w analizowanych pracach, niekiedy ponad dwudziestoprocentowe różnice pomiędzy wynikami badań doświadczalnych i symulacji numerycznych. W literaturze brakuje również opisów wyników badań umożliwiających określenie, w jaki sposób zastosowanie sztywnego łączenia bloków pontonowych, charakterystycznego dla konstrukcji mostów pontonowych PFM, wpływa na obciążenia występujące w konstrukcji mostu w porównaniu ze stosowanymi między innym w mostach PMP, IRB oraz PP-64 połączeniami przegubowymi.

3. Cel i zakres pracy

Dokonana analiza obszaru badawczego wykazała, że jednoznaczne określenie wpływu cech konstrukcyjnych na właściwości użytkowe mostów pontonowych jest problemem złożonym i wskazuje na potrzebę wykorzystania do badań mostów pontonowych zaawansowanych metod badawczych, zarówno teoretycznych, jak i doświadczalnych. Jednocześnie należy podkreślić, że prowadzone dotychczas w tym zakresie badania zawierają duże uproszczenia dotyczące między innymi istotnych zjawisk towarzyszących pracy mostów pontonowych w warunkach rzeczywistych. Zidentyfikowana została luka badawcza w obszarze oceny wpływu sposobu łączenia bloków pontonowych na obciążenia występujące w konstrukcji mostu, co wskazuje na zasadność podjęcia szerokiego zakresu badań modelowych, których celem będzie uzupełnienie istniejącego stanu wiedzy w tym zakresie. Na tej podstawie sformułowano następujące cele niniejszej pracy:

Cel naukowy: Zbadanie wpływu sposobu łączenia bloków pływających na obciążenia konstrukcji mostu pontonowego typu wstęga.

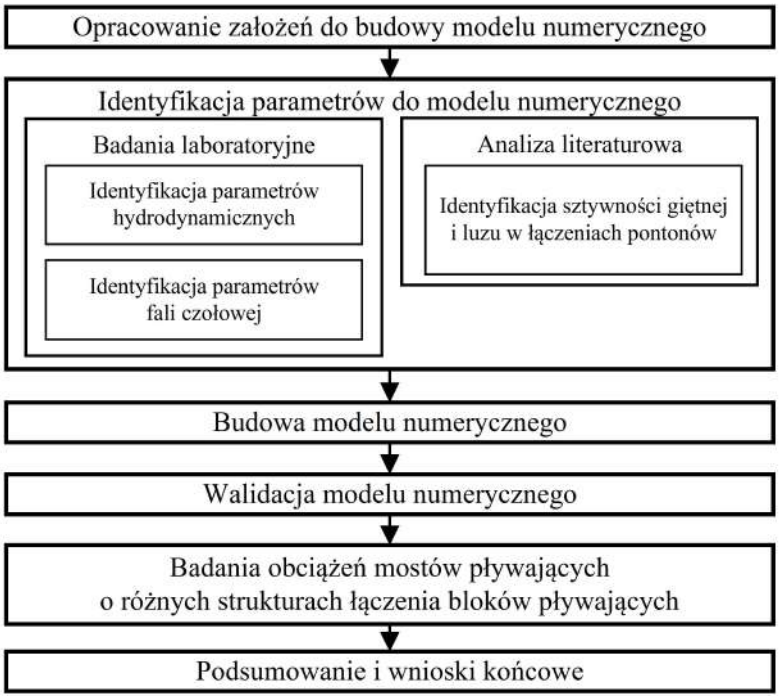
Cel utylitarny: Określenie wytycznych projektowych uwzględniających sposób łączenia bloków mostów pontonowych nowej generacji.

Tak sformułowane cele zostaną osiągnięte poprzez realizację następującego zakresu pracy:

1) Dokonanie analizy literaturowej stanu wiedzy w obszarze konstrukcji mostów pontonowych oraz badań tego typu konstrukcji.
2) Opracowanie metodyk badawczych oraz wytycznych do budowy stanowiska doświadczalnego i modelu symulacyjnego badanego mostu pontonowego.
3) Identyfikację parametrów mechanicznych badanego mostu.
4) Przeprowadzenie badań identyfikacyjnych nurzania odcinka konstrukcji badanego mostu.
5) Przeprowadzenie badań identyfikacyjnych przeprawiania pojazdu po moście pontonowym.
6) Opracowanie i walidację modelu numerycznego mostu.
7) Analizę numeryczną wpływu sztywnego i przegubowego sposobów łączenia bloków pontonowych na obciążenia konstrukcji.
8) Opracowanie wyników badań i sformułowanie wniosków.

4. Plan i metodyka badań

Kolejne etapy realizacji pracy, ściśle powiązane z jej zakresem, ujęto w formie graficznej jako plan badań, ukazujący następstwo kolejnych etapów prowadzonych działań (Rys. 4.1).



Rys. 4.1. Schemat blokowy planu badań

Osiągnięcie założonych celów pracy zostanie zweryfikowane na podstawie uzyskanych wyników badań prowadzonych z wykorzystaniem autorskiego modelu numerycznego mostu i walidacji tego modelu z wykorzystaniem opracowanego i zbudowanego stanowiska laboratoryjnego. Z analizy literatury wynika, że wybór tej metody badań jest właściwy dla podjętej problematyki i zakresu badań.

W pierwszym etapie realizacji pracy opracowane zostaną założenia do budowy modelu numerycznego. Powinien on umożliwiać odwzorowanie zarówno oddziaływań hydrostatycznych i hydrodynamicznych środowiska wodnego, jak i dynamicznych interakcji zachodzących pomiędzy blokami pontonowymi oraz pomiędzy konstrukcją mostu a pojazdem. Do analiz wstępnie przyjęto konstrukcję odpowiadającą powszechnie stosowanym systemom przeprawowym – mostowi pontonowemu typu IRB. Rozwiązanie to jest zbliżone do systemów z rodziny Pontonowego Parku Przeprawowego PMP, co pozwala traktować przyjęty model jako reprezentatywny przykład tego rodzaju konstrukcji. W celu zbadania różnych typów łączenia bloków pontonowych wytypowane zostaną różne warianty konstrukcyjne mostu.

W drugim etapie zostanie przeprowadzona identyfikacja parametrów umożliwiających odwzorowanie zjawisk fizycznych oraz charakterystyk rzeczywistego obiektu w modelu numerycznym. Wiarygodność obliczeń wymaga poprawnego zamodelowania oddziaływań środowiskowych towarzyszących konstrukcji. W ramach tego etapu zostaną określone czynniki i procesy kluczowe dla zachowania mostu pontonowego. Otrzymane wyniki pomiarów posłużą również do wyznaczenia charakterystyk niezbędnych do późniejszej walidacji modelu. Dodatkowo, na podstawie dostępnych wyników badań wytrzymałościowych mostu IRB [27], [28], określone zostaną parametry mechaniczne konstrukcji, takie jak luz w przegubach pontonów oraz jej sztywność giętna. Uwzględnienie tych danych w modelu powinno zapewnić odwzorowanie właściwości strukturalnych rzeczywistego obiektu.

W trzecim etapie zidentyfikowane parametry i oddziaływania zewnętrzna zostaną zaimplementowane do modelu numerycznego. Wyznaczone zostaną między innymi: charakterystyka oporów, współczynnik masy towarzyszącej oraz model fali czołowej, umożliwiające wiarygodne określenie sił reakcji środowiska wodnego charakterystycznych dla obiektu rzeczywistego.

Kolejny etap badań obejmie walidację modelu poprzez porównanie przemieszczeń uzyskanych podczas badań doświadczalnych i symulacji numerycznych. Wynik walidacji modelu obliczeniowego będzie podstawą do oceny odwzorowania środowiska wodnego w przyjętej metodzie obliczeniowej.

Ostatni etap realizacji pracy obejmie badania symulacyjne, których celem będzie określenie wpływu sposobu łączenia pontonów na obciążenia konstrukcji. Analizy zostaną przeprowadzone dla różnych warunków przeprawiania, uwzględniających zmienne masę oraz prędkość pojazdów.

Metodyka badań realizowanych w ramach przedstawionego na Rys. 4.1 planu, obejmowała szereg działań związanych z wykorzystaniem modeli numerycznych i doświadczalnych mostów wzorowanych na rozwiązaniu konstrukcyjnym mostu IRB.

Badania doświadczalne realizowano na modelu mostu typu wstęga, wykonanym w skali 1:25. W trakcie badań pominięto oddziaływanie nurtu wody oraz przyjęto poruszanie się pojazdów w osi pasa ruchu. Stanowisko badawcze przygotowano w taki sposób, aby dno i brzegi modelowanej przeszkody wodnej nie wpływały na proces falowania wody. Wartości prędkości i czasu przeliczano z zachowaniem kryterium podobieństwa wyrażonego liczbą Froude'a.

Laboratoryjne badania identyfikacyjne siły oporów tłumiących oraz masy wody towarzyszącej przeprowadzono z wykorzystaniem modelu usztywnionego odcinka mostu pontonowego. W trakcie tych badań dokonywano pomiarów przemieszczeń pionowych mostu podczas jego swobodnych nurzań, wywołanych wymuszeniem kinematycznym. Badania identyfikacyjne zjawiska fali czołowej przeprowadzono z wykorzystaniem modelu całego mostu, a podczas tych badań rejestrowano: przemieszczenia pionowe bloków pontonowych, położenie pojazdu względem mostu oraz pionowe przemieszczenia lustra wody wynikające z falowania jego powierzchni.

Podczas badań numerycznych wykorzystano model opracowany w środowisku MSC Adams/View 2023.3, a obliczenia przeprowadzono stosując analizę dynamiczną. W stanie początkowym modele bloków pontonowych zdefiniowano w taki sposób, aby dno każdego z nich znajdowało się na wysokości początku globalnego układu odniesienia. Wartości sił reakcji środowiska wodnego wyznaczano w funkcji ujmującej: przemieszczenie, prędkość oraz przyspieszenie pionowe bloku pontonowych. Walidację rozpatrywanego modelu numerycznego przeprowadzono z wykorzystaniem wyznaczonych eksperymentalnie przebiegów zmienności przemieszczeń pionowych bloków pontonowych. Dane w postaci wyników badań numerycznych i doświadczalnych eksportowano do środowiska Python, w którym poddawano je dalszej obróbce służącej porównaniu uzyskanych wyników i wyznaczeniu wskaźników opisujących stopień ich podobieństwa. W procesie tym korzystano z bibliotek Pandas, NumPy oraz Matplotlib.

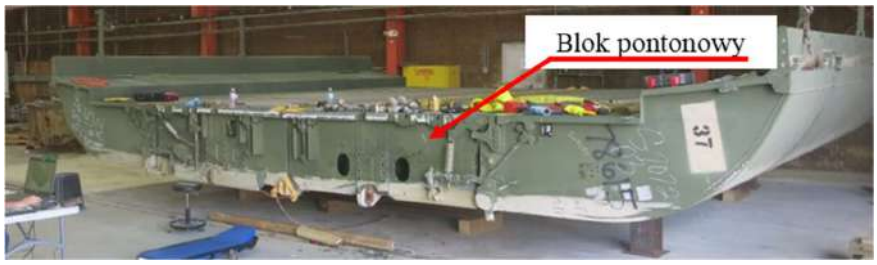
Weryfikacji osiągnięcia założonych celów pracy dokonano na podstawie wyników badań modelu numerycznego, uwzględniającego parametry wyznaczone na podstawie uzyskanych wyników badań doświadczalnych. W badaniach tych wyznaczano wartości momentów gnących obciążających most pontonowy oraz przemieszczeń pionowych bloków pontonowych. Parametry te przyjęto jako najbardziej istotne czynniki podczas oceny rozpatrywanych trzech wariantów konstrukcji mostów, różniących się sposobem łączenia i sztywnością struktury nośnej. Wyniki przeprowadzonej analizy umożliwiły sformułowanie wniosków w zakresie oceny wpływu struktury łączenia bloków pontonowych na wartości obciążeń mostu.

5. Założenia do opracowanie ogólnej postaci modelu symulacyjnego

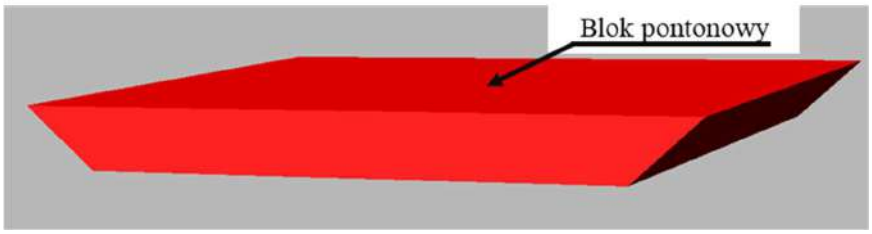
5.1. Model mostu

Przed przystąpieniem do opracowywania modelu mostu założono, że model ten powinien odwzorowywać interakcję z mostem poruszających się pojazdów i oddziaływanie na niego środowiska wodnego. W pierwszym etapie prac zamodelowano pojedynczy blok pontonowy z zachowaniem geometrii poszycia i właściwości masowych obiektu rzeczywistego. Szerokość, długość i wysokość, a także masa własna bloku zostały przyjęte do modelu wirtualnego zgodnie z wartościami rzeczywistymi uzyskanymi z dokumentacji technicznej [14]. Geometrię obiektu (Rys. 5.1a) uproszczono do postaci graniastosłupa o podstawie trapezu (Rys. 5.1b).

a)



b)



Rys. 5.1. Odwzorowanie geometrii bloku pontonowego: a) obiekt rzeczywisty [27], b) wizualizacja geometrii bloku pontonowego w środowisku MSC Adams/View

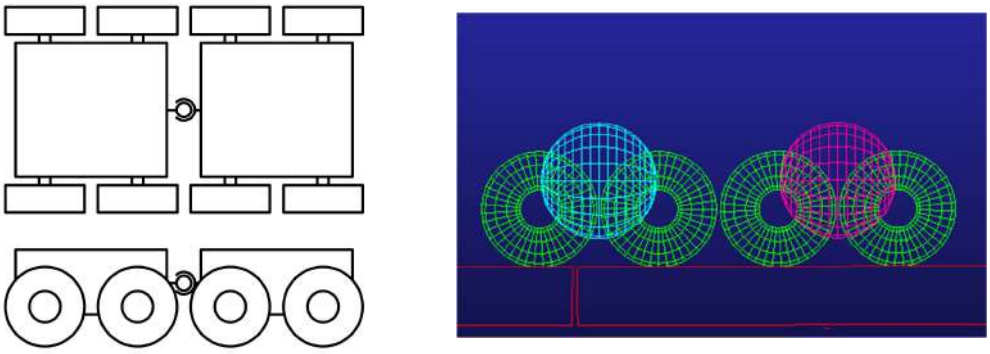
Zastosowanie uproszczonej geometrii nie wpłynęło na wiarygodność wyników, ponieważ wartości sił oddziaływania środowiska wodnego zostały zdefiniowane niezależnie od przyjętego kształtu bryły. Masowe momenty bezwładności wyznaczono na podstawie przestrzennego modelu CAD.

5.2. Modelowanie pojazdu

Przyjęto, że badania numeryczne zostaną przeprowadzone z wykorzystaniem dwóch pojazdów testowych, których masy odpowiadają klasom nośności określonym w normie STANAG 2021 [24] — MLC 60 oraz MLC 30. Klasa MLC 60 dotyczy ciężkich pojazdów gąsienicowych, w tym czołgów podstawowych o masie 54-60 ton, natomiast klasa MLC 30 odnosi się do lżejszych pojazdów, o masie 27-30 ton

Przyjęto, że modele obu pojazdów będą składały się z dwóch jednakowych członów, połączonych ze sobą przegubowo (Rys. 5.2). Człony te mają po dwie osie jezdne, rozmieszczone symetrycznie względem ich środka ciężkości.

a) b)



Rys. 5.2. Model pojazdu: a) schemat poglądowy – widoki z góry i z boku; b) wizualizacja modelu w środowisku wirtualnym w widoku bocznym

W każdym z rozpatrywanych przypadków założono, że rozstaw skrajnych osi jezdnych modeli wynosi 4,25 m, a masy odpowiednio: 54 375 kg dla modelu MLC60 oraz 27 187 kg dla modelu MLC 30. Oddziaływanie pojazdu na konstrukcję mostu uwzględniono poprzez wprowadzenie więzów kontaktowych na styku kół z blokami pontonowymi. Parametry sprężystości i tłumienia przedstawiono w Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Parametry więzu kontaktowego łączącego bloki pontonowe i koła pojazdu

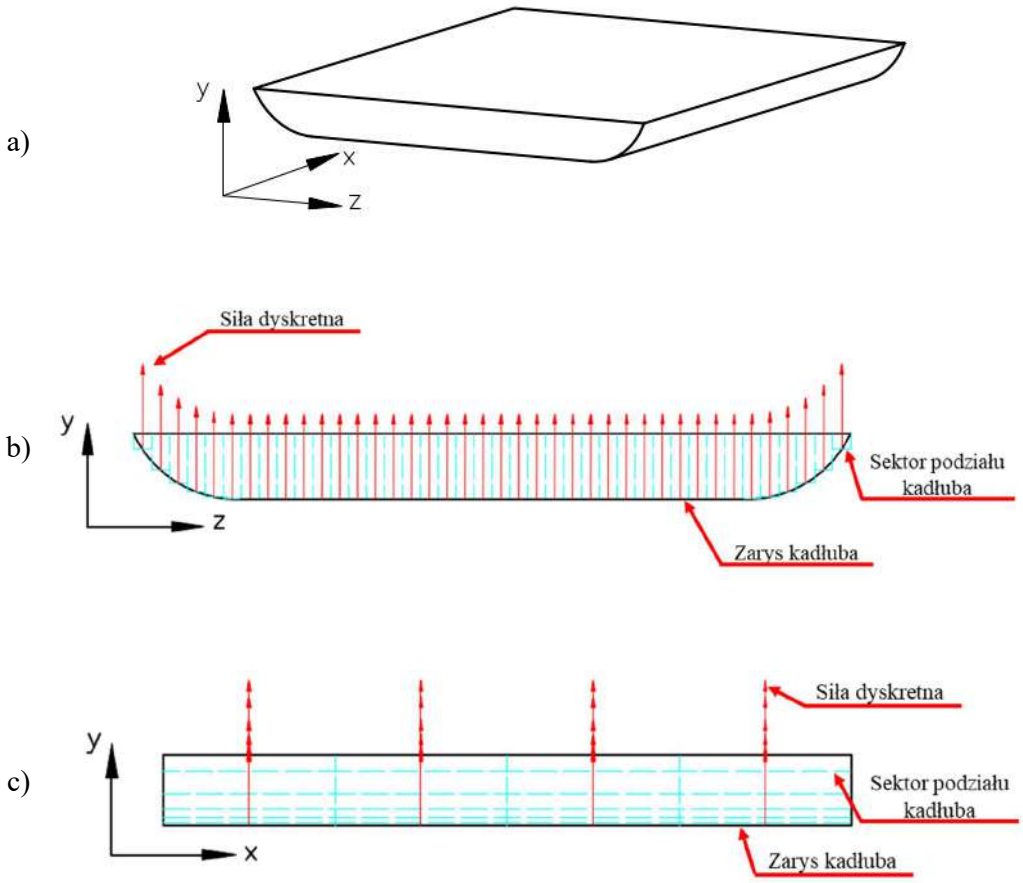
Parametr	Wartość
Stiffness	1.31E+06
Force Exponent	2,2
Dumping	3.125E+04
Penetration Depth	2,5
Static Coefficient	0,3
Dynamic Coefficient	0,1
Stiction Transition Vel.	500
Friction Transition Vel.	5000

Dobór parametrów kontaktu przeprowadzono na podstawie analizy wartości penetracji, przebiegów siły kontaktowej oraz tłumienia oscylacji pojawiających się po nawiązaniu kontaktu. Parametry te wyznaczono w taki sposób, aby zapewnić fizycznie poprawne odwzorowanie zjawiska kontaktu przy jednoczesnym zachowaniu stabilności numerycznej modelu.

5.3. Modelowanie oddziaływań środowiska wodnego

Wykorzystywane podczas obliczeń środowisko oprogramowania MSC Adams/View nie umożliwia zastosowania gotowych narzędzi przeznaczonych do symulowania środowiska wodnego. W związku z tym, podczas badań własnych wprowadzono

uproszczenie pozwalające na odwzorowanie oddziaływań hydrostatycznych i hydrodynamicznych na rozpatrywany model poprzez wprowadzenie sił dyskretnych o określonych skoncentrowanych wartościach reprezentujących oddziaływanie ciągłe, działających na wydzielone segmenty konstrukcji. W tym celu dokonano podziału modelu numerycznego bloku pontonowego (Rys. 5.3a) na 160 sektorów (Rys. 5.3b, c). W geometrycznym środku podstawy każdego sektora przyłożone zostały siły dyskretne odwzorowujące ciągłe oddziaływanie wody (Rys. 5.3b, c).



Rys. 5.3. Podział modelu numerycznego kadłuba bloku pontonwego na segmenty: a) widok ogólny kadłuba, b) wizualizacja poziału kadłuba oraz przyłożenia sił dyskretnych w płaszczyźnie yz; c) wizualizacja podziału kadłuba oraz przyłożenia sił dyskretnych w płaszczyźnie yx

Siła odziaływania środowiskowego F_{ij} na poszczególne sektory (gdzie: i – numer segmentu w płaszczyźnie zx, j – numer segmentu w płaszczyźnie zy) działająca na dany sektor ij, wyznaczono jako sumę trzech składowych: siły wyporu, sił oporów tłumiących oraz siły wynikającej z bezwładności masy wody towarzyszącej:

$$F_{ij} = F_{\mathrm{B},ij}(y_{\mathrm{p-w},ij}) + F_{D,ij}(\dot{y}_{\mathrm{p-w},ij}) + F_{I,mt}(\ddot{y}_{\mathrm{p-w},ij}) \quad (5.1)$$

gdzie:

F_{ij} – dyskretna siła oddziaływania środowiska wodnego;

$y_{\mathrm{p-w},ij}$ – przemieszczenie pionowe względem poziomu wody podstawy sektora *ij;*

$\dot{y}_{\mathrm{p-w},ij}$ – prędkość pionowa względem poziomu wody podstawy sektora *ij;*

$\ddot{y}_{\mathrm{p-w},ij}$ – przyspieszenie pionowe względem poziomu wody podstawy sektora *ij;*

$F_{\mathrm{B},ij}$ – siła wyporu oddziałująca na sektor *ij;*

$F_{\mathrm{D},ij}$ – siła oporów tłumiących wody oddziałująca na sektor *ij;*

$F_{\mathrm{Imt},ij}$ – siła bezwładności masy wody towarzyszącej oddziałująca na sektor *ij*.

Składową wyporu $F_{\mathrm{B},ij}$ wyliczono na podstawie zależności (5.2):

$$F_{\mathrm{B},ij} = y_{p-w,ij} a_s b_s \rho g \ [\mathrm{N}] \quad (5.2)$$

gdzie:

$a_{\mathrm{s}}, b_{\mathrm{s}}$ – wymiary podstawy sektora;

$y_{p-w,ij}$ – przemieszczenie pionowe względem poziomu wody podstawy sektora *ij;*

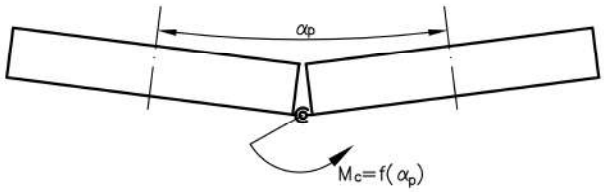
ρ – gęstość cieczy (dla wody w temperaturze 20 °C - 998,2 kg/m³);

g – przyspieszenie ziemskie (dla analizowanego przypadku przyjęto 9,81 m/s^2).

Wyznaczone wartości siły wyporu są wystarczające do sformułowania modelu statycznego sił reakcji środowiska wodnego działających na most pontonowy.

5.4. Modelowanie sztywności kątowej i luzu w połączeniach bloku pontonowego

Model sztywności kątowej i luzu w połączeniach bloku pontonowego zostanie wykorzystany do przeprowadzenia badań porównawczych wpływu struktury łączenia bloków pontonowych na obciążenia konstrukcji zarówno w przypadku przegubowego, jak i sztywnego łączenia bloków pontonowych. Aby to uzyskać, połączenie kolejnych elementów wykonano z wykorzystaniem węzła przegubowego typu „revolut joint". W przegubach przyłożone zostały momenty sił M_{c}, stanowiące momenty zastępczej sztywności giętnej, umożliwiające odwzorowanie reakcji konstrukcji w warunkach występowania odkształceń kątowych, których wartości zostały uzależnione od zmiany położenia kątowego bloków wokół osi przegubu α_p (Rys. 5.4).



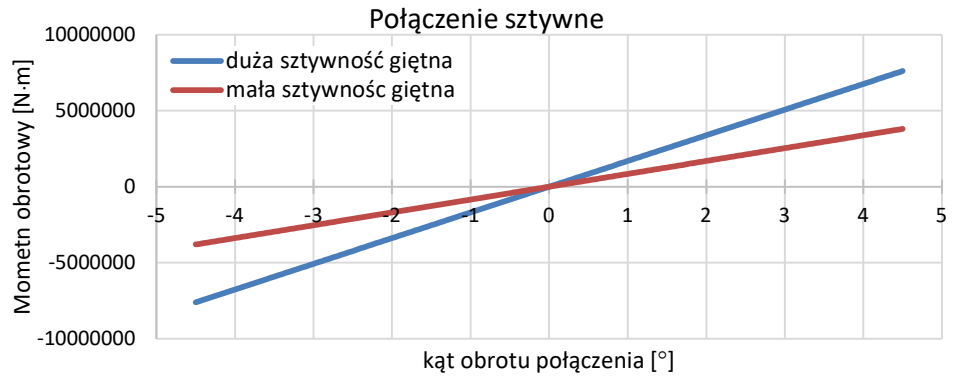
Rys. 5.4. Schemat odwzorowania połączeń bloków pontonowych

W zależności od zastosowanej podczas obliczeń funkcji momentu zastępczej sztywności giętnej, możliwe jest zamodelowanie różnych struktur łączenia oraz sztywności bloków pontonowych. Wizualizację wpływu kata obrotu połączenia bloków pontonowych na przebieg zmian i wartości momentu zastępczej sztywności kątowej dla przegubowej i sztywnej struktur łączenia bloków pontonowych przedstawiono na przykładowych wykresach (Rys. 5.5).

a)



b)

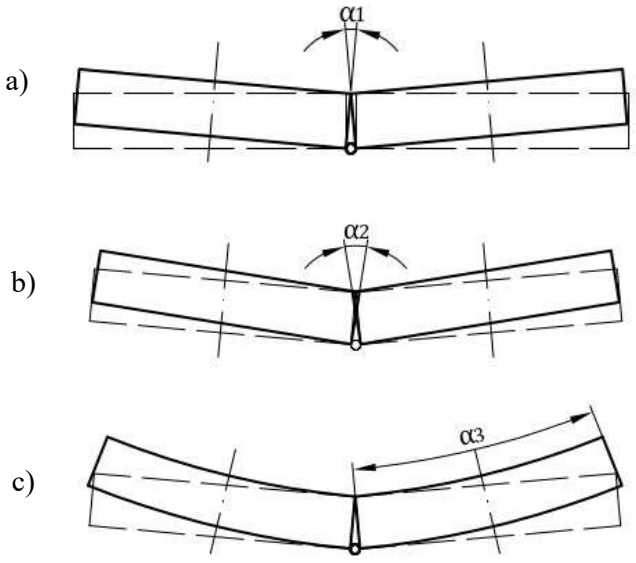


Rys. 5.5. Przykładowe charakterystyki momentu zastępczej sztywności kątowej, pozwalające na odwzorowanie różnych podatności na odkształcenia kątowe konstrukcji oraz struktury łączenia bloków pontonowych: a) połączenie przegubowe, b) połączenie sztywne [opracowanie własne]

W przypadku połączenia przegubowego zmiana wartości momentu zastępczego charakteryzuje się przebiegiem liniowym przedziałowo (Rys. 5.6a). Dla połączenia sztywnego moment ten zmienia się liniowo w całym zakresie zmian położenia kątowego bloków wokół osi przegubu (Rys. 5.6b). W obu przypadkach sztywność giętna bloków pontonowych poddanych odkształceniom kątowym jest proporcjonalna do nachylenia prostoliniowych odcinków charakterystyk.

Wartości współczynnika sztywności oraz kąta zblokowania przegubu dla konstrukcji mostu IRB zostały dobrane w oparciu o wyniki badań obiektu rzeczywistego przedstawione w pracy [27]. Przed przystąpieniem do obliczeń przyjęto, że w strukturze połączenia przegubowego bloków pontonowych występować mogą trzy rodzaje odkształceń kątowych, które należy odzwierciedlić w modelu numerycznym:

- odkształcenia kątowe wynikające obrotu wokół osi przegubu, jednostronnie ograniczonego wartością luzu α_1 (Rys. 5.6a);
- odkształcenia kątowe sprężyste elementów połączenia bloków pontonowych α_2 (Rys. 5.6b);
- odkształcenia kątowe sprężyste konstrukcji nośnej pontonów α_3 (Rys. 5.6c).



Rys. 5.6. Odkształcenia kątowe w połączeniach i konstrukcji bloków pontonowych odwzorowane zastępczym momentem gnącym: a) obrót w przegubie w zakresie luzu, b) kąt wynikający z podatności elementów połączenia bloków pontonowych, c) kąt wynikający ze zginania konstrukcji nośnej bloków pontonowych

Od występowania wymienionych powyżej odkształceń zależy wartość momentu gnącego generowanego w połączeniu pontonów. Moment ten przyjmuje wartości:

- równą zeru w przypadku pracy przegubu w zakresie luzu między blokami,

– proporcjonalną do odkształceń sprężystych konstrukcji dla przemieszczeń kątowych przekraczających zakres luzu między blokami.

Wartość momentu M_c można wyznaczyć z zależności (5.3):

$$\begin{cases} M_{\mathrm{c}} = 0,\ dla\ \alpha_{\mathrm{p}} \leq \alpha_g \\ M_{\mathrm{c}} = \dfrac{\alpha_{\mathrm{p}} - \alpha_{\mathrm{g}}}{\dfrac{1}{k_c} + \dfrac{l_{\mathrm{p}}}{E \cdot I}},\ dla\ \alpha_{\mathrm{p}} > \alpha_g \end{cases} \tag{5.3}$$

gdzie:

M_{c} – moment sił generowany w połączeniu bloków pontonowych;

α_{p}– kąt wzajemnego położenia bloków pontonowych;

α_g– graniczny kąt luzu w przegubie;

k_c– sztywność kątowa połączenia;

l_{p}– długość bloku pontonowego;

$E \cdot I$– sztywność giętna bloku pontonowego.

Dla sztywnego połączenia bloków pontonowych wartość momentu gnącego jest wprost proporcjonalna do wartości odkształceń w połączeniu i konstrukcji nośnej mostu. W tym przypadku moment gnący w przegubie można wyznaczyć z zależności (5.4):

$$M_{\mathrm{c}} = \frac{\alpha_{\mathrm{p}}}{\dfrac{1}{k_{\mathrm{c}}} + \dfrac{l_{\mathrm{p}}}{E \cdot I}} \tag{5.4}$$

gdzie:

M_{c} – moment gnący w przegubie;

α_{p}– kąt wzajemnego położenia bloków pontonowych;

k_{c}–sztywność kątowa połączenia;

l_{p}– długość bloku pontonowego;

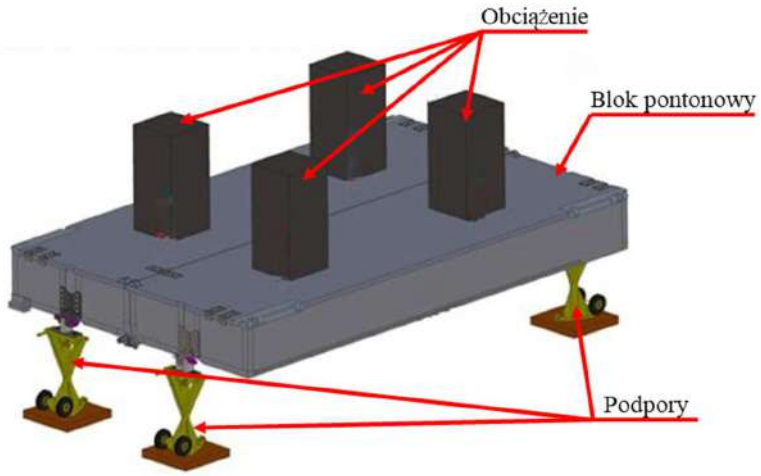
$E \cdot I$– sztywność giętna bloku pontonowego.

Dla obu rozpatrywanych wariantów połączeń bloków pontonowych, w zależnościach (5.3) i (5.4) występuje człon opisujący zastępczą sztywność giętną $\left(\frac{1}{k_c} + \frac{l_p}{E \cdot I}\right)^{-1}$, ujmujący wynikową podatność układu na ugięcia, będącą sumarycznym efektem sztywności giętnej bloku pontonowego oraz sztywności kątowej połączenia.

Parametry sztywności oraz kąt graniczny wyznaczono dla konstrukcji rzeczywistej, która jednocześnie stanowić będzie konstrukcję odniesienia dla dalszych, autorskich

badań symulacyjnych. Z uwagi na powszechne zastosowanie i dostępność danych umożliwiających wyznaczenie parametrów niezbędnych do zdefiniowania modelu symulacyjnego przyjęto, że konstrukcję odniesienia stanowił będzie most IRB o przegubowym sposobie łączenia bloków pontonowych. Wyniki dokonanej w ten sposób analizy porównawczej stanowić będą podstawę do oceny wpływu wprowadzonych modyfikacji na wartości obciążeń rozpatrywanej konstrukcji mostu.

Wyznaczenie parametrów modelu, tj. kąta luzu w przegubie α_g, sztywności zastępczej połączeń k_c oraz sztywności giętnej konstrukcji $E \cdot I$, przeprowadzono na podstawie wyników trzech serii badań eksperymentalnych zrealizowanych na obiekcie rzeczywistym, zamieszczonych w pracy [27]. W pierwszej serii Autorzy pracy przeprowadzili pomiary przemieszczeń wybranych punktów konstrukcji podczas obciążania skrajnie podpartego bloku pontonowego masami umieszczanymi na jego górnej powierzchni, w czterech symetrycznie rozmieszczonych obszarach (Rys. 5.7). Analiza uzyskanych wyników pomiarów umożliwiła określenie charakterystyki ugięcia pojedynczego bloku pontonowego w warunkach obciążenia statycznego oraz identyfikację parametrów opisujących jego sztywność giętną.



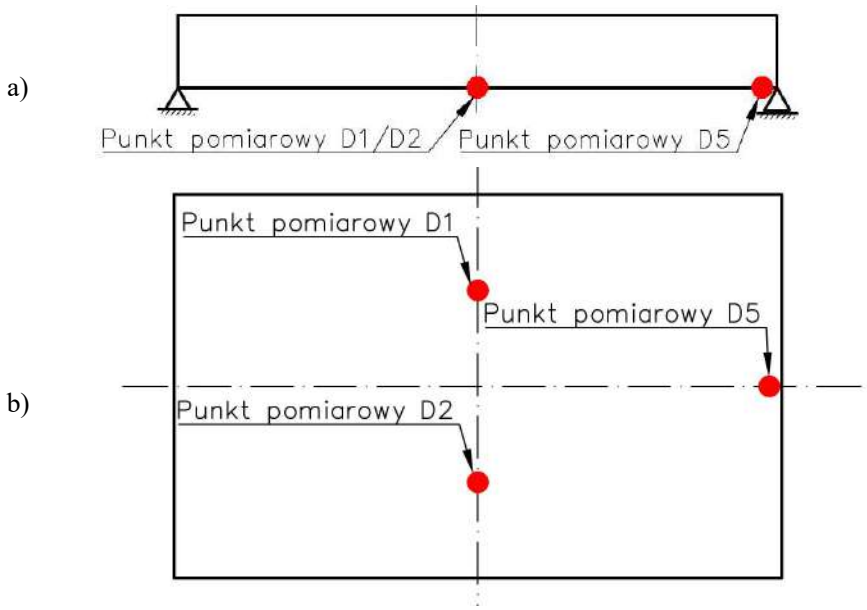
Rys. 5.7. Schemat statycznego obciążenia pojedynczego bloku pontonowego mostu IRB [27]

Podczas badań własnych uwzględniono dane zarejestrowane dla dwóch wariantów, obejmujących najmniejsze (I-A) i największe (I-B) zastosowane obciążenia. Zestawienie liczby i mas tych obciążeń zamieszczono w Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Warianty obciążeń jednego bloku pontonowego

Wariant	Liczba obciążeń	Masa pojedynczego obciążenia [kg]
I-A	4	1833
I-B	4	4146

Podczas obciążania konstrukcji mierzone były przemieszczenia pionowe wybranych punktów pomiarowych rozmieszczonych na dolnej powierzchni bloku pontonowego. Wyniki pomiaru przemieszczeń punktów pomiarowych D1, D2 i D5 w bloku pontonowym dla wariantu obciążeń I-A (Rys. 5.8)



Rys. 5.8. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych D1, D2 i D5 w czasie obciążania konstrukcji bloku pontonowego w wariantach I-A i I-B: a) widok z boku, b) widok z góry [27]

Do analizy wykorzystano wyniki pomiarów przemieszczeń pionowych w punktach zlokalizowanych w środkowej części pontonu (D1 i D2) oraz w rejonie podpory (D5). Dla obu wariantów obciążenia wyliczono wartość ugięcia uśrednionego pojedynczego bloku pontonowego $u_{śr}$ z zależności (5.5):

$$u_{\text{śr}} = \frac{u_{\text{D1}} + u_{\text{D2}}}{2} - u_{\text{D5}} \tag{5.5}$$

gdzie:

$u_{\text{D1}}, u_{\text{D2}}$ – ugięcia zmierzone w środkowej części pontonu, w punktach pomiarowych D1 i D2;

u_{D5} – ugięcie zmierzone w rejonie podpory, w punkcie pomiarowym D5.

Wartość $u_{\text{śr}}$ wyznaczono jako różnicę pomiędzy średnią wartością ugięć zmierzonych w środku pontonu (punkty D1 i D2) a ugięciem zarejestrowanym w punkcie podparcia D5. Takie podejście umożliwiło określenie ugięcia wynikającego wyłącznie ze sztywności giętnej konstrukcji pontonu, z pominięciem wpływu przemieszczeń spowodowanych ugięciem podpór oraz elementów montażowych.

Wartości wyników pomiarów ugięć pontonów w punktach D1, D2 i D5 oraz wyliczonego ugięcia uśrednionego $u_{śr}$ pojedynczego bloku pontonowego dla rozpatrywanych wariantów obciążenia przedstawiono w Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Wartości przemieszczeń punktów pomiarowych D1, D2 i D5 i wyliczonych wartości $u_{śr}$ dla wariantów obciążeń I-A i I-B [27]

Mierzony parametr	Wartości przemieszczeń/ugięcia [mm]	
	Wariant obciążenia I-A	Wariant obciążenia I-B
D1	1,4986	3,2258
D2	1,8542	3,7592
D5	0,84074	2,2225
$u_{śr}$	0,836	1,27

W oparciu o wyliczoną wartość $u_{śr}$, określoną dla dwóch wariantów obciążenia (I-A i I-B) wyznaczono strzałkę ugięcia dla pojedynczego bloku pontonowego f_I z zależności (5.6):

$$f_{\mathrm{I}} = u_{\mathrm{śr,I-A}} - u_{\mathrm{śr,I-B}} = 0{,}434 \text{ mm} \tag{5.6}$$

gdzie:

$u_{\mathrm{śr,I-A}}$ – przemieszczenie uśrednione dla wariantu obciążenia I-A;

$u_{\mathrm{śr,I-B}}$ – przemieszczenie uśrednione dla wariantu obciążenia I-B.

Obliczona strzałka ugięcia f_I wynika z przyłożenia obciążenia stanowiącego różnicę ciężarów między wariantami obciążeń, zatem wartość siły ciężkości F_{fI} generowanej przez pojedynczą masę w danym wariancie obciążenia bloku pontonowego, wywołującą strzałkę ugięcia f_I , obliczono z zależności (5.7):

$$F_{\mathrm{fI}} = (m_{\mathrm{I-B}} - m_{\mathrm{I-A}}) \cdot g = 2313{,}36 \text{ N} \tag{5.7}$$

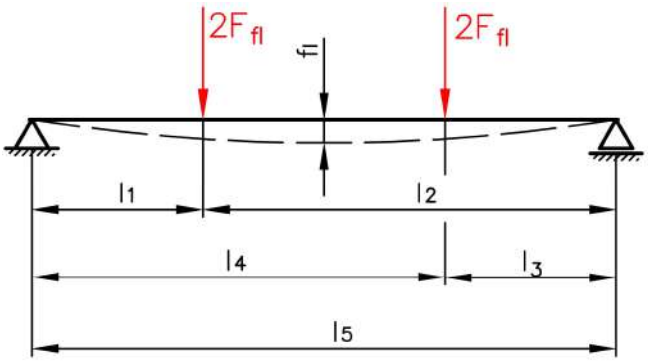
gdzie:

$m_{\mathrm{I-B}}$ – masa pojedynczego obciążenia w wariancie I-B (4146 kg);

$m_{\mathrm{I-A}}$ – masa pojedynczego obciążenia w wariancie I-A (1833 kg);

g – przyśpieszenie ziemskie (przyjęto 9,81 m/s^2).

W oparciu o przyjęty rozkład obciążeń opracowano model zastępczy bloku pontonowego w postaci dwuwymiarowej belki obustronnie podpartej, zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 5.9.



Rys. 5.9. Model zastępczego pojedynczego bloku pontonowego

Dla powyższego modelu pojedynczego bloku pontonowego wartość strzałki ugięcia f_I można wyznaczyć z zależności (5.8) [50]:

$$f_I = \frac{2 \cdot F_{\mathrm{fl}} \cdot {l_1}^2 \cdot {l_2}^2 + 2 \cdot F_{\mathrm{fl}} \cdot {l_3}^2 \cdot {l_4}^2}{3E \cdot I \cdot l_5} \tag{5.8}$$

gdzie:

$2\,F_{\mathrm{fl}}$ – siły skupione odwzorowujące ciężar mas obciążających (dla analizowanego przypadku $4\,626{,}72\ N$);

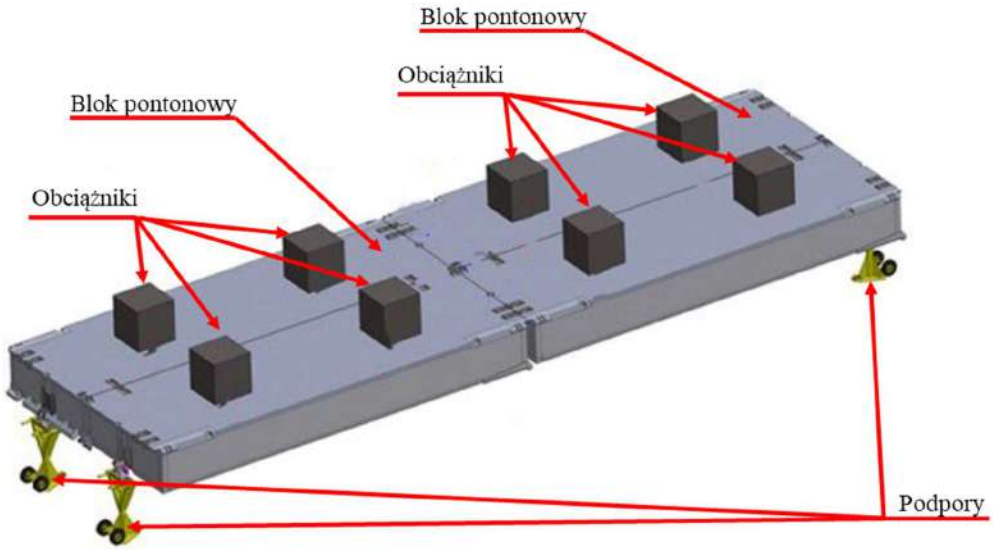
l_1, l_2, l_3, l_4, l_5 – wymiary modelu zastępczego (dla analizowanego przypadku: l_1 =1,674 m; l_2 =5,026 m; l_3 =1,674 m; l_4 =5,026 m; l_5 =6,7m);

$E \cdot I$ – moduł sztywności giętnej pojedynczego bloku pontonowego.

Po przekształceniu zależności (5.8) wyliczono wartość modułu sztywności giętnej $E \cdot I$:

$$E \cdot I = \frac{2 \cdot F_{\mathrm{fl}} \cdot {l_1}^2 \cdot {l_2}^2 + 2 \cdot F_{\mathrm{fl}} \cdot {l_3}^2 \cdot {l_4}^2}{3 \cdot f_I \cdot l_5} = 7{,}36 \cdot 10^8\ N \cdot m^2 \tag{5.9}$$

W kolejnym kroku dokonano analizy wyników badań odcinka dwóch połączonych bloków pontonowych mostu IRB w celu wyznaczenia współczynnika sztywności kątowej ich połączenia. W czasie badań konstrukcję podparto skrajnie i obciążono ośmioma masami rozmieszczonymi na górnej powierzchni pontonów [27]. Obciążenie poszczególnych pontonów rozmieszczono w czterech, symetrycznie rozłożonych punktach (Rys. 5.10).



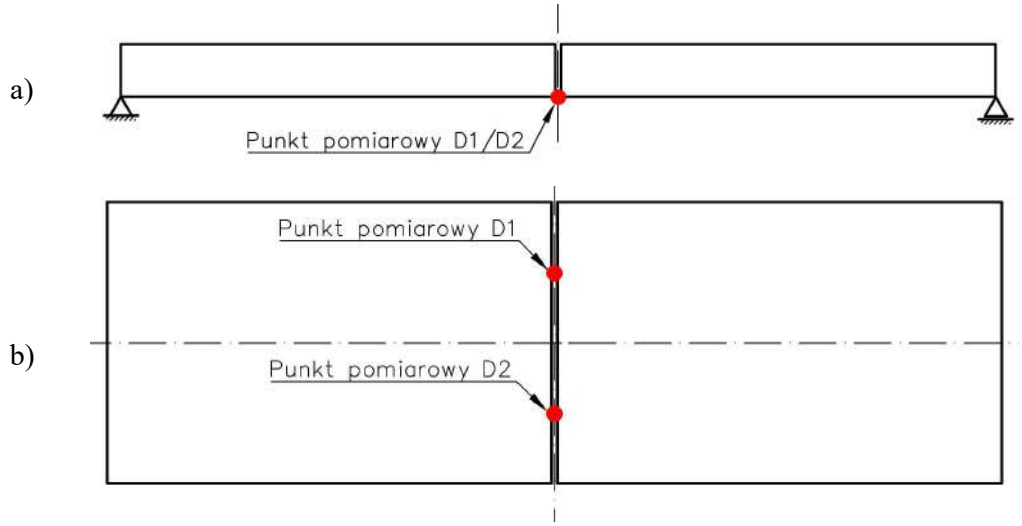
Rys. 5.10. Rozkład obciążenia dwóch połączonych bloków pontonowych mostu IRB [27]

Do analizy przyjęto badania przeprowadzone dla dwóch wariantów obciążeń: II-A i II-B, różniących się wartością masy pojedynczego obciążnika (Tabela 5.4).

Tabela 5.4. Warianty obciążeń konstrukcji dwóch połączonych bloków pontonowego

Wariant	Liczba obciążników	Masa pojedynczego obciążnika [kg]
II-A	8	463
II-B	8	1397

W czasie obciążania mierzone były przemieszczenia pionowe punktów pomiarowych rozmieszczonych na dolnej powierzchni pontonów. Rozmieszczenie tych punktów zwizualizowano na Rys. 5.11.



Rys. 5.11. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych D1, D2 w czasie obciążania konstrukcji bloku pontonowego w wariantach II-A i II-B [27]: a) widok z boku, b) widok z góry

Autorzy badań w czasie pomiarów na dwóch blokach pontonowych nie dokonali pomiarów przemieszczeń w miejscach podparcia. Aby uwzględnić przemieszczenia wynikających z ugięcia podpór i elementów montażowych, przemieszczenia te wyznaczono na podstawie pomiarów przeprowadzonych dla pojedynczego pontonu, przyjmując wartości proporcjonalnie do wartości reakcji w podporach. Dla wariantu II-A przemieszczenia w podporach $u'_{D5,II-A}$ wyznaczono na podstawie zależności:

$$u'_{\mathrm{D5,II-A}} = u_{\mathrm{D5,I-B}} \frac{8 \cdot m_{\mathrm{II-B}} g}{4 \cdot m_{\mathrm{I-B}} g} = 0{,}496\ mm \tag{5.10}$$

gdzie:

$u_{\mathrm{D5,I-B}}$ – przemieszczenie w obszarze podpór zmierzone w wariancie I-B;

$4 \cdot m_{\mathrm{I-B}} g$ – ciężar wszystkich obciążeń w wariancie I-B, równy reakcji w podporach;

$8 \cdot m_{\mathrm{II-B}} g$ – ciężar wszystkich obciążeń w wariancie II-A, równy reakcji w podporach.

Analogicznie wyznaczono przemieszczenia w podporach dla wariantu II-B. Następnie wyznaczono wartość ugięcia uśrednionego pojedynczego bloku pontonowego $u_{śr}$ zgodnie z zależnością (5.5). Wyniki pomiarów przemieszczeń i wyznaczonych parametrów dla wariantów obciążenia II-A i II-B przedstawiono w Tabela 5.5.

Tabela 5.5.Wartości przemieszczeń punktów pomiarowych pod wpływem zadanych obciążeń

przemieszczenie/ugięcie	Wartość przemieszczenia [mm]	
	Wariant obciążenia II-A	Wariant obciążenia II-B
D1	31,6	36,0
D2	36,3	36,0
D5 (wartość wynikowa)	0,496	1,50
$u_{śr}$	31,0	34,7

Na podstawie parametrów zestawionych w Tabela 5.5 oraz na podstawie zależności (5.6) wyznaczono strzałkę ugięcia f_{II} wynikającą z różnicy obciążeń pomiędzy wariantami II–A i II–B:

$$f_{\mathrm{II}} = 3{,}70 \text{ mm} \tag{5.11}$$

Siłę ciężkości pojedynczej masy generującej wyznaczoną strzałkę ugięcia F_{fII}, obliczono z zależności:

$$F_{\mathrm{fII}} = (m_{\mathrm{II-B}} - m_{\mathrm{II-A}}) \cdot g = 9166{,}5 \text{ N} \tag{5.12}$$

gdzie:

$m_{\mathrm{II-B}}$ – masa pojedynczego obciążenia w wariancie II-B (1397,1 kg);

$m_{\mathrm{II-A}}$ – masa pojedynczego obciążenia w wariancie II-A (462,7 kg);

g – przyśpieszenie ziemskie (przyjęto 9,81 m/s^2).

Wyliczona wartość strzałki ugięcia f_{II} wynika z odkształceń sprężystych:

- elementów połączenia bloków pontonowych (Rys. 5.6b);
- konstrukcji nośnej pontonów (Rys. 5.6c).

Jej wartość można więc podzielić na dwie składowe, zgodnie z zależnością:

$$f_{\mathrm{II}} = f_{\mathrm{II,C}} + f_{\mathrm{II,S}} \tag{5.13}$$

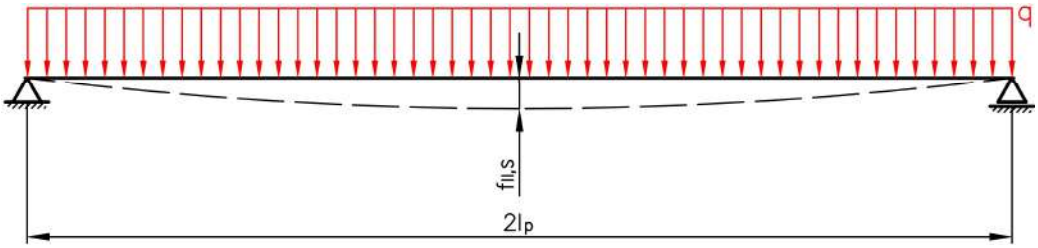
gdzie:

$f_{\mathrm{II,C}}$ – strzałka ugięcia wynikająca z odkształceń elementów połączenia bloków pontonowych;

$f_{\mathrm{II,S}}$ - strzałka ugięcia wynikająca z odkształceń konstrukcji nośnej bloków pontonowych.

Dla strzałki ugięcia wynikającej z odkształceń konstrukcji nośnej bloków przyjęto model zastępczy bloku pontonowego w postaci dwuwymiarowej belki obustronnie

podpartej, na którą oddziałuje obciążenie równomiernie rozłożone, zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 5.12.



Rys. 5.12. Schemat modelu zastępczego dwóch bloków pontonowych w zakresie odkształceń konstrukcji nośnej bloków pontonowych

Obciążenie równomiernie rozłożone q dla analizowanego przypadku wyznaczono z zależności:

$$q = \frac{8 \cdot F_{\mathrm{fII}}}{2l_{\mathrm{p}}} = 5472{,}5\ \frac{N}{m} \tag{5.14}$$

gdzie:

F_{fII} – siła ciężkości pojedynczego obciążnika wyznaczona z zależności (5.12);

$2l_{\mathrm{p}}$ – długość modelu zastępczego – dwie długości bloku pontonowego (dla analizowanego przypadku - 13,4 m).

Dla przyjętego zastępczego modelu obciążenia belki wartość strzałki ugięcia wynikająca z odkształceń konstrukcji nośnej bloków pontonowych $f_{\mathrm{II,S}}$, wyznaczona została z zależności [50]:

$$f_{\mathrm{II,S}} = \frac{5}{384}\frac{q(2l_{\mathrm{p}})^4}{E \cdot I} = 3{,}12\ \mathrm{mm} \tag{5.15}$$

gdzie:

q – obciążenie równomiernie rozłożone, wyznaczone z zależności (5.14);

$2l_{\mathrm{p}}$ – długość modelu zastępczego (dla analizowanego przypadku: 13,4 m);

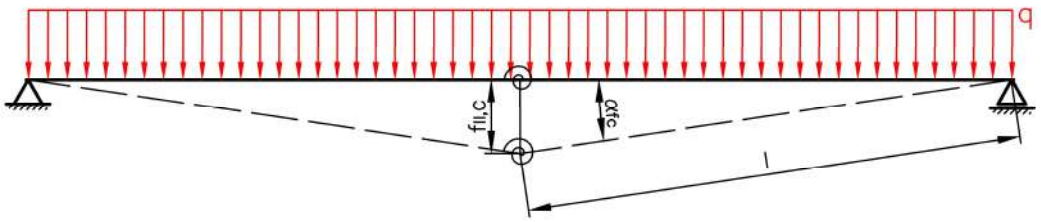
$E \cdot I$ – moduł sztywności giętnej (dla analizowanego przypadku 5472,5 N·m^2).

Po przekształceniu zależności (5.13) strzałka ugięcia wynikająca z odkształceń elementów połączenia bloków pontonowych $f_{II,C}$ wynosi:

$$f_{\mathrm{II,C}} = f_{\mathrm{II}} - f_{\mathrm{II,S}} = 0{,}580\ mm \tag{5.16}$$

Dla strzałki ugięcia wynikającej z odkształceń elementów połączenia bloków pontonowych, wyznaczono model zastępczy w postaci dwóch belek sztywnych

połączonych przegubem sprężystym, na które oddziałuje obciążenie równomiernie rozłożone, zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 5.13.



Rys. 5.13. Schemat modelu zastępczego dwóch bloków pontonowych w zakresie odkształceń elementów połączenia bloków pontonowych

Pod wpływem obciążenia równomiernie rozłożonego w przegubie sprężystym generowany jest moment obrotowy M_{C} którego wartość wyznaczono z zależności [50]:

$$M_{\mathrm{C}} = \frac{1}{8} q {l_{\mathrm{p}}}^2 = 122\,830\ \mathrm{N \cdot m} \tag{5.17}$$

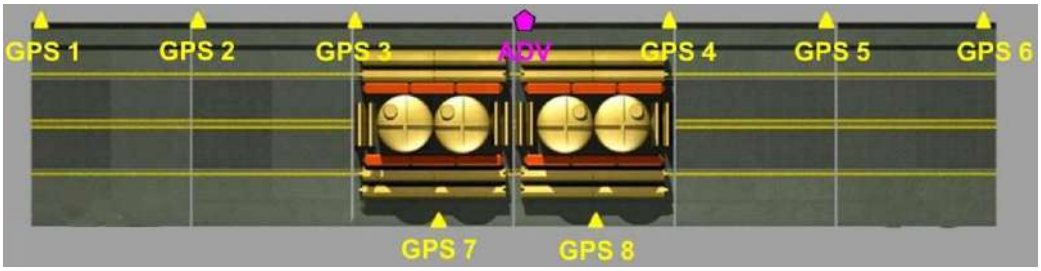
Towarzyszy temu kątowe ugięcie sprężyste w przegubie α_{fc}, którego wartość zgodnie z zależnościami trygonometrycznymi wynosi:

$$\alpha_{\mathrm{fc}} = 2 \sin^{-1}\left(\frac{f_{\mathrm{II,C}}}{l_{\mathrm{p}}}\right) = 1{,}73 \cdot 10^{-4} rad \tag{5.18}$$

Na podstawie momentu obrotowego w przegubie i jego kąta ugięcia, wyznaczony może zostać współczynnik sztywności przegubu k_c z wykorzystaniem zależności (5.19):

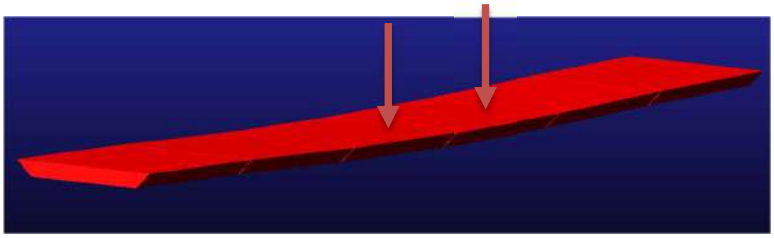
$$k_{\mathrm{c}} = \frac{M_{\mathrm{C}}}{\alpha_{\mathrm{fc}}} = 7{,}0945 \cdot 10^8\ \frac{\mathrm{N \cdot m}}{rad} \tag{5.19}$$

W kolejnym kroku wykorzystano wyniki badań statecznego obciążania odcinka mostu pontonowego na przeszkodzie wodnej [27]. Pozwoliły one na wyznaczenie wartości granicznego kąta względnego przemieszczenia sąsiadujących bloków pontonowych, charakterystycznego dla połączenia przegubowego. W pracy [27] opublikowano wartości zanurzeń konstrukcji w punktach pomiarowych obciążonego odcinka mostu składającego się z sześciu bloków pontonowych. Rozmieszczenie punktów pomiarowych i bloków obciążających przedstawiono na Rys. 5.14.



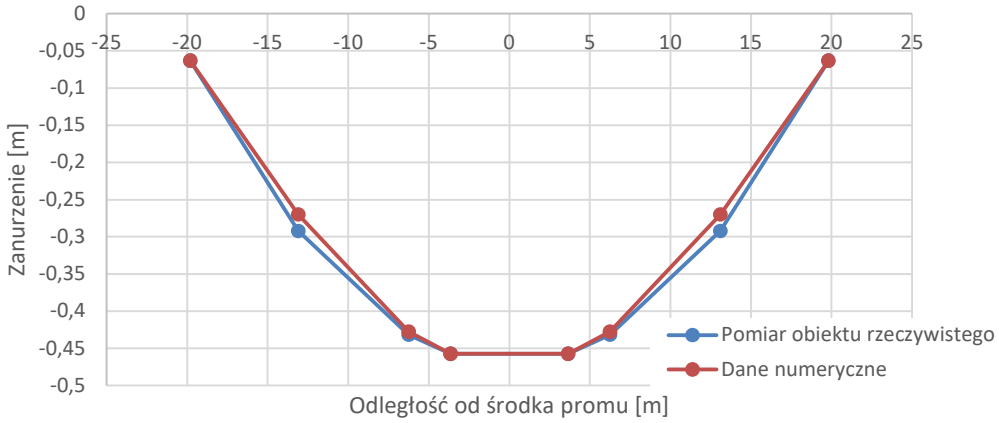
Rys. 5.14. Wizualizacja obiektu badań oraz rozmieszczenia zbiorników obciążających i punktów pomiarowych [27]

W ramach badań własnych przygotowano model symulacyjny odcinka mostu, odpowiadający badanemu obiektowi rzeczywistemu wraz z siłami modelującymi ciężar zbiorników obciążających (Rys. 5.15). W modelu zastosowano odwzorowanie siły wyporu przedstawione w rozdziale 5.3. W przegubach połączeń bloków pontonowych przyłożone zostały momenty obrotowe wyznaczane na podstawie zależności (5.3) z zastosowanymi wyznaczonymi wcześniej współczynnikami sprężystości $E \cdot I$ i k_c.



Rys. 5.15. Wizualizacja modelu numerycznego badanego odcinka mostu pontonowego

Przeprowadzono serię symulacji, w których dla różnych wartości kąta granicznego wyznaczano pionowe przemieszczenia charakterystycznych punktów odcinka mostu, a następnie porównywano je z odpowiadającymi im pomiarami wykonanymi na obiekcie rzeczywistym. Następnie określono wartość kąta granicznego, dla której uzyskano najmniejszą sumę różnic zanurzenia w poszczególnych punktach pomiarowych, wyznaczonych doświadczalnie i numerycznie. Porównanie zanurzeń uzyskanych dla wyznaczonego kąta blokowania bloków pontonowych z wartościami doświadczalnymi przedstawiono na Rys. 5.16.



Rys. 5.16. Zestawienie wartości zanurzeń w punktach pomiarowych wyznaczonych na obiekcie rzeczywistym [27] oraz na podstawie symulacji przeprowadzonych w MSC Adams/View

Dobrany do dalszych analiz kąt graniczny blokowania przegubów łączących bloki pontonowe wynosi:

$$\alpha_g = 0{,}4\,^\circ \tag{5.20}$$

Wyniki zanurzeń zmierzone na obiekcie rzeczywistym oraz wyznaczone podczas symulacji porównano poprzez wyznaczenie parametrów walidacyjnych przedstawionych w Tabela 5.6.

Tabela 5.6.Zestawienie parametrów walidacyjnych modelu symulacyjnego

Parametr	Wartość
Współczynnik determinacji	0,998
Różnica maksymalna	0,022 m
RMSE	0,00036 m

Na podstawie uzyskanych wartości parametrów walidacyjnych uznano, że wyznaczona sztywność giętna, zastępcza sztywność kątowa połączenia oraz kąt graniczny blokowania pozwalają na sfomułowanie poprawnego modelu statycznego mostu pontonowego IRB.

6. Badania identyfikacyjne

6.1. Założenia do budowy modeli doświadczalnych

Badania identyfikacyjne zrealizowano z wykorzystaniem modeli doświadczalnych wykonanych w przyjętej skali. Badania tego typu, z uwagi na bezpośrednie odwzorowanie fizyczne, zapewniają wiarygodne odtworzenie zjawisk zachodzących w obiekcie rzeczywistym. Wymagają one jednak właściwego skalowania modelu oraz wyników, pozwalającego na uzyskanie wiarygodnych wyników badań, pomimo występowania efektów skalowych,

Wyróżnić można trzy rodzaje podobieństw jakie należy zachować w celu prawidłowego odwzorowania zjawisk z wykorzystaniem modelu laboratoryjnego [51]:

- podobieństwo geometryczne;
- podobieństwo kinematyczne;
- podobieństwo dynamiczne.

Podobieństwo geometryczne modelu i obiektu rzeczywistego występuje wówczas, gdy równe są stosunki odpowiadających sobie wymiarów homologicznych. Wartość stosunku wymiarów modelu i obiektu rzeczywistego stanowi skalę geometryczną S_L:

$$S_{\mathrm{L}} = \frac{L_{\mathrm{m}}}{L_{\mathrm{r}}} \tag{6.1}$$

gdzie:

L_{m} – wymiar modelu;

L_{r} – wymiar obiektu rzeczywistego.

Podobieństwo kinematyczne modelu i obiektu rzeczywistego występuje, jeżeli zachowane jest podobieństwo geometryczne oraz stosunki prędkości i przyspieszeń w punktach homologicznych są sobie równe. Zachowanie podobieństwa kinematycznego wymaga określenia skali: prędkości, czasu i przyspieszeń. Wartość skali prędkości S_v wyliczana jest z zależności:

$$S_{\mathrm{v}} = \frac{v_{\mathrm{m}}}{v_{\mathrm{r}}} \tag{6.2}$$

gdzie:

v_{m} – prędkość modelu;

v_{r} – prędkość obiektu rzeczywistego.

Wartość skali czasu S_t opisuje zależność:

$$S_{\mathrm{t}} = \frac{t_{\mathrm{m}}}{t_{\mathrm{r}}} \tag{6.3}$$

gdzie:

t_{m} – czas charakterystyczny modelu;

t_{r} – czas charakterystyczny obiektu rzeczywistego.

Wartość skali przyspieszeń S_a opisuje zależność:

$$S_{\mathrm{a}} = \frac{a_{\mathrm{m}}}{a_{\mathrm{r}}} \tag{6.4}$$

gdzie:

a_{m} – przyspieszenie modelu;

a_{r} – przyspieszenie obiektu rzeczywistego.

Podobieństwo dynamiczne występuje, gdy zachowane jest podobieństwo geometryczne i kinematyczne oraz stosunki sił i mas homologicznych są równe. Zachowanie podobieństwa dynamicznego wymaga określenia skali siły S_F:

$$S_{\mathrm{F}} = \frac{F_{\mathrm{m}}}{F_{\mathrm{r}}} \tag{6.5}$$

gdzie:

F_{m} – wartość siły występującej w modelu;

F_{r} – wartość siły występującej w obiekcie rzeczywistym.

W przypadku zachowania podobieństwa dynamicznego, zachowana jest również skala momentów S_{M}, wyliczana z zależności:

$$S_{\mathrm{M}} = \frac{M_{\mathrm{m}}}{M_{\mathrm{r}}} \tag{6.6}$$

gdzie:

M_{m} – wartość momentu sił występującego w modelu;

M_{r} – wartość momentu sił występującego w obiekcie rzeczywistym.

Wartości skal są uzależnione od przyjętego kryterium podobieństwa. Odwzorowanie zjawisk falowania towarzyszących mostom pontonowym wymaga zachowania w modelu kryterium Froude'a, wyrażonego zależnością:

$$\mathrm{Fr}_{\mathrm{m}} = \mathrm{Fr}_{\mathrm{r}} = \frac{v_{\mathrm{m}}}{\sqrt{gL_{\mathrm{m}}}} = \frac{v_{\mathrm{r}}}{\sqrt{gL_{\mathrm{r}}}} \tag{6.7}$$

gdzie:

Fr_{m} – liczba Froude'a modelu;

Fr_{r} – liczba Froude'a obiektu rzeczywistego;

g – przyspieszenie ziemskie.

Przekształcając zależności (6.6) oraz (6.7) otrzymano zależność umożliwiającą wyznaczenie skali prędkości:

$$S_{\mathrm{V}} = \frac{V_{\mathrm{m}}}{V_{\mathrm{r}}} = \frac{\sqrt{gL_{\mathrm{m}}}}{\sqrt{gL_{\mathrm{r}}}} = \sqrt{\frac{L_{\mathrm{m}}}{L_{\mathrm{r}}}} = \sqrt{S_{\mathrm{L}}} \tag{6.8}$$

Przy założeniu ruchu jednostajnego, skalę czasu można wyznaczyć z zależności (6.3) oraz (6.8), uzyskując:

$$S_{\mathrm{t}} = \frac{t_{\mathrm{m}}}{t_{\mathrm{r}}} = \frac{\frac{L_{\mathrm{m}}}{V_{\mathrm{m}}}}{\frac{L_{\mathrm{r}}}{V_{\mathrm{r}}}} = \frac{S_{\mathrm{L}}}{S_{\mathrm{V}}} = \frac{S_{\mathrm{L}}}{\sqrt{S_{\mathrm{L}}}} = \sqrt{S_{\mathrm{L}}} \tag{6.9}$$

Przyjmując, że w obiekcie rzeczywistym i modelu gęstość cieczy jest taka sama, skalę mas można wyznaczyć z zależności:

$$S_M = \frac{M_{\mathrm{m}}}{M_{\mathrm{r}}} = \frac{{L_{\mathrm{m}}}^3 \rho}{{L_{\mathrm{r}}}^3 \rho} = {S_{\mathrm{L}}}^3 \tag{6.10}$$

Ponieważ wartość siły wyliczana jest jako iloczyn masy i przyspieszenia, skalę sił opisuje zależność:

$$S_{\mathrm{F}} = \frac{F_{\mathrm{m}}}{F_{\mathrm{r}}} = \frac{m_{\mathrm{m}} a_{\mathrm{m}}}{m_{\mathrm{r}} a_{\mathrm{r}}} = \frac{m_{\mathrm{m}} \frac{L_{\mathrm{m}}}{{t_{\mathrm{m}}}^2}}{m_{\mathrm{r}} \frac{L_{\mathrm{r}}}{{t_{\mathrm{r}}}^2}} = \frac{{S_{\mathrm{L}}}^3 S_{\mathrm{L}}}{\sqrt{S_{\mathrm{L}}}^2} = {S_{\mathrm{L}}}^3, \tag{6.11}$$

natomiast skalę momentów sił ujmuje zależność:

$$S_{\mathrm{M}} = \frac{F_{\mathrm{m}} L_{\mathrm{m}}}{F_{\mathrm{r}} L_{\mathrm{r}}} = {S_{\mathrm{L}}}^4 \tag{6.12}$$

W badaniach własnych odwzorowano most o długości 100 m, odpowiadającej podstawowej długości modułu analizowanej konstrukcji. Ponadto w modelu przewidziano dodatkową strefę rezerwową, odpowiadającą 20 m obiektu rzeczywistego, przeznaczoną na elementy ograniczające przemieszczenia skrajnych pontonów. Strefa ta umożliwia również odsunięcie ścian basenu od odcinka pomiarowego mostu, co umożliwia ograniczenie wpływu fal odbitych na wyniki prowadzonych pomiarów.

Jeżeli szerokość wykorzystywanego podczas badań własnych modelu przeszkody wodnej wynosi 4,8 m, to skalę geometryczną można wyznaczyć:

$$S_{\mathrm{L}} = \frac{4{,}8\ m}{120\ m} \approx 1{:}25 \tag{6.13}$$

Wyznaczono także pozostałe skale:

- prędkości

$$S_{\mathrm{V}} = \sqrt{S_{\mathrm{L}}} = 1{:}5 \tag{6.14}$$

- czasu:

$$S_{\mathrm{t}} = \sqrt{S_{\mathrm{L}}} = 1{:}5 \tag{6.15}$$

- masy:

$$S_{\mathrm{m}} = {S_{\mathrm{L}}}^{3} = 1{:}15\,625 \tag{6.16}$$

- sił:

$$S_{\mathrm{F}} = {S_{\mathrm{L}}}^{3} = 1{:}15\,625 \tag{6.17}$$

- momentów sił:

$$S_{\mathrm{M}} = {S_{\mathrm{L}}}^{4} = 1{:}390\,625 \tag{6.18}$$

Skale te umożliwiają właściwe określenie parametrów konstrukcyjnych modeli doświadczalnych, a także późniejsze przekształcenie uzyskanych wyników na wartości odpowiadające obiektowi rzeczywistemu.

6.2. Badania identyfikacyjne parametrów hydrodynamicznych nurzania mostu

Celem badań była identyfikacja wartości i charakterystyk sił hydrodynamicznych oddziałujących na konstrukcję mostu w trakcie jego nurzania oraz zarejestrowanie charakterystyk pozwalających na późniejsze przeprowadzenie walidacji modelu numerycznego w tym zakresie.

Do budowy modelu przyjęto następujące uproszczenia:

- odcinek mostu potraktowano jako obiekt nieodkształcalny,
- pominięto oddziaływania dna i brzegu,
- odcinek mostu obciążono stałą masą.

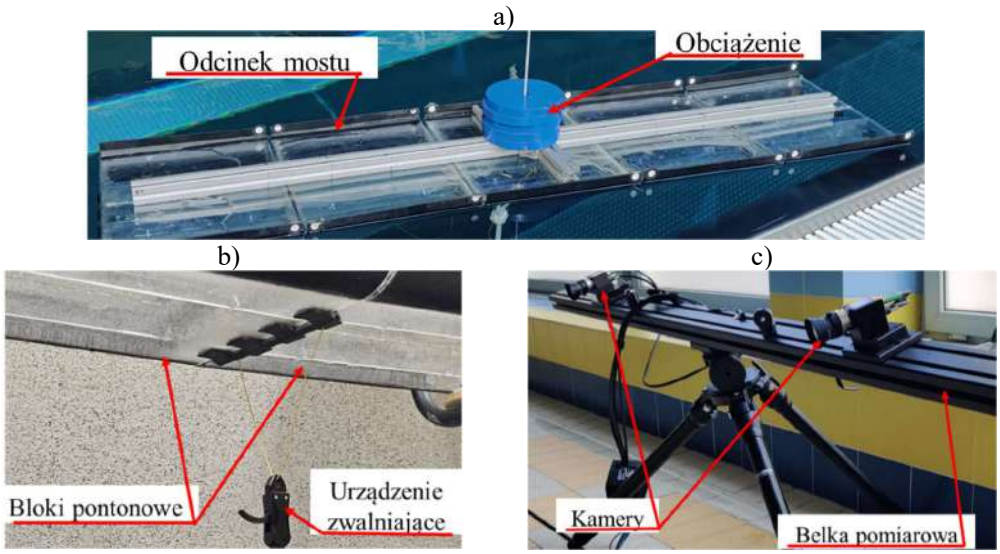
Opracowany model doświadczalny składa się z pięciu połączonych bloków pontonowych. Opowiada to liczbie bloków, które w rzeczywistym moście biorą udział w przenoszeniu obciążeń pochodzących od przeprawianego pojazdu (Rys. 6.1a). W rzeczywistym obiekcie odcinek ten ma zniwelowane luzy w przegubach i zachowuje się jak sztywna belka. Z tego względu bloki w opracowanym modelu również zostały połączone ze sobą sztywno. Pozwoliło to również na ujednolicenie wartości sił hydrodynamicznych, dzięki czemu możliwe było zrealizowanie opisanego w dalszej części pracy procesu wyznaczenia charakterystyk sił oporów tłumiących oraz masy wody towarzyszącej.

Podczas badań rejestrowano swobodne nurzania odcinka mostu, występujące po zadaniu kinematycznego wymuszenia w postaci przemieszczenia pionowego, którego wartość nie powodowała zatopienia obiektu (generując wartości zanurzenia w zakresie odpowiadającym dla obiektu rzeczywistego 0,53–0,83 m). Do realizacji tego etapu wykorzystano urządzenie zwalniające (Rys. 6.1b), umożliwiające kontrolowane zwolnienie modelu z pozycji zanurzenia.

Model umożliwia również wprowadzenie obciążenia zmieniającego jego zanurzenie statyczne. W czasie badań wykonano pomiary dla obciążeń, odpowiadających obciążeniom obiektu rzeczywistego, o wartościach:

- 0 kg;
- 47 000 kg
- 73 000 kg;
- 99 000 kg;
- 125 000 kg.

Do pomiarów przemieszczeń wybranych punktów pomiarowych wykorzystano optyczny system pomiarowy ZEISS Aramis (Rys. 6.1c). Pomiary za pomocą tego systemu polegają na śledzeniu znaczników umieszczonych na powierzchni badanych elementów i rejestracji zmian ich położenia w funkcji czasu. Dokładność pomiarów przemieszczeń tych znaczników wynosi 0,1 mm przy częstotliwości realizacji pomiarów 75 Hz.



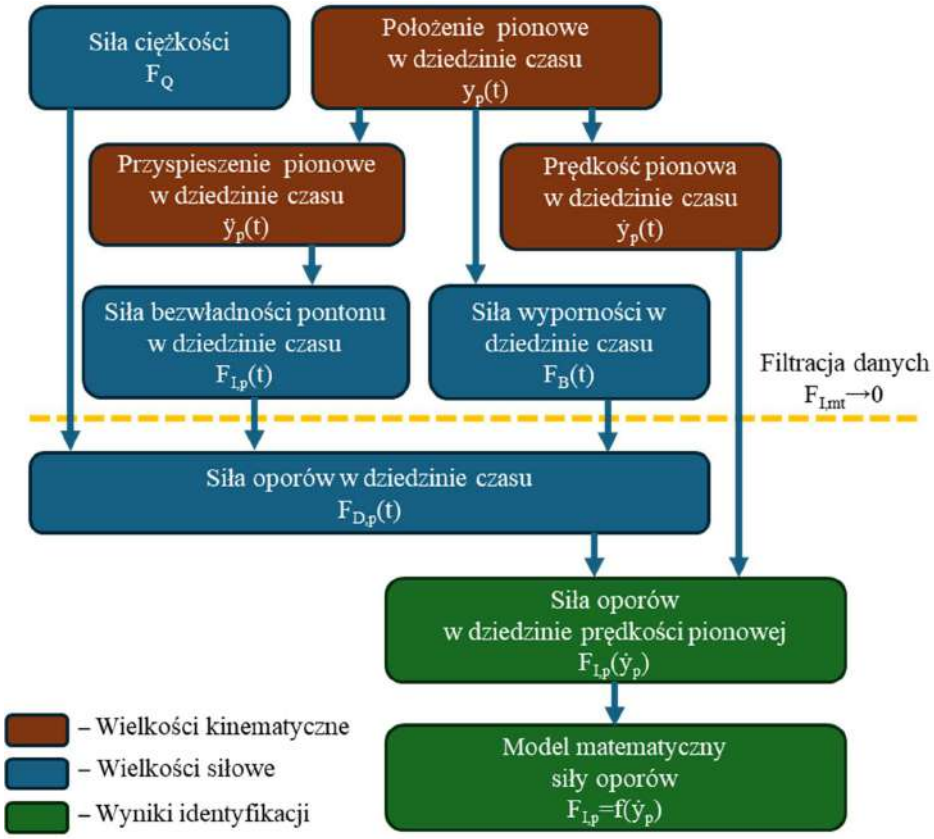
Rys. 6.1. Stanowisko laboratoryjne do badań identyfikacyjnych odcinka mostu w obszarze tłumienia i masy wody towarzyszącej: a) model odcinka mostu; b) urządzenie zwalniające c) optyczny układ pomiarowy

Zarejestrowane wartości przemieszczeń pionowych mierzone były w odniesieniu do położenia równowagi, w którym ciężar nieobciążonego odcinka mostu równoważony był przez siły wyporu.

Identyfikacja oddziaływań hydrodynamicznych została przeprowadzona w dwóch etapach. W pierwszym opracowano model matematyczny siły oporów tłumiących, a w drugim wyznaczono współczynnik masy towarzyszącej. Proces kreowania zależności opisujących siłę oporów obejmował następujące czynności:

- opracowanie charakterystyk czasowych prędkości oraz przyśpieszeń pionowych odcinka mostu dla poszczególnych wariantów badawczych;
- wyznaczenie charakterystyk czasowych sił wyporu oraz bezwładności pontonu;
- wyznaczenie wartości sił oporów w funkcji prędkości dla punktów pomiarowych o pomijalnej wartości sił bezwładności masy towarzyszącej;
- wyznaczenie funkcji aproksymującej wartość siły oporów w funkcji prędkości pionowej, stanowiącej model matematyczny siły oporów.

Schemat blokowy procesu wyznaczania matematycznego modelu siły oporów przedstawiono na Rys. 6.2.



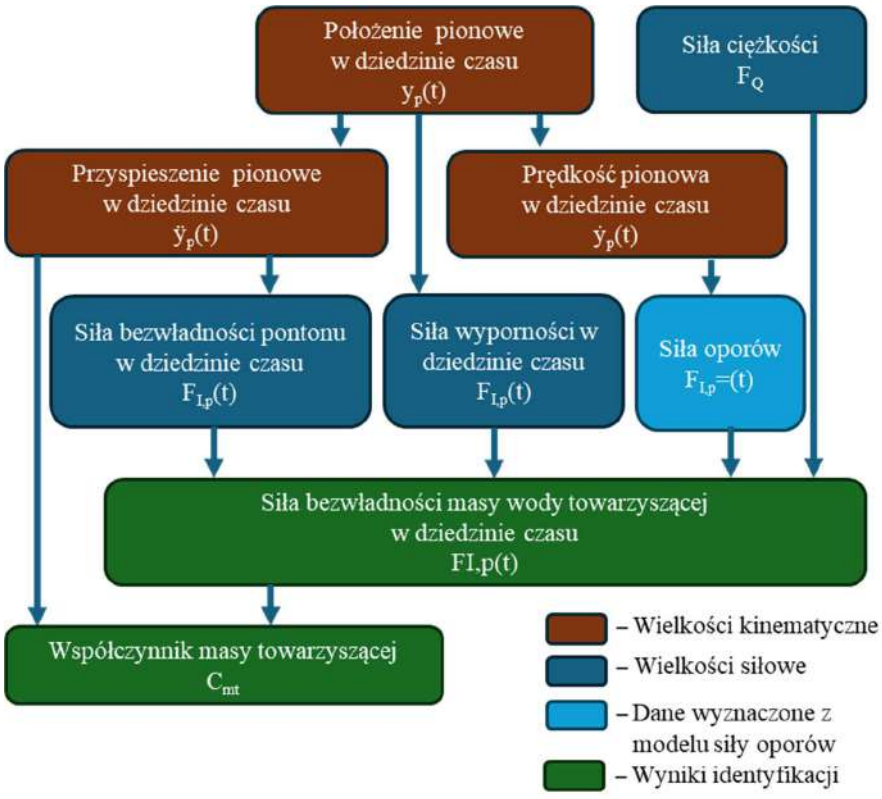
Rys. 6.2. Schemat procesu identyfikacji modelu matematycznego siły oporów tłumiących

Kluczowym wyzwaniem w zakresie procesu identyfikacji powyższego modelu (Rys. 6.2) jest wyznaczenie takich punktów pomiarowych, dla których siły bezwładności masy towarzyszącej są pomijalne ($F_{I,mt} \rightarrow 0$) na etapie, gdy nie została jeszcze wyznaczona wartość masy towarzyszącej. Z tego względu zastosowano podejście iteracyjne. Masę towarzyszącą w pierwszym kroku oszacowano na podstawie zależności zaczerpniętych z dostępnej literatury, natomiast ostateczne modele oddziaływań hydrodynamicznych wyznaczano w kolejnych iteracjach, aż do momentu, w którym dalsze powtórzenia nie prowadziły do istotnych zmian wyników.

Wyznaczenie modelu sił oporów umożliwiło przeprowadzenie procesu wyznaczania współczynnika masy towarzyszącej, obejmującego rozbudowanie procesu wyznaczania sił oporów o następujące czynności:

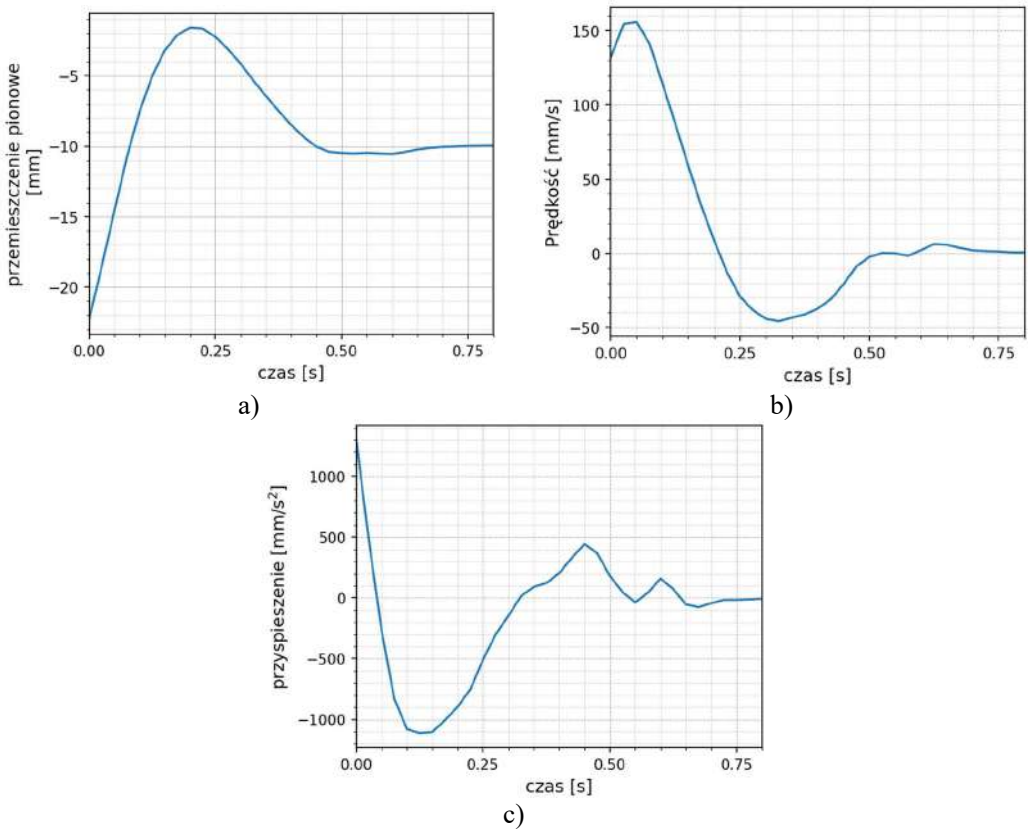
- wyznaczenie charakterystyk czasowych sił oporów (na podstawie opracowanego modelu matematycznego siły oporów);
- wyznaczenie wartości sił bezwładności masy towarzyszącej;
- wyznaczenie masy towarzyszącej i współczynnika masy towarzyszącej.

Schemat blokowy procesu wyznaczania współczynnika masy towarzyszącej przedstawiono na Rys. 6.3.



Rys. 6.3. Schemat procesu identyfikacji masy wody towarzyszącej

Prędkość i przyspieszenie pionowe odcinka mostu określono, obliczając odpowiednio pierwszą i drugą pochodną czasową przemieszczeń. Przykładowe charakterystyki czasowe wyznaczonych parametrów przedstawiono na Rys. 6.4.



Rys. 6.4. Przykładowe charakterystyki czasowe nurzania swobodnego modelu odcinka mostu obciążonego masą 1,9 kg i zanurzeniu początkowym -22,3 mm: a) przemieszczenia; b) prędkości; c) przyśpieszenia

Przeprowadzona procedura identyfikacyjna miała na celu określenie charakterystyk i parametrów hydrodynamicznych pozwalających na wyznaczenie sił oddziałujących na pojedynczy blok pontonowy. W związku z tym wykonano analizę obciążeń odnoszących się do tego elementu. Zgodnie z warunkiem równowagi dynamicznej, suma sił działających na blok pontonowy w kierunku pionowym F_y musi być równa zeru:

$$F_y = F_B + F_Q + F_{Ip} + F_D + F_{Imt} = 0 \tag{6.19}$$

gdzie:

F_B - siła wyporu;

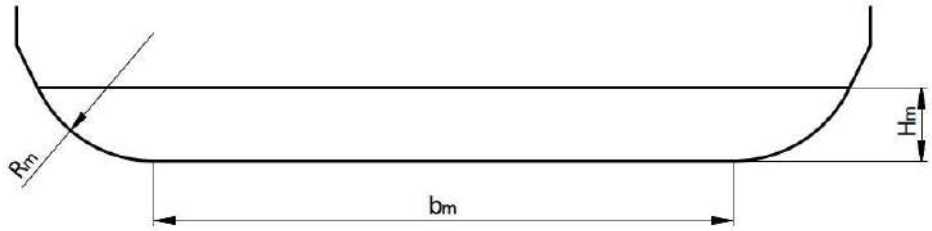
F_Q - siła ciężkości;

F_{Ip} - siła bezwładności konstrukcji;

F_D - siła oporów tłumiących;

F_{Imt} - siła bezwładności masy wody towarzyszącej.

Na podstawie charakterystyk czasowych nurzania (Rys. 6.4a) możliwe jest wyznaczenie wartości sił, wynikających z zależności fizycznych: wyporu, bezwładności pontonu i ciężkości. Siła wyporu jest równa ciężarowi cieczy wypartej przez zanurzoną część kadłuba. Przekrój kadłuba pojedynczego bloku pontonowego, wykorzystany w obliczeniach siły wyporu przedstawiono na Rys. 6.5.



Rys. 6.5. Zarys przekroju wzdłużnego bloku pontonowego z wymiarami wykorzystanymi do wyznaczenia siły wyporu

Dla przedstawionego powyżej przekroju bloku wartość siły wyporu F_B oddziałującej na jeden blok pontonowy w czasie zanurzenia o wartości y_{p}, nieprzekraczającej wysokości modelu bloku pontonowego H_m, wyznaczono z zależności:

$$F_{\mathrm{B}} = \left(\frac{{R_{\mathrm{m}}}^2}{2}\left(\cos^{-1}\left(\frac{R_{\mathrm{m}} + y_{\mathrm{p-w}}}{R_{\mathrm{m}}}\right) - \sin\left(\cos^{-1}\left(\frac{R_{\mathrm{m}} + y_{\mathrm{p-w}}}{R_{\mathrm{m}}}\right)\right)\right) + b y_{\mathrm{p-w}}\right) l_{\mathrm{m}} g \rho \; [N] \tag{6.20}$$

gdzie:

R_{m} – promień krzywizny dna modelu bloku pontonowego (0,052 m) (Rys. 6.5);

b_{m} – szerokość dna modelu bloku pontonowego (0,236 m) (Rys. 6.5);

$y_{\mathrm{p-w}}$ – przemieszczenie pionowe pontonu względem wody (zanurzenie) [m];

g – przyspieszenie ziemskie (9,81 m/s^2);

ρ – gęstość wody (998,2 kg/m^3);

l_{m}– długość modelu bloku pontonowego (0,276 m).

Siła bezwładności modelu bloku pontonowego F_{Ip} i masy obciążeniowej, obliczana jest zgodnie z zależnością:

$$F_{\mathrm{Ip}} = m_{\mathrm{m}} \ddot{y}_{\mathrm{p-w}} \tag{6.21}$$

gdzie:

m_{m} – masa modelu pontonów i obciążenia $[kg]$;

$\ddot{y}_{\mathrm{p-w}}$ – przyśpieszenia pionowe względem wody $[\frac{m}{s^2}]$.

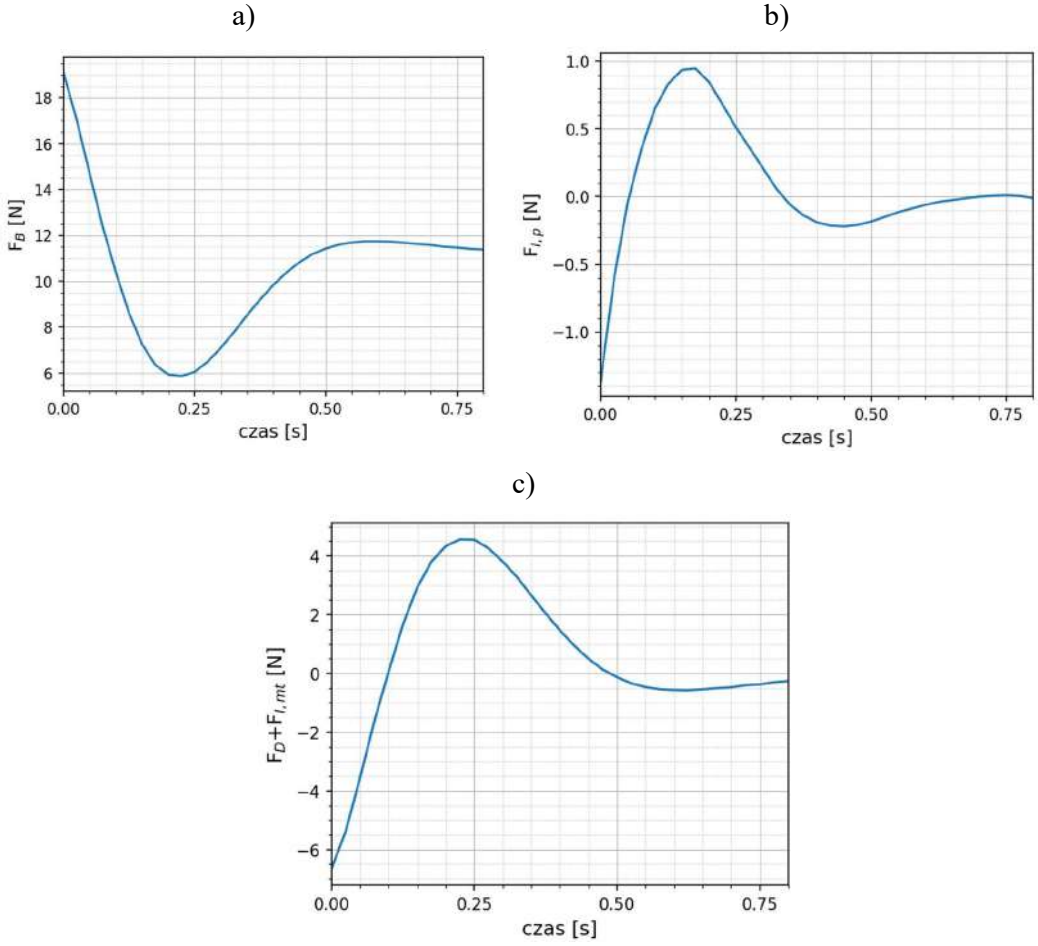
Wartość siły ciężkości oddziałującej na blok pontonowy opisuje zależność:

$$F_{\mathrm{Q}} = m_{\mathrm{m}} g \tag{6.22}$$

Przekształcając wzór (6.19) poprzez przeniesienie wyznaczonych wartości na prawą stronę, uzyskano:

$$F_{\mathrm{D}} + F_{\mathrm{Imt}} = -(F_{\mathrm{B}} + F_{\mathrm{Q}} + F_{\mathrm{Ip}}) \tag{6.23}$$

Na podstawie równań (6.21) i (6.22) wyznaczono przebiegi czasowe siły wyporu oraz siły bezwładności pontonów (Rys. 6.6a i Rys. 6.6b). Następnie, wykorzystując otrzymane charakterystyki i zależność (6.23), obliczono przebiegi czasowe sumy siły oporów oraz siły bezwładności masy wody towarzyszącej (Rys. 6.6c).



Rys. 6.6. Przykładowe charakterystyki czasowe sił oddziałujących na badany model odcinka mostu w czasie nurzania modelu odcinka mostu obciążonego masą 1,9 kg i zanurzeniu początkowym -22,3 mm: a) siła wyporu; b) siła bezwładności bloku pontonowego; c) suma sił oporów i bezwładności masy wody towarzyszącej

Uzyskane wyniki obliczeń wskazują na punkty pomiarowe, w których wartość przyspieszeń pontonu względem wody $\ddot{y}_{\mathrm{p-w}}$ jest bliska zeru. Wartość siły bezwładności masy wody towarzyszącej F_{Imt} jest proporcjonalna do $\ddot{y}_{\mathrm{p-w}}$, zgodnie z zależnością:

$$F_{\mathrm{Imt}} = m_{\mathrm{mt}} \cdot \ddot{y}_{\mathrm{p-w}} \tag{6.24}$$

W związku z powyższym:

$$\ddot{y}_{\mathrm{p-w}} \approx 0 \;\Rightarrow F_{\mathrm{Imt}} \approx 0 \tag{6.25}$$

W punktach pomiarowych, w których siła F_{Imt} jest bliska zeru, możliwe jest wyznaczenie wartości siły oporów tłumiących F_D poprzez przekształcenie równania (6.19):

$$F_{\mathrm{Imt}} \approx 0 \;\Rightarrow\; F_{\mathrm{D}} \approx -(F_{\mathrm{B}} + F_{\mathrm{Q}} + F_{\mathrm{Ip}}) \tag{6.26}$$

Przeprowadzenie filtrowanie uzyskanych wyników umożliwiło wyznaczenie punktów pomiarowych spełniające warunek zapisany zależnością (6.25). Przyjęto kryterium, zgodnie z którym siła bezwładności masy wody towarzyszącej nie może przekraczać 10% całości sił hydrodynamicznych [..]:

$$0{,}1 \cdot \left|F_{\mathrm{B}} + F_{\mathrm{Q}} + F_{\mathrm{Ip}}\right| > |F_{\mathrm{Imt}}| \tag{6.27}$$

Wyznaczenie wartości F_{Imt} w procesie filtracji danych wymagało, zgodnie z zależnością (6.24), założenia wartości masy wody towarzyszącej. W tym celu zastosowano metodę iteracyjną. W pierwszym kroku przyjęto wartość masy towarzyszącej zaczerpniętą z dostępnej literatury, co umożliwiło przeprowadzenie wstępnej filtracji danych. Następnie zrealizowano pełną procedurę wyznaczania siły oporu oraz masy wody towarzyszącej, co pozwoliło na weryfikację i korektę przyjętej wartości m_{mt}. Proces ten powtarzano do momentu, w którym kolejne iteracje nie powodowały istotnych zmian w wyznaczanej wartości masy towarzyszącej. Ostatecznie do procesu filtrowania przyjęto wartość:

$$m_{\mathrm{mt}} = 5{,}62\ \mathrm{kg} \tag{6.28}$$

Na podstawie odfiltrowanych wyników obliczeń wyznaczono wartości siły oporów tłumiących F_D. Siła ta stanowi sumę dwóch składowych: lepkościowej, zależnej od liczby Reynoldsa, oraz falotwórczej – związanej z generowaniem fal przez poruszające się ciało i zależnej od liczby Froude'a. Analogicznie bezwymiarowy współczynnik oporu można przedstawić jako sumę składowej lepkościowej C_{VD} oraz falotwórczej C_{RD}.

Jednocześnie stosunek oporów lepkościowych do oporów falotwórczych pozostaje stały dla danej wartości liczby Keulegana–Carpentera (KC). Liczba KC charakteryzuje stosunek amplitudy nurzania do wymiaru charakterystycznego obiektu i można ją wyznaczyć z zależności [52]:

$$KC = \frac{2\pi z_0}{d_p} \tag{6.29}$$

gdzie:

z_0 – amplituda nurzania [m];

d_p – szerokość obiektu – bloku pontonowego [m].

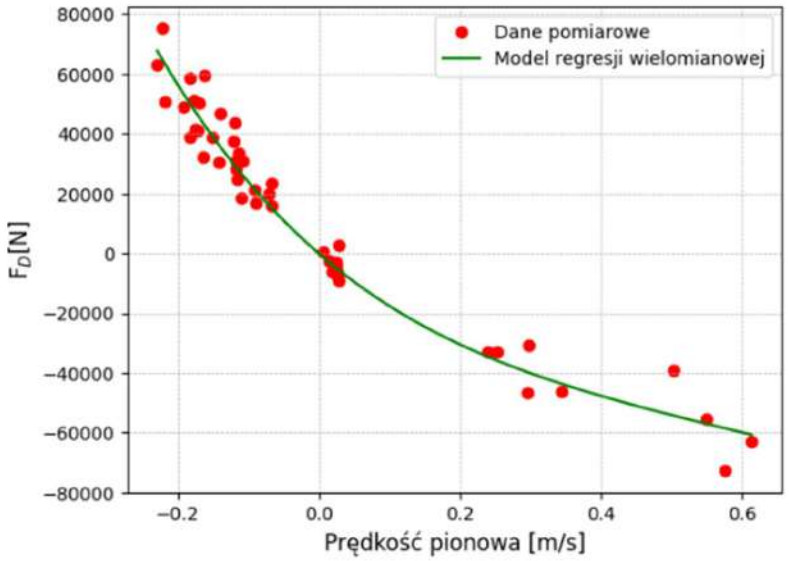
W Tabela 6.1 przedstawiono zaczerpnięte z literatury [52] wartości składowych współczynnika oporów (C_{VD} i C_{RD}) oraz wzajemny ich stosunek, w zależności od wartości liczby KC.

Tabela 6.1. Współczynniki oporów dla obiektu półsferycznego, dla różnych wartości liczby Keulegana-Carpentera (KC) [52]

KC	Współczynnik oporów		C_{VD}/ C_{RD}
	Składowa lepkościowa C_{VD}	Składowa falotwórcza C_{RD}	
0,63	0,031	2,14	0,0142
1,26	0,061	1,07	0,0572

Na podstawie zestawienia zamieszczonego w Tabela 6.1 można zauważyć, że wraz ze wzrostem współczynnika KC maleje stosunek oporów lepkościowych do oporów falotwórczych. Wartości współczynnika KC, wyznaczone dla badanego obiektu na podstawie zależności (7.30), zawierają się w przedziale 0,02–0,07. Odpowiada to mniej niż 9% wartości literaturowych współczynnika, dla których opory lepkościowe są pomijalnie małe w porównaniu z oporami radiacyjnymi. W związku z tym przyjęto, że w przypadku badanego obiektu wartości współczynnika oporu wynikają przede wszystkim z oporów falotwórczych, a ich wielkość jest powiązana z liczbą Froude'a.

Uzyskane wartości sił oraz prędkości nurzania przeskalowano zgodnie ze skalami wyznaczonymi dla modelu, umożliwiającymi zachowanie przyjętego kryterium podobieństwa. Następnie sporządzono wykres sił oporu w funkcji prędkości nurzania dla obiektu rzeczywistego oraz wyznaczono jego aproksymatę w postaci wielomianu czwartego stopnia (Rys. 6.7). Dopasowanie przeprowadzono metodą najmniejszych kwadratów. Uzyskane dopasowanie stanowi model matematyczny umożliwiający wyznaczenie wartości siły oporów na podstawie prędkości nurzania bloku pontonowego.



Rys. 6.7. Wykres wartości sił oporów w funkcji prędkości nurzania oddziałujących na obiekt rzeczywisty wraz z aproksymatą w formie wielomianu czwartego stopnia

Matematyczny opis siły oporu dany jest równaniem:

$$F_{\mathrm{D}} = -204653{,}6\,\dot{y}_{p-w} + 321115{,}44\dot{y}_{p-w}{}^{2} - 317362{,}6006\,\dot{y}_{p-w}{}^{3} + \\ +122401{,}61325\dot{y}_{p-w}{}^{4}\ [N] \tag{6.30}$$

Obliczono także parametry charakteryzujące stopień dopasowania modelu do danych pomiarowych. Uzyskane wartości przedstawiono w Tabela 6.2.

Tabela 6.2.Parametry jakości dopasowania aproksymacji wielomianowej

Parametr	Wartość bezwzględna	Wartość względem maksimum [%]
Współczynnik determinacji R^2	0,97	-
Różnica maksymalna	16687,9 N	21
RMSE	6763 N	8

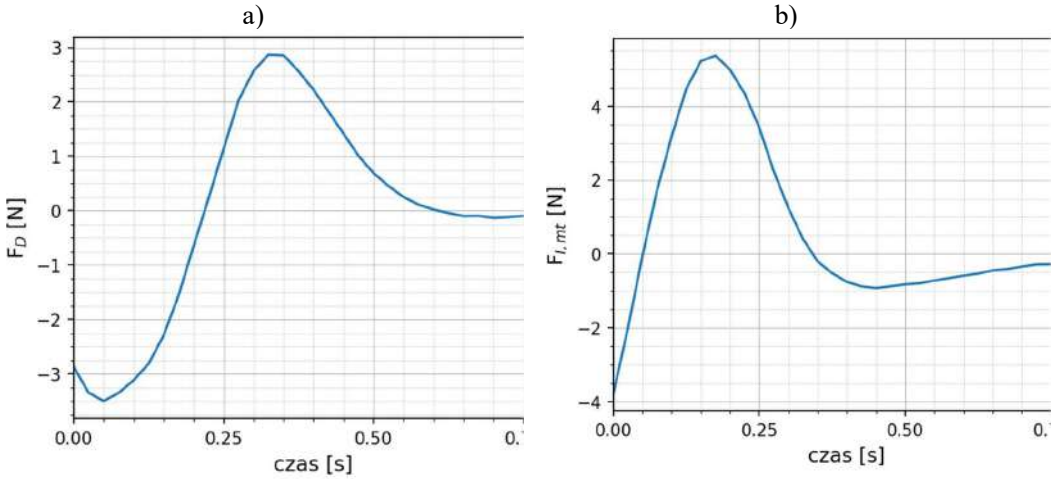
Należy zauważyć, że stosowane najczęściej w dostępnej literaturze podejście do prezentacji wyników obliczeń wartości współczynnika oporu polega na prezentacji bezwymiarowego współczynnika oporu, jako funkcji liczb bezwymiarowych [53], [54]. Jednak przy takim podejściu współczynnik oporu dążyłby do nieskończoności dla małych wartości prędkości nurzania bloku pontonowego. Może to prowadzić do występowania dużego zakresu niepewności wartości oporów dla znaczącej liczby kroków obliczeń modelu, dla których wartość prędkości będzie bliska zeru. Ponadto uzyskane siły oporów były asymetryczne względem prędkości (przyjmowały różne wartości w zależności od kierunku poruszania się bloku pontonowego w górę i w dół). Zastosowanie odwzorowania sił oporów w funkcji prędkości umożliwiło opracowanie dokładniejszego modelu matematycznego oraz uproszczenie docelowego modelu numerycznego.

Na podstawie uzyskanej charakterystyki współczynnika oporów określono wartości siły oporów hydrodynamicznych dla każdego punktu pomiarowego przebiegów sił nurzania odcinka mostu, a przykładowy przebieg zmian tej siły przedstawiono na Rys. 6.8a.

Równanie równowagi dynamicznej (6.19) zostało przekształcone do postaci:

$$F_{\mathrm{Imt}} = -(F_{\mathrm{B}} + F_{\mathrm{Q}} + F_{\mathrm{Ip}} + F_{\mathrm{D}}) \tag{6.31}$$

Na podstawie równania (6.31) możliwe było wyznaczenie przebiegów czasowych siły bezwładności masy towarzyszącej (Rys. 6.8b).



Rys. 6.8. Przykładowe charakterystyki czasowe siły działających na model odcinka mostu obciążonego masą 1,9 kg, będące odpowiedzią na wymuszenie w postaci zanurzenia początkowego $y_{p-w}(t = 0) = -22{,}3$ mm: a) siła oporów hydrodynamicznych; b) siła bezwładności masy wody towarzyszącej

Wartość masy wody towarzyszącej m_{mt} wyznaczono na podstawie jej siły bezwładności z zależności:

$$m_{\mathrm{mt}} = \frac{F_{\mathrm{Imt}}}{\ddot{y}_{p-w}} \tag{6.32}$$

Wyznaczone wartości masy wody mogą być obarczone znaczącym błędem, w przypadku, gdy wartość przyspieszenia jest bliska wartości niepewności pomiarowej przyspieszenia ($\ddot{y} \approx \Delta\ddot{y}$). W związku z tym przeprowadzono analizę, pozwalającą odfiltrować punkty pomiarowe o wysokiej niepewności. W tym celu wyznaczono niepewności wyznaczenia [55]:

– przemieszczenia pionowego bloku pontonowego, przyjętej na podstawie specyfikacji urządzenia pomiarowego:

$$\Delta y_{\mathrm{p-w}} = 0{,}1\ mm, \tag{6.33}$$

– prędkości pionowej bloku pontonowego:

$$\Delta\dot{y}_{\mathrm{p-w}} = \frac{\Delta y_{\mathrm{p-w}}}{\Delta t} \cdot \sqrt{2}, \tag{6.34}$$

gdzie: Δt – krok czasowy pomiaru,

– przyśpieszenia pionowego bloku pontonowego:

$$\Delta\ddot{y}_{\mathrm{p-w}} = \frac{\Delta\dot{y}_{\mathrm{p-w}}}{\Delta t} \cdot \sqrt{2} \tag{6.35}$$

– sił wyporu:

$$\Delta F_{\mathrm{B}} = \left|\frac{\delta F_B}{\delta y_{\mathrm{p-w}}}\right| \cdot \Delta y_{\mathrm{p-w}} \tag{6.36}$$

– sił bezwładności pontonu i obciążenia masowego:

$$\Delta F_{\mathrm{Ip}} = \left|\frac{\delta F_{I,p}}{\delta\ddot{y}_{\mathrm{p-w}}}\right| \cdot \Delta\ddot{y}_{\mathrm{p-w}} = m_{\mathrm{m}} \cdot \Delta\ddot{y}_{\mathrm{p-w}} \tag{6.37}$$

– sumy sił hydrodynamicznych:

$$\Delta(F_{\mathrm{Imt}} + F_{\mathrm{D}}) = \Delta F_{\mathrm{Ip}} + \Delta F_{\mathrm{B}} \tag{6.38}$$

– masy wody towarzyszącej:

$$\Delta m_{\mathrm{mt}} = \frac{F_{\mathrm{Imt}} + F_{\mathrm{D}}}{\ddot{y}_{\mathrm{p-w}}^{\,2}} \Delta\ddot{y}_{\mathrm{p-w}} + \frac{\Delta(F_{\mathrm{Imt}} + F_{\mathrm{D}})}{\ddot{y}_{\mathrm{p-w}}} \tag{6.39}$$

Przeprowadzono filtrację danych, odrzucając pomiary obarczone znacznym błędem wyznaczenia masy wody towarzyszącej, zgodnie z kryterium:

$$\Delta m_{\mathrm{mt}} < 0{,}05 \cdot m_{\mathrm{mt}} \tag{6.40}$$

W celu odwzorowania zjawiska dla obiektu rzeczywistego należy wyznaczyć wartość bezwymiarowego współczynnika masy towarzyszącej c_{mt}. Jest on definiowany jako masa wody towarzyszącej odniesiona do masy cieczy wypartej przez obiekt [37], zgodnie z zależnością:

$$c_{\mathrm{mt}} = \frac{m_{\mathrm{mt}}}{m_{\mathrm{B}}} \tag{6.41}$$

gdzie:

m_{mt} – masa wody towarzyszącej;

m_{B} – masa wypartej cieczy.

W przypadku intensywnego nurzania, masa wypartej cieczy ulega znacznym zmianom w czasie pracy mostu. W związku z tym dokonano sprawdzenia, czy

wyznaczone wartości masy towarzyszącej wykazują korelację z wartością zanurzenia wynikającą z masy obciążników lub z zanurzeniem chwilowym. Wyznaczone wartości spółczynnika korelacji zmian masy wody towarzyszącej od obu parametrów przedstawiono w Tabela 6.3.

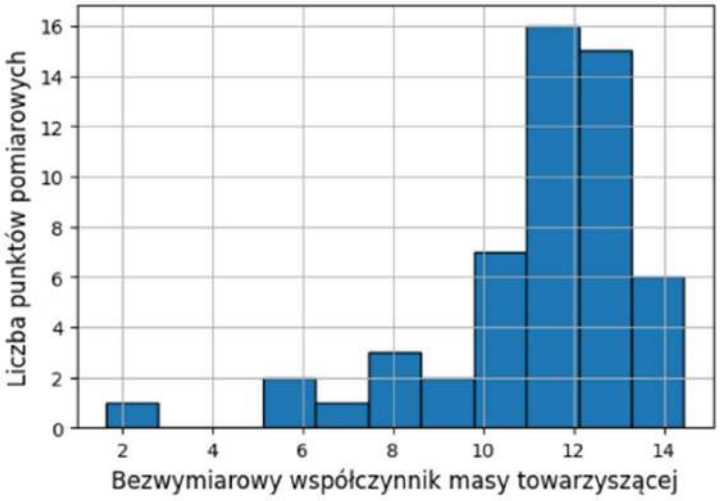
Tabela 6.3. Wartości współczynnika korelacji masy towarzyszącej oraz zanurzenia wynikającego z masy obciążników i chwilowego

Parametr	Współczynnik korelacji R
zanurzenie wynikające z masy obciążników	-0,0042
zanurzenie chwilowe	-0,0067

Na podstawie uzyskanych wartości współczynnika korelacji stwierdzono, że w analizowanym zakresie ruchów mostu masa wody towarzyszącej nie wykazuje powiązania ani z masą wyporu wynikającą z zanurzenia od obciążeń, ani z zanurzeniem chwilowym. W związku z tym przyjęto, że najdokładniejsze wyznaczenie masy towarzyszącej można uzyskać poprzez określenie bezwymiarowego współczynnika masy towarzyszącej, w odniesieniu do stałej masy wody wypartej przez nieobciążony blok pontonowy, wynoszącej:

$$m_{\mathrm{B}} = 8262{,}25\ \mathrm{kg} \tag{6.42}$$

Uzyskane wartości bezwymiarowego współczynnika masy towarzyszącej przedstawiono w formie histogramu na Rys. 6.9.



Rys. 6.9. Histogram wartości bezwymiarowego współczynnika masy towarzyszącej

Rozkład wartości parametru m_{MT} został poddany ocenie pod kątem zgodności z rozkładem normalnym przy użyciu testu Shapiro–Wilka. Otrzymano wartość statystyki $W = 0{,}862$ oraz poziom istotności $p = 0{,}00001$. Ponieważ uzyskano $p < 0{,}05$, hipoteza zerowa o normalności rozkładu została odrzucona. Oznacza to, że rozpatrywane dane nie spełniają założenia normalności rozkładu. W związku z tym, jako

reprezentatywną miarę wartości bezwymiarowego współczynnika masy towarzyszącej c_{mt} przyjęto medianę, której wartość wyniosła:

$$c_{\mathrm{mt}} = 11{,}4 \tag{6.43}$$

Opisane w niniejszym rozdziale wyniki badań umożliwiły opracowanie modeli matematycznych sił oporów tłumiących oraz masy wody towarzyszącej. Otrzymane zależności mają postać zapewniającą ich bezpośrednią implementację w modelu numerycznym, w skali obiektu rzeczywistego. Wszystkie wyniki prezentowane w dalszej części pracy przedstawiane będą w przeliczeniu na skalę obiektu rzeczywistego.

6.3. Badania identyfikacyjne charakterystyki ugięcia mostu i fali czołowej

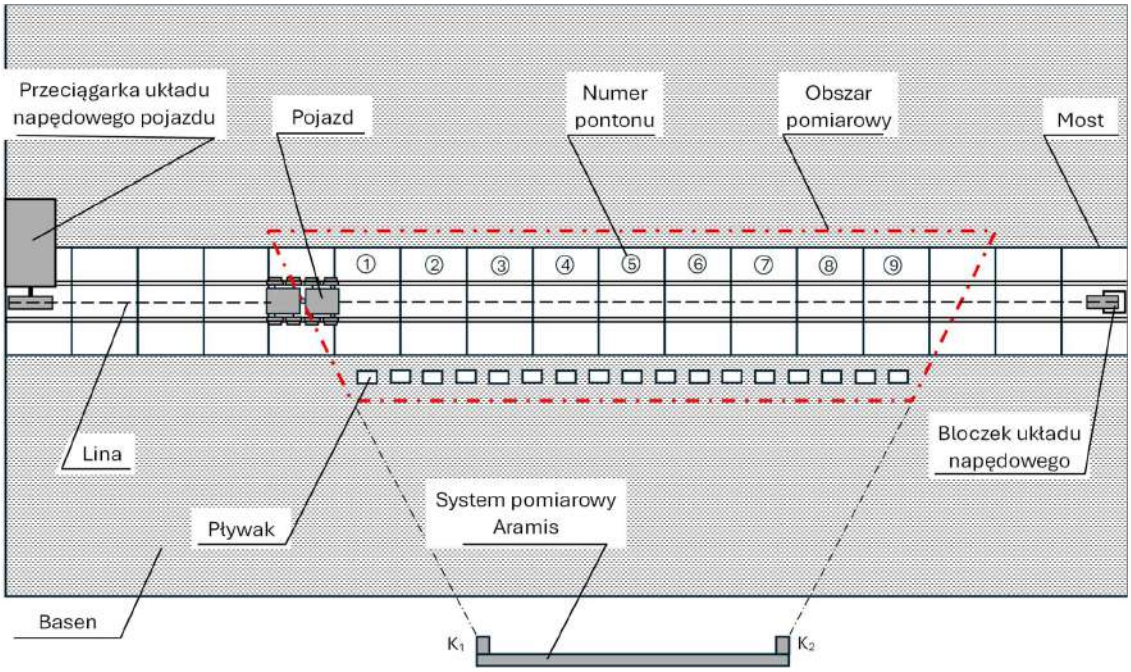
Na potrzeby badań ugięcia mostu i falowania wody zaprojektowano oraz wykonano stanowisko badawcze umożliwiające modelowanie procesu przeprawiania pojazdu po moście pontonowym. Projektując stanowisko pomiarowe założono, że będzie ono odzwierciedlać warunki przeprawy na przeszkodzie wodnej:

- bez nurtu,
- o szerokości 100 m,
- głębokości powyżej 4 m, co pozwala pominąć potencjalne oddziaływanie dna na zjawisko fali czołowej,
- o długości i kształcie brzegu niemających wpływu na zjawisko fali czołowej.

Na potrzeby realizacji badań przyjęto, że stanowisko ma odzwierciedlać warunki, w których:

- pojazd nie zbacza z osi mostu (ruch prostoliniowy);
- pojazd na odcinku pomiarowym porusza się ze stała prędkością;
- rozstawy kół i osi pojazdu, w zestawieniu z jego masą, odpowiadają obciążeniom generowanym przez klasy MLC 30 i MLC60.

Schemat stanowiska przedstawiono na Rys. 6.10



Rys. 6.10. Schemat stanowiska pomiarowego

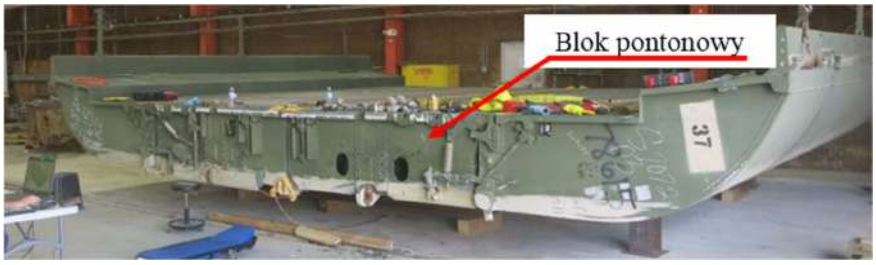
Zastosowano basen pomiarowy, którego konstrukcja (Rys. 6.11) składała się z aluminiowej ramy pełniącej funkcję nośnego stelaża oraz zamocowanej do niej zgrzewanej plandeki, tworzącej nieckę basenu.



Rys. 6.11. Widok konstrukcji basenu badawczego

Zastosowany basen cechuje się wymiarami *b x l* wynoszącymi: 4,8 m x 4 m i głębokości *g* = 0,4 m. Wymiar *b* odpowiada, w skali, szerokości modelowanej przeszkody wodnej, a wartość *l* odpowiada takiej długości basenu, która zapewnia brak wpływu odbicia fali na zachowanie mostu. Wartość ta została ustalona doświadczalnie w taki sposób, aby fala generowana przez most nie docierała do ścianek basenu podczas ruchu pojazdu na odcinku pomiarowym.

Zastosowany model mostu odwzorowuje konstrukcję IRB. Widok pojedynczego bloku pontonowego obiektu rzeczywistego przedstawiono na Rys. 6.12.



Rys. 6.12. Pojedynczy blok pontonowy modelowanego obiektu rzeczywistego [27]

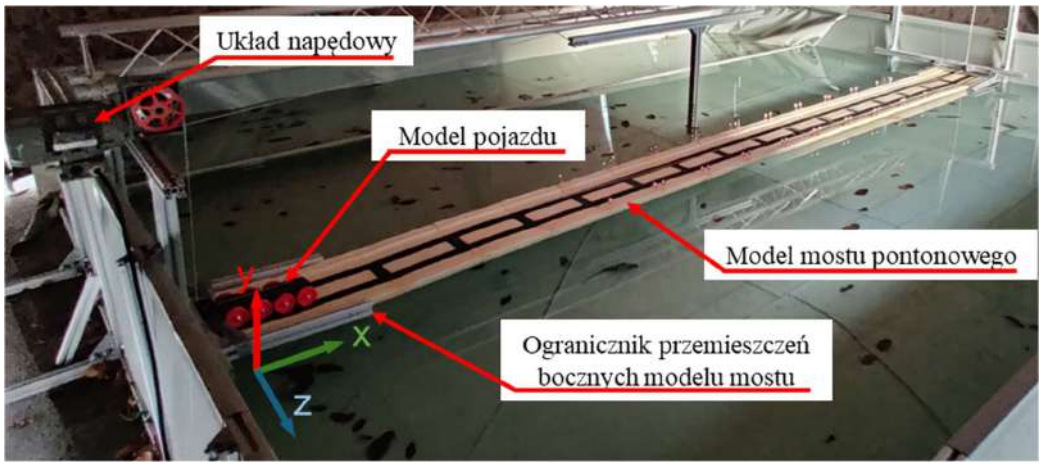
Korpusy modeli bloków pontonowych zostały wykonane metodą odlewania z pianki poliuretanowej (PUR) o gęstości 150 g/m³ (Rys. 6.13a). Model mostu wykonano z zachowaniem przyjętych skal: geometrycznej i masowej. Analogicznie jak w moście IRB, przeguby łączące pontony umieszczonoę w ich pasie dolnym (Rys. 6.13b). Łączenie kolejnych bloków pontonowych zostało tak wykonane, aby umożliwić ich swobodny obrót w kierunku dolnym i ograniczony obrotu w kierunku górnym. Odzwierciedlenie sztywności konstrukcji nośnej, decydującej o ugięciu mostu pod wpływem ciężaru przeprawianego pojazdu, zapewniono poprzez wprowadzenie konkretnego luzu kątowego w przegubach łączących poszczególne pontony wynoszącego α_g=2,3° ± 0,2°. Jego wartość zapewnia zbliżoną postać ugięcia mostu do tej, która wynika z odkształceń jego konstrukcji nośnej. Na górnej powierzchni modeli bloków pontonowych umieszczone zostały szyny prowadzące, po których porusza się badany pojazd (Rys. 6.13b). Szyny prowadzące zapewniają utrzymywanie przemieszczającego się pojazdu w osi mostu.



Rys. 6.13. Model mostu pontonowego: a) odlew korpusu modelu, b) model mostu z oznaczonymi przegubami łączącymi kolejne bloki pontonowe

Podczas badań wprowadzono ograniczenie możliwości przemieszczania się modelu mostu w kierunku osi *z* poprzez zastosowanie odpowiednich ograniczników blokujących przemieszczenia boczne oraz podparcia utrzymujące początek i koniec mostu na powierzchni wody. Utwierdzenie wzdłuż osi x mostu umożliwia swobodne zmiany

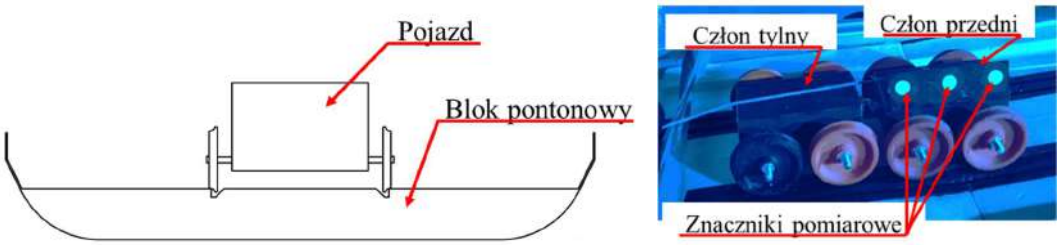
długości mostu wywołane zmianami jego nurzania, co odwzorowuje rzeczywiste warunki kotwiczenia mostów pontonowych. Basen pomiarowy z modelem mostu przedstawiono na Rys. 6.14.



Rys. 6.14. Basen pomiarowy wraz z modelami mostu i pojazdu, z naniesionymi osiami układu współrzędnych

Most badano w warunkach obciążeń generowanych przez przemieszczające się po kolejnych blokach pontonowych pojazdy klasy MLC 30 i MLC 60 (Rys. 6.15a), zgodnie z normą STANAG 2021 [24]. Modele pojazdów składają się z dwóch jednakowych, połączonych przegubowo członów (Rys. 6.15b). Oba człony mają po dwie osie jezdne, rozmieszczone symetrycznie względem ich środka ciężkości.

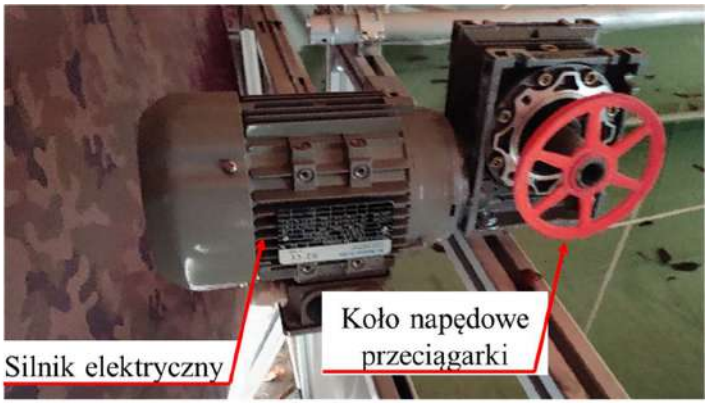
a) b)



Rys. 6.15. Model pojazdu MLC60 na moście: a) rysunek poglądowy od czoła pojazdu, b) widok boczny z zaznaczonymi znacznikami pomiarowymi pojazdu

Rozstaw skrajnych osi jezdnych modeli pojazdów o masie 3,48 kg (dla MLC60) oraz 1,74 kg (dla MLC 30) wynosi 170 mm. Rozpatrywane modele pojazdów odzwierciedlają postać obciążeń dla obiektów rzeczywistych z zachowaniem przyjętej skali geometrycznej.

Ruch modeli po moście wymuszany był za pomocą elektrycznej przeciągarki (Rys. 6.16).

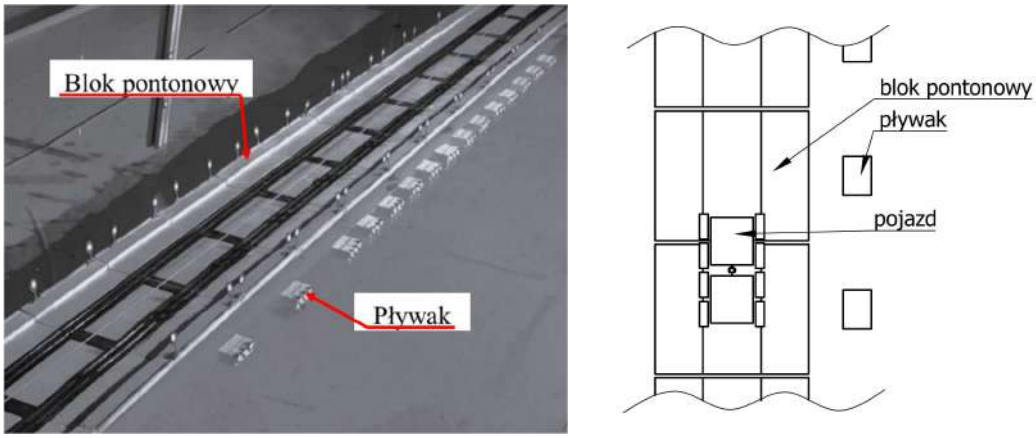


Rys. 6.16. Widok przeciągarki wykorzystywanej do wymuszania ruchu modeli pojazdów

Wykorzystywany układ napędowy pozwala osiągać i utrzymywać zadaną prędkość przemieszczania się modelu pojazdu odpowiadającą prędkości pojazdu rzeczywistego w przedziale 0÷30 km/h. Pomiary wartości prędkości modelu pojazdu na odcinku pomiarowym prowadzono z wykorzystaniem system telemetrycznego. Wyniki tych pomiarów wskazują na niewielkie odchyłki tejże prędkości względem wartości średniej. Po przeskalowaniu wyników do wymiarów obiektu rzeczywistego otrzymano następujące wyniki: 90. percentyl odchyłek wyniósł 0,88 km/h, natomiast ich mediana - 0,36 km/h.

Wzdłuż mostu rozmieszczone zostały pływaki pomiarowe, wykonane z lekkiego materiału spienionego o gęstości równej około 1% gęstości wody. Pływaki zostały unieruchomione w taki sposób, aby nie przemieszczały się w kierunku osi mostu oraz zachowywały odległość 50 mm od jego burty (Rys. 6.17).

a) b)

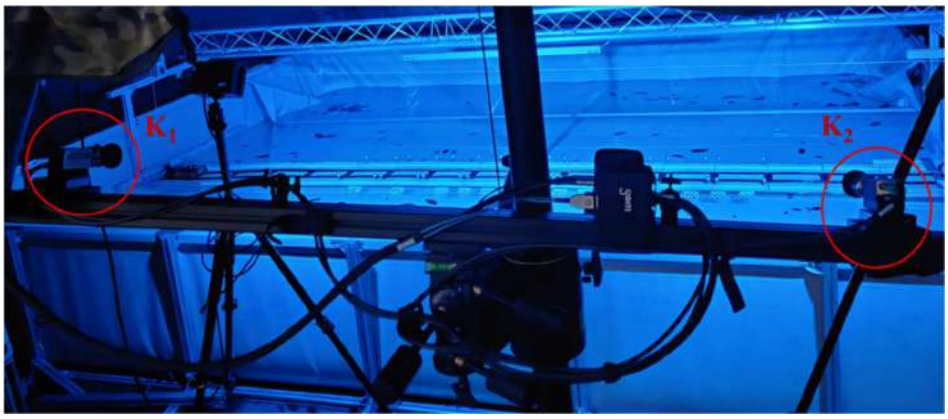


Rys. 6.17. Rozmieszczenie pływaków do pomiaru fal: a) widok modelu, b) schemat rozmieszczenia pływaków

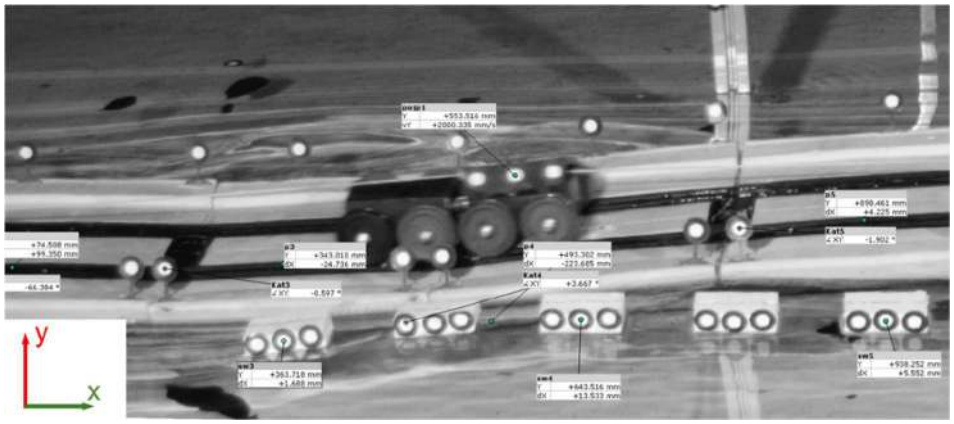
Pomiar położenia pływaków pozwala na pomiar ruchów wody, a w konsekwencji opracowanie i analizę charakterystyki jej falowania.

W trakcie badań rejestrowano zmiany współrzędnych opisujących położenie pojazdu, bloków ponownych oraz pływaków rozmieszczonych na odcinku pomiarowym. Do pomiarów wykorzystano optyczny system pomiarowy ZEISS Aramis (Rys. 6.18).

a)



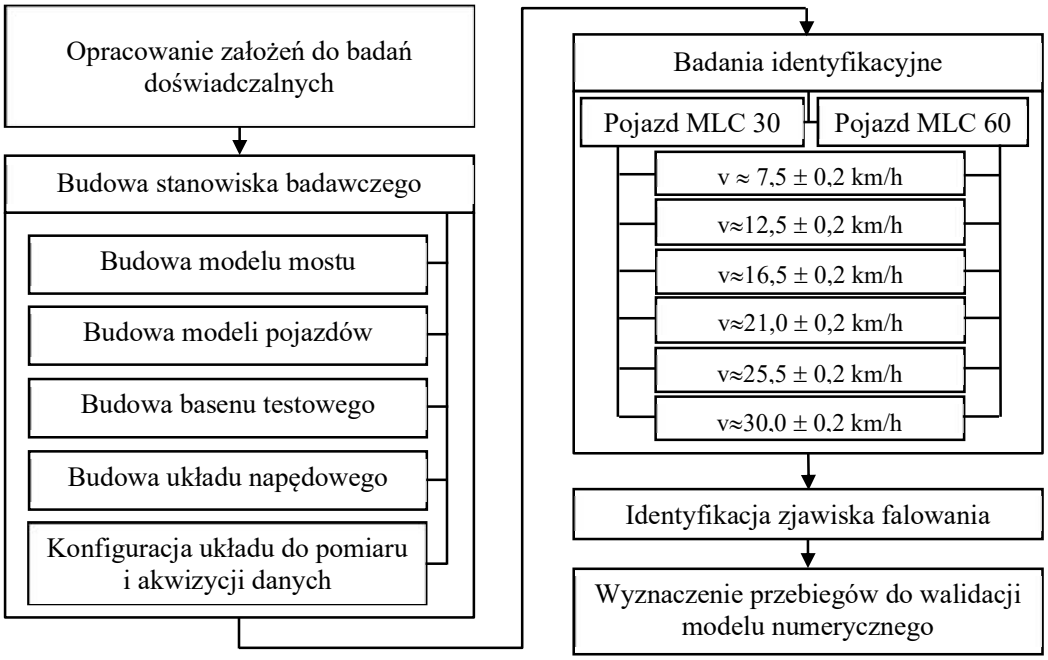
b)



Rys. 6.18. Układ pomiarowy w czasie badań: a) kamery systemu pomiarowego (K_1, K_2), b) widok odczytu mierzonych parametrów

Wartości wszystkich przemieszczeń określane były w tym samym, globalnym układzie współrzędnych 0xy, w którym oś 0x związana była z osią mostu, a oś 0y z kierunkiem pionowym (Rys. 6.18b). Pozwalało to na bezpośrednie określanie relacji występujących pomiędzy współrzędnymi badanych obiektów. Do analizy wykorzystano dane rejestrowane dla obiektów znajdujących się w obszarze pomiarowym (Rys. 6.10: obszar pomiarowy), zapewniającym ustabilizowane parametry ruchu pojazdu oraz brak oddziaływania brzegów na badane zjawiska.

Plan badań identyfikacyjnych charakterystyki ugięcia mostu i fali czołowej przeszkody wodnej przedstawiono na Rys. 6.19.

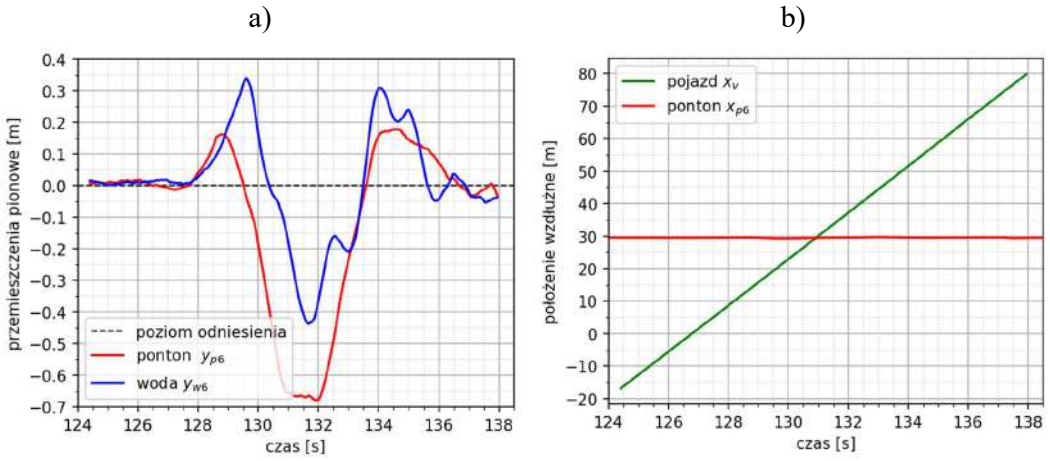


Rys. 6.19. Plan badań identyfikacyjnych charakterystyki ugięcia mostu i fali czołowej przeszkody wodnej

Przeliczone z zachowaniem przyjętego kryterium podobieństwa i skali wyniki pomiarów przedstawiono w postaci wartościach odpowiadających obiektowi rzeczywistemu. W kierunku osi 0y mierzono przemieszczenia względne w odniesieniu do wyników pomiarów wykonanych dla mostu nieobciążonego pojazdem, znajdującego się w stanie równowagi statycznej, przy czym powierzchnia wody była wolna od fal. Przykładowe wyniki tych pomiarów w odniesieniu do:

- bloków pontonowych y_{pi},
- pływaków y_{wi},

przedstawiono na Rys. 6.20a. Pomiary położenia wzdłużnego pontonów, w kierunku osi 0x, prowadzono względem wspólnego, globalnego układu odniesienia, a przykładowe wyniki tych pomiarów przedstawiono na Rys. 6.20b.



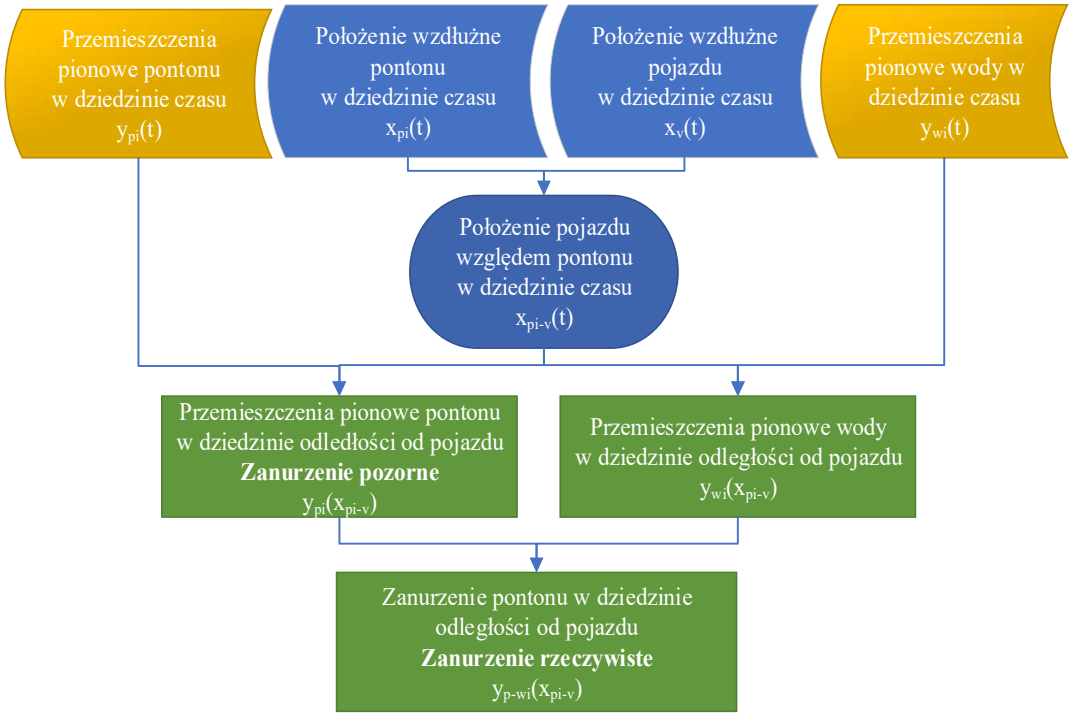
Rys. 6.20. Przykładowe charakterystyki mierzonych przemieszczeń w funkcji czasu, zarejestrowane dla pontonu nr 6 i prędkości pojadu 25 km/h: a) przemieszczenia pionowe wody (y_{wi}) i pontonu (y_{pi}), b) położenie pontonu (x_{pi}) i pojazdu (x_v) w kierunku osi mostu

Na podstawie przebiegów czasowych położenia w kierunku osi 0x bloków pontonowych $x_{\mathrm{p}i}(t)$ oraz pojazdu $x_{\mathrm{v}}(t)$, wyznaczono względne położenie pojazdu względem poszczególnych pontonów $x_{\mathrm{p-v}i}(t)$ z zależności:

$$x_{p-vi}(t) = x_{pi}(t) - x_v(t) \tag{6.44}$$

Przemieszczenia pionowe bloków pontonowych $y_{\mathrm{p}i}(t)$oraz $y_{\mathrm{w}i}(t)$zostały wyrażone w dziedzinie położenia pojazdu względem pontonów $x_{\mathrm{p}i-\mathrm{v}}(t)$ w postaci zależności $y_{\mathrm{p}i}(x_{\mathrm{p}i-\mathrm{v}})$oraz $y_{\mathrm{w}i}(x_{\mathrm{p}i-\mathrm{v}})$. Uzyskane w ten sposób charakterystyki zinterpretowano jako wynikowe zanurzenie bloku pontonowego z pominięciem wpływu fal (tzw. zanurzenie pozorne) - $y_{pi}(x_{\mathrm{p}i-\mathrm{v}})$. Na podstawie wyliczonej różnicy między przemieszczeniami pionowymi pontonów i powierzchni wody wyznaczono skorygowane wartości zanurzenia pontonów, rozumiane jako zanurzenie rzeczywiste - $y_{\mathrm{p-w}i}(x_{\mathrm{p}i-\mathrm{v}})$.

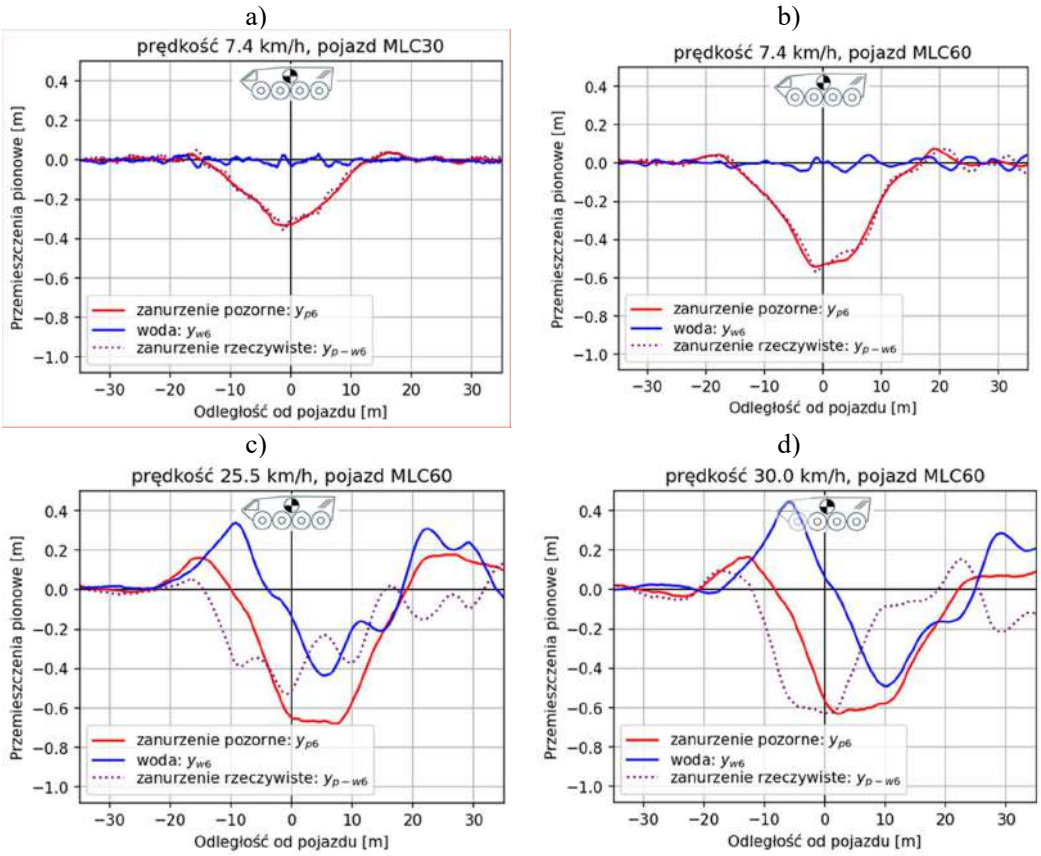
Sposób realizacji tego etapu badań przedstawiono w postaci schematu blokowego na Rys. 6.21.



Rys. 6.21. Schemat blokowy obrazujący sposób przetwarzania wyników pomiarowych z dziedziny czasu do dziedziny odległości względem pojazdu

Przykładowe charakterystyki zanurzenia pozornego i rzeczywistego pontonu nr 6 oraz pionowego przemieszczenia wody, w funkcji ich odległości od pojazdu przedstawiono na Rys. 6.22. Obserwowane na zamieszczonych wykresach wartości ujemne w kierunku osi 0x obrazują ugięcia mostu i zarys fali przed pojazdem, a wartości dodatnie dotyczą tychże wielkości za pojazdem. Współrzędna „0” na osi pionowej 0y odpowiada:

- położeniu niezaburzonego lustra wody dla charakterystyk falowania wody;
- położeniu bloku pontonowego odpowiadającemu położeniu referencyjnemu, dla charakterystyk zanurzenia pozornego;
- położeniu bloku pontonowego, dla którego siły ciężkości są równoważone przez siły wyporu, (położenie woda–ponton takie jak podczas pomiaru referencyjnego) dla charakterystyk zanurzenia rzeczywistego.

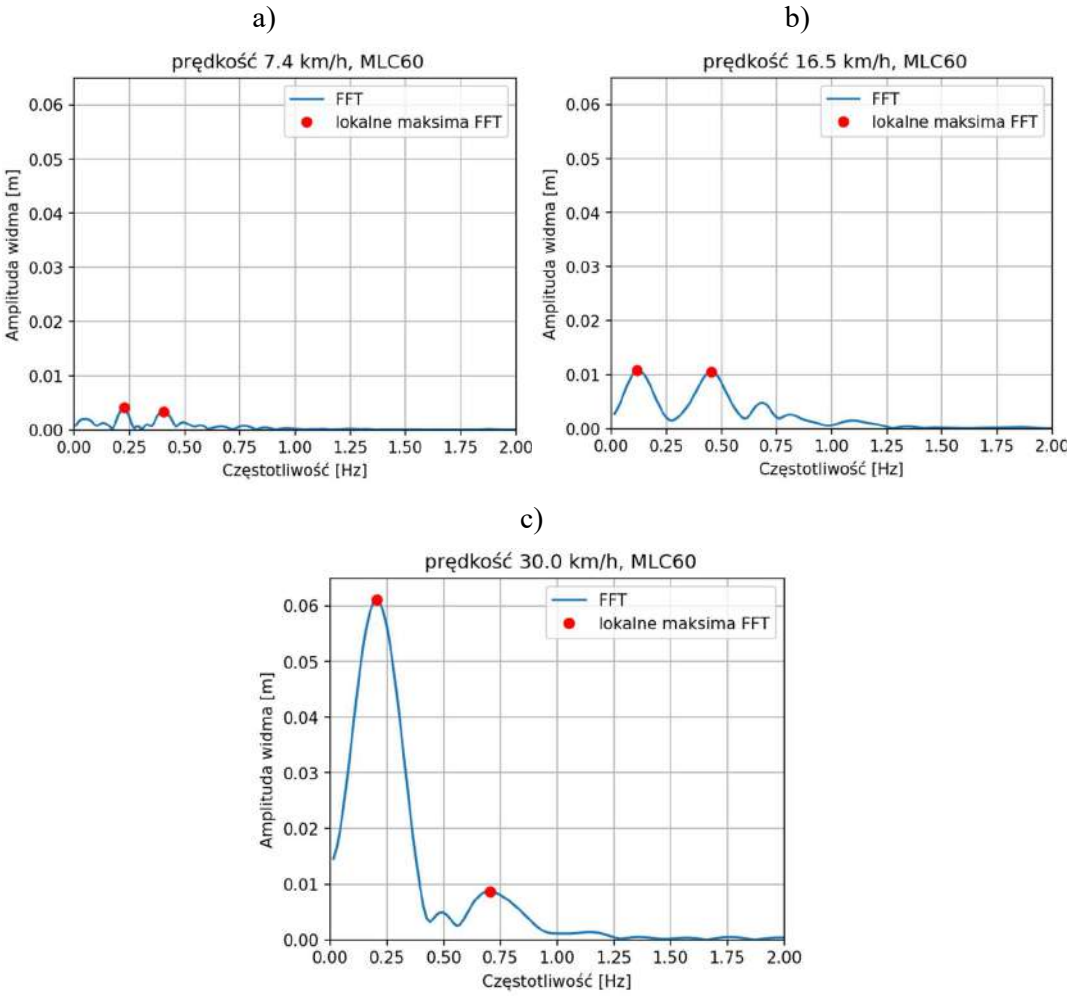


Rys. 6.22. Przykładowe charakterystyki zanurzenia pozornego i rzeczywistego pontonu nr 6 oraz pionowego przemieszczenia wody, w funkcji ich odległości od pojazdu: a) pojazd klasy MLC 30, prędkość 7,4 km/h; b) pojazd klasy MLC 60, prędkość 7,4 km/h; c) pojazd klasy MLC 60, prędkość 25,5 km/h; d) pojazd klasy MLC 60, prędkość 30 km/h (pojazd na wykresie schematycznie wskazuje swoje ustawienie – przód/tył)

Wyniki dotychczasowych badań poddano analizie w celu określenia wpływu falowania wody na maksymalne zanurzenie pontonów. Proces ten podzielono na dwa etapy. W pierwszej kolejności przeprowadzono identyfikację charakterystycznych długości i amplitud występujących fal oraz ich zależność od prędkości i masy pojazdu. Przeanalizowano także zmiany położenia fali czołowej względem pojazdu. W drugim etapie wyznaczono i zestawiono rzeczywiste oraz pozorne przebiegi zanurzenia pontonów mostu. Zaobserwowane różnice wartości wyznaczanych wielkości poddano analizie w funkcji prędkości i masy pojazdu oraz w kontekście wpływu na nie obecności fali czołowej.

Identyfikacji charakterystycznych długości fal wody dokonano poprzez analizę widmową przebiegów falowania wody uzyskanych w trakcie badań z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera (FFT - Fast Fourier Transform). Przykładowe wyniki obliczeń w postaci charakterystyk widmowych przedstawiono w postaci przebiegów zaprezentowano na Rys. 6.23. Analiza uzyskanych charakterystyk pozwala stwierdzić,

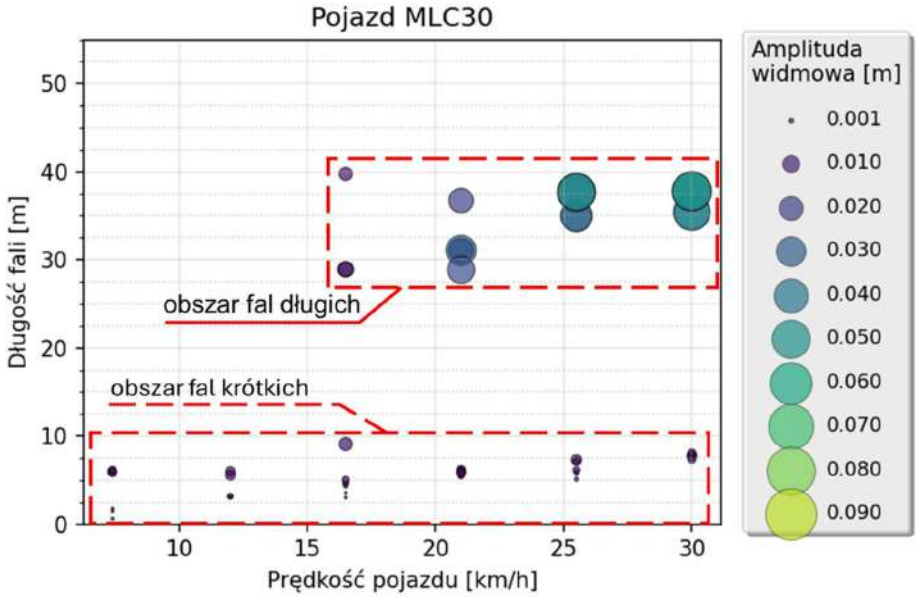
że niezależnie od prędkości pojazdu, występują dwa obszary dominujących amplitudowo częstotliwości fali. Jednocześnie widoczny jest przyrost amplitud fali wraz ze wzrostem prędkości pojazdu.



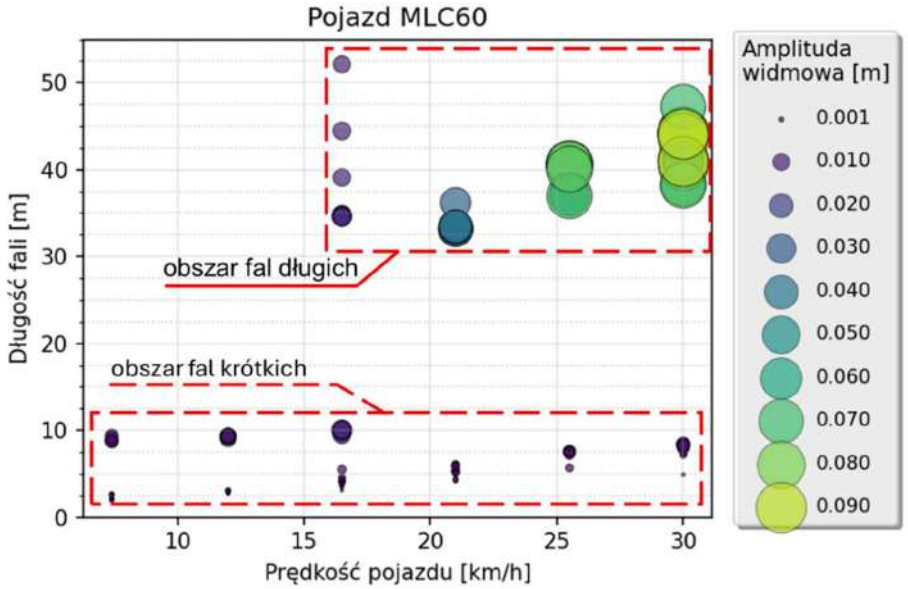
Rys. 6.23. Przykładowe charakterystyki widmowe uzyskane z analizy widmowej przebiegów falowania wody uzyskane dla pojazdu MLC60 przy prędkości: a) 7,4 km/h, b) 16,5 km/h, b) 30 km/h

W celu uzyskania pełniejszej charakterystyki przeprowadzono zbiorcze zestawienie wyników analizy widmowej dla wszystkich badanych prędkości oraz obu mas pojazdów. Dla każdego przebiegu zidentyfikowano dwa lokalne maksima amplitudy widma (Rys. 6.23: lokalne maksima FFT), po czym dokonano transformacji z dziedziny częstotliwości do dziedziny długości fali. Otrzymane wartości przedstawiono w funkcji prędkości ruchu pojazdu, uwzględniając jednocześnie wpływ amplitudy poszczególnych składowych (Rys. 6.24).

a)



b)

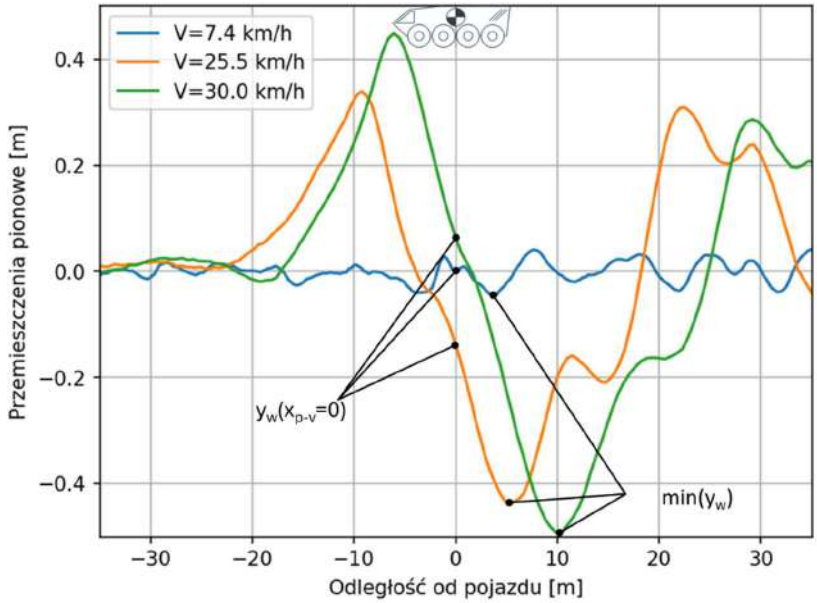


Rys. 6.24. Zestawianie charakterystycznych długości fal zidentyfikowanych na podstawie lokalnych maksimów amplitudy widma (lokalnych maksimów FFT) przebiegów falowania wody w funkcji prędkości ruchu pojazdów klasy: a) MLC 30, b) MLC 60

Analiza wyników pozwala stwierdzić, że analogicznie do efektu widocznego w częstotliwościach, wyróżnić można dwa obszary długości fal: krótkie oraz długie. Pierwszy z nich to fale o długości poniżej 10 m, które występują przy każdej prędkości pojazdu. Daje się przy tym zauważyć, że powyżej prędkości 21 km/h mieszczą się one w przedziale 6–8 m dla obu klas pojazdów. Są to wartości zbliżone do długości pojedynczego pontonu (6,9 m). W połączeniu z małą wartością amplitud nasuwa to wniosek, że ich źródłem są niezależne ruchy pojedynczych bloków pontonowych w zakresie luzów występujących w przegubach.

Drugi obszar obejmuje fale o długości około 30–50 m. Stają się one wyraźnie widoczne dopiero przy prędkości 16,5 km/h, choć w tym zakresie cechują się niewielką amplitudą. Istotny jej przyrost pojawia się powyżej prędkości 21 km/h. Porównanie wyników uzyskanych dla obu klas pojazdów wskazuje na ich znaczące podobieństwo w tym przedziale oraz na rosnącą tendencję amplitudy wraz ze wzrostem prędkości pojazdu. Szczególnie w przypadku pojazdu klasy MLC 60 wyraźnie zaznacza się wzrost długości fali wraz z prędkością pojazdu (Rys. 6.24b). Opisana charakterystyka pozwala zidentyfikować obszar występowania fali czołowej dla prędkości powyżej 21 km/h.

W kolejnym etapie przeprowadzonych analiz poddano identyfikacji charakterystyki falowania wody występującego przy różnych prędkościach i masach pojazdu (Rys. 6.25).



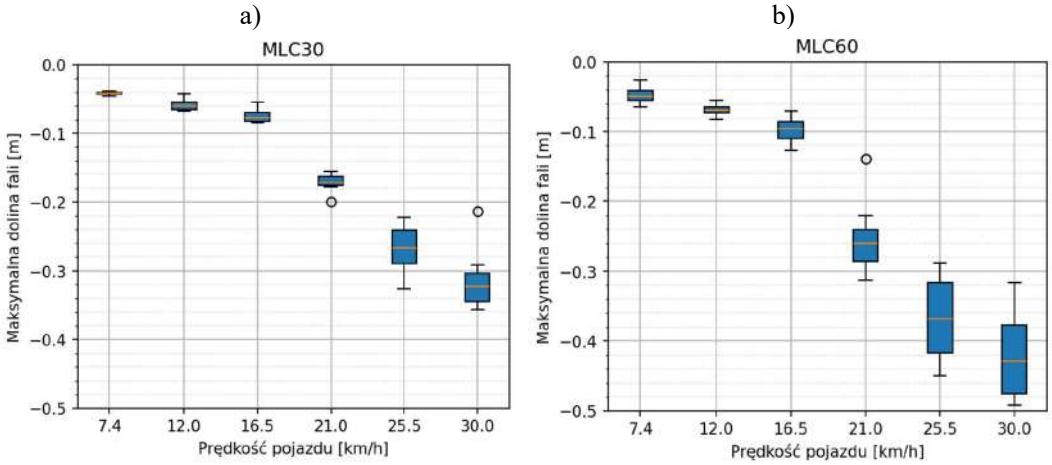
Rys. 6.25. Przykładowe charakterystyki przemieszczeń pionowych fali w czasie przejazdu pojazdu MLC60 z różnymi prędkościami, gdzie: $min(y_w)$ – przemieszczenie w dolinie fali, $y_w(x_{p-v}=0)$ – przemieszczenie w miejscu chwilowej lokalizacji pojazdu

Na podstawie przebiegów przemieszczeń pionowych fali wyznaczono punkty charakterystyczne: dolinę fali określoną przez wartość minimalną przemieszczenia pionowego oraz zanurzenie w miejscu pojazdu, wyznaczone dla $x_{p-v}=0$ (Rys. 6.25).

Na Rys. 6.26 zaprezentowano wartości zarejestrowanych maksymalnych przemieszczeń pionowych lustra wody (doliny fali) w postaci wykresów pudełkowych, na których:

– pomarańczowa linia wewnątrz pudełka wskazuje wartość środkową – medianę rozkładu danych;

– pudełko ograniczone przez dolny i górny kwartyl (Q1 i Q3), przedstawia zakres wartości obejmujący środkowe 50% obserwacji (tzw. rozstęp międzykwartylowy, IQR);
– wąsy sięgają od granic pudełka do minimalnej i maksymalnej wartości mieszczącej się w zakresie od Q1-1,5·IQR do Q3+1,5·IQR
– kółka oznaczające wartości odstające, wskazują szczególne przypadki poza zakresem zdefiniowanym dla wąsów.



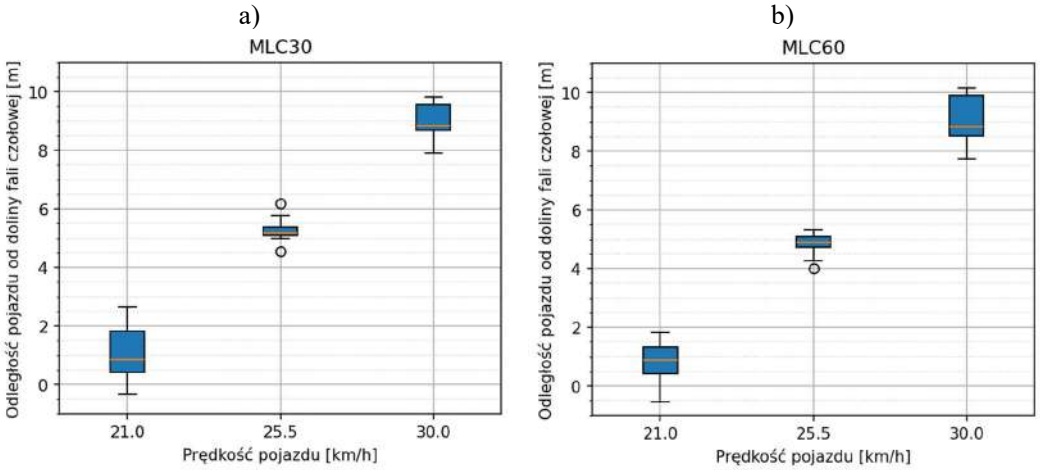
Rys. 6.26. Rozkłady zidentyfikowanych wartości maksymalnej głębokości doliny fali w funkcji prędkości pojazdu: a) testy z wykorzystaniem pojazdu MLC30, b) testy z wykorzystaniem pojazdu MLC60

Na wykresach można zauważyć, że powyżej prędkości 21km/h występuje znaczny przyrost głębokości doliny. Rozpatrując ten efekt w kontekście wniosków z analizy częstotliwości można stwierdzić, że wynika to z pojawienia się fali czołowej, która od 21 km/h zaczyna przyjmować duże wartości amplitud.

Wyniki analizy przebiegów falowania w niższym zakresie prędkości pojazdu (Rys. 6.25: V=7,4 km/h) wskazują, że nie można wyróżnić dojmującej doliny fali. Na wykresie tym można wskazać ich kilka, o podobnych głębokościach i w różnych odległościach od pojazdu. Potwierdza to wniosek wyciągnięty podczas analizy przebiegów widmowych: źródłem dolin fali, w tym zakresie prędkości pojazdu, są niezależne ruchy pojedynczych bloków pontonowych w ramach luzów w łączących je przegubach. Przekłada się to na obserwowany na reprezentatywnych przebiegach rozproszony układ dolin o małej głębokości.

W zakresie prędkości 21–30 km/h, w którym zaobserwowano istotne oddziaływanie fali czołowej, dokonano dodatkowej oceny wyznaczonych odległości dolin fali

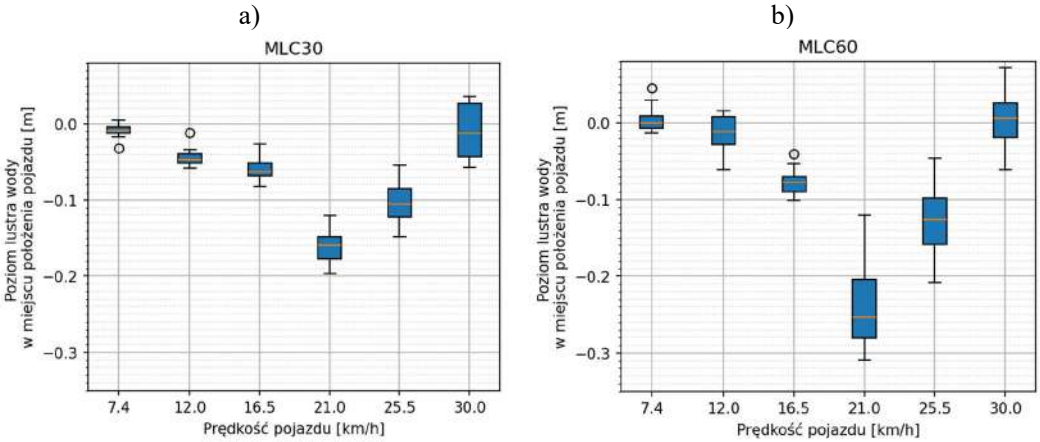
od pojazdu, której wyniki w funkcji prędkości pojazdu przedstawiono w formie graficznej na Rys. 6.27.



Rys. 6.27. Przedstawienie rozkładu zidentyfikowanych wartości odległości doliny fali czołowej od pojazdu w funkcji jego prędkości: a) testy z wykorzystaniem pojazdu MLC30, b) testy z wykorzystaniem pojazdu MLC60

Na podstawie powyższych wykresów można stwierdzić, że odległość doliny od pojazdu zwiększa się wraz ze wzrostem prędkości pojazdu i wartość tej odległości jest zbliżona dla obu klas MLC. Zatem głównym czynnikiem wpływającym na zmianę tej odległości jest zmiana prędkości pojazdu.

W wyniku nałożenia się na siebie zmian głębokości doliny fali oraz jej przesuwania względem pojazdu, zmienia się poziom wody w miejscu, w którym aktualnie znajduje się pojazd (Rys. 6.25: $y_w(x_{w-p} = 0)$. Zjawisko to ilustrują wyniki przedstawione na Rys. 6.28.



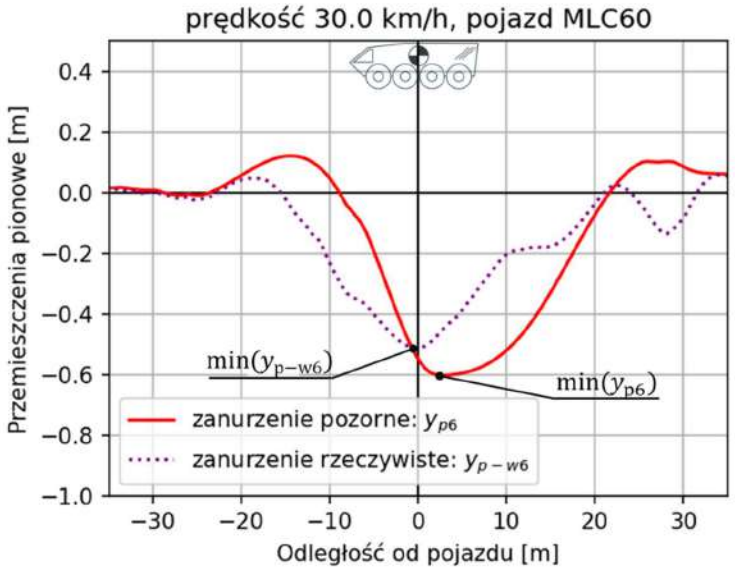
Rys. 6.28. Rozkłady zidentyfikowanych wartości poziomu lustra wody w miejscu usytuowania pojazdu w funkcji jego prędkości: a) pojazd MLC30, b) pojazd MLC60

Należy podkreślić, że dla najniższej i najwyższej rozpatrywanej prędkości pojazdu uzyskane mediany wartości poziomu lustra wody są bliskie zeru. Największe obniżenie poziomu lustra wody występuje przy prędkości 21 km/h, a dla pojazdu klasy MLC 60 jest ono o blisko 60% większe niż dla pojazdu klasy MLC 60.

Wpływ falowania wody na wartość maksymalnego zanurzenia mostu określono poprzez porównania przebiegów:

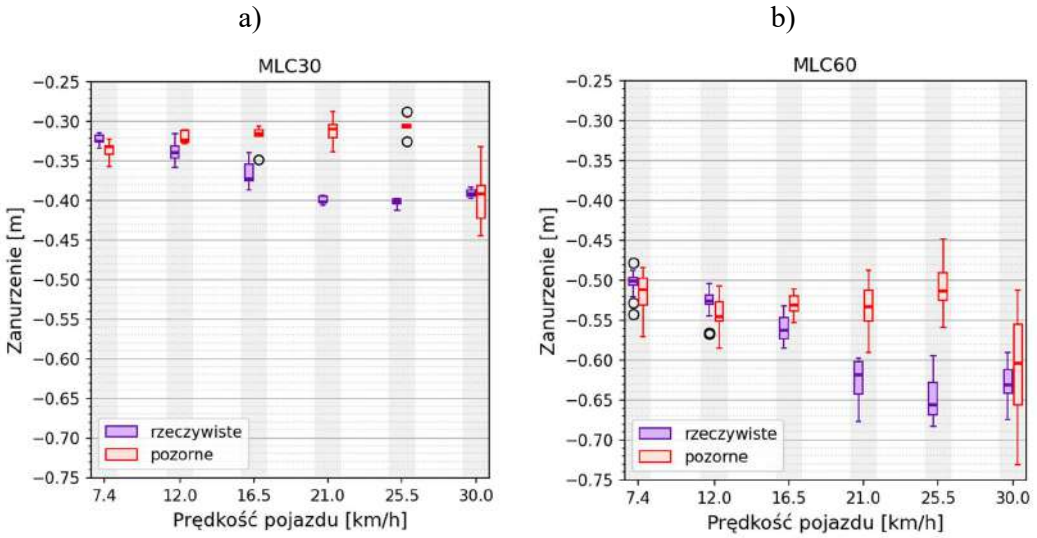
– bazujących jedynie na pomiarze przemieszczeń pionowych pontonów – zanurzenie pozorne: $\min(y_{\mathrm{p}i})$ oraz
– wynikających z różnicy pomiędzy przemieszczeniem pionowym pontonów i lustra wody – zanurzenie rzeczywiste: $\min(y_{\mathrm{p-w}i})$.

Przykładowe z powyższych przebiegów z naniesionymi punktami wskazującymi położenie doliny zanurzenia pozornego i rzeczywistego, przedstawiono na Rys. 6.29.



Rys. 6.29. Przykładowe charakterystyki pozornego i rzeczywistego zanurzenia pontonu w czasie przejazdu pojazdu MLC60 z prędkością 30 km/h wraz z naniesionymi punktami doliny zanurzenia rzeczywistego $\min(y_{\mathrm{p-w6}})$ oraz doliny zanurzenia pozornego $\min(y_{\mathrm{p6}})$

Zbiorcze zestawienie wartości maksymalnego rzeczywistego oraz maksymalnego pozornego zanurzenia, uzyskanych dla obu klas pojazdów i rozpatrywanych prędkości pojazdu przedstawiono na Rys. 6.30.



Rys. 6.30. Reprezentacja rozkładu zidentyfikowanych wartości doliny zanurzenia rzeczywistego min (y_{p-w})i pozornego min (y_p) jako funkcja prędkości pojazdu: a) testy z wykorzystaniem pojazdu MLC30, b) testy z wykorzystaniem pojazdu MLC60

W celu określenia istotności różnic pomiędzy wartościami zanurzenia rzeczywistego i pozornego przeprowadzono test Manna–Whitneya. Przyjęto poziom istotności $\alpha = 0{,}05$, a uzyskane wyniki zamieszczono w Tabela 6.4.

Tabela 6.4.Zestawienie wartości statystyk testowych U i wartości p dla testu Manna-Whitneya

Prędkość [km/h]	MLC30		MLC60	
	statystyka U	wartość p	statystyka U	wartość p
7,4	20	0,15	43	0,28
12	3	0,055	45	0,19
16,5	1	0,016	3	0,015
21	0	0,0079	0	0,00058
25,5	0	0,0079	0	0,00058
30	19	0,937	15	0,69

Zgodnie z założeniami testu, badane grupy są istotnie różne, dla kryterium $p < \alpha$. Warunek ten spełniony jest dla obu klas pojazdów przy prędkościach pojazdu 16,5–25,5 km/h. Można zatem stwierdzić, że w tym przedziale prędkości fala czołowa powoduje istotną statystycznie zmianę wartości zanurzenia.

Należy podkreślić, że warunek istotności różnic nie jest spełniony dla dwóch najmniejszych i największej wartości prędkości obu klas pojazdów, przy czym dla prędkości 7,4 km/h i 12 km/h wynika to z braku występowania fali czołowej i małej głębokości dolin fali. W przypadku prędkości pojazdu wynoszącej 30 km/h, gdy występuje fala czołowa i charakteryzuje się ona największą głębokością doliny, mały jej wpływ na maksymalne zanurzenia bloku wynika z dużego przesunięcia doliny fali względem pojazdu (Rys. 6.27). Co istotne, pojazd klasy MLC 60 generuje o 55–65%

większe wartości zanurzenia rzeczywistego niż pojazd klasy MLC 30. Obserwowane różnice nie są zatem proporcjonalne do relacji pomiędzy masami pojazdów.

Uzyskane wyniki pozwalają na stwierdzenie, że zjawisko fali czołowej istotnie wpływa na zanurzenie mostu pontonowego, a przez to na wartości oddziałujących na niego sił.

7. Opracowanie modelu uogólnionego fali czołowej

Zgodnie z przedstawionymi wynikami badań identyfikacyjnych, falowanie wody ma istotny wpływ na zanurzenie mostu pontonowego, a tym samym na wartości sił wyporności działających na jego konstrukcję. Z tego względu zasadnym jest odwzorowanie tego zjawiska podczas symulacji numerycznych.

Fala czołowa powstaje w wyniku ruchów mostu wywołanych przejazdem pojazdu, a jej kształt zależy od specyfiki tych ruchów. Przyjęto, że kluczowymi parametrami kształtującymi charakterystykę fali czołowej są głębokość zanurzenia mostu oraz prędkość przemieszczania się pojazdu.

Planowane badania wymagają przeprowadzenia symulacji dla zróżnicowanych struktur mostu, które wpływają na głębokość ich zanurzenia. Dlatego konieczne jest opracowanie metodyki umożliwiającej odwzorowanie fali czołowej przy uwzględnieniu niezbędnego zakresu zmian parametrów determinujących ukształtowanie tego zjawiska.

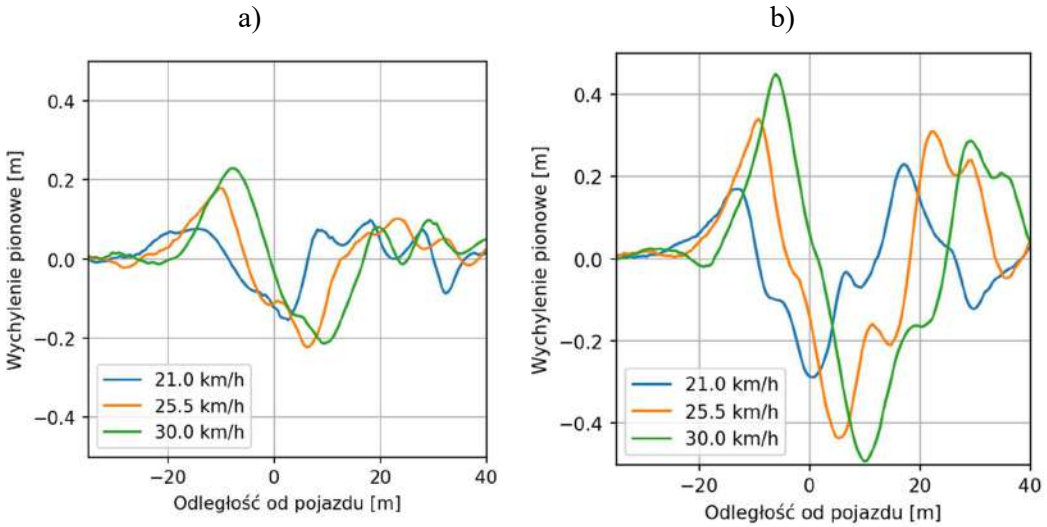
Wartość zanurzenia zależy nie tylko od struktury mostu oraz prędkości i masy pojazdu. W związku z tym przyjęto, że parametrem charakteryzującym daną konstrukcję pod kątem zanurzenia mostu będzie zanurzenie statyczne, czyli wartość maksymalnego zanurzenia mostu obciążonego nieruchomym pojazdem.

W ramach przeprowadzonych badań doświadczalnych zarejestrowano charakterystyki falowania generowanego przez pojazdy klas MLC 30 oraz MLC 60, poruszające się z prędkościami 7,5 – 30 km/h. Rozpatrzenie przypadków przeprawiania tych dwóch pojazdów przełożyło się na odmienne wartości zanurzenia statycznego wynoszące: 0,325 m dla MLC 30 oraz 0,5 m dla MLC 60. Uzyskane wyniki pomiarów zanurzenia stanową podstawę do analizy wpływu kluczowych czynników kształtujących charakterystykę falowania na ostateczną formę generowanej fali.

W trakcie badań doświadczalnych zarejestrowano przebiegi fali czołowej dla poszczególnych bloków pontonowych. Na skutek interakcji pomiędzy falą a poruszającą się konstrukcją mostu, charakterystyka fali ulegała zmianie wzdłuż jego długości. Aby model numeryczny był użyteczny podczas analizy obciążeń, powinien umożliwiać wyznaczenie wartości maksymalnych, jakie mogą wystąpić dla danego zestawu parametrów konstrukcyjnych. Z tego względu do odwzorowania w modelu numerycznym wybrano jedną charakterystykę fali czołowej dla każdego przejazdu, przy której występowała największa różnica między zanurzeniem pozornym a rzeczywistym w lokalizacji pojazdu. Wartość tego parametru pozwoliła na wybór charakterystyk,

w których falowane ma największy wpływ na kształtowanie sił wyporu, a tym samym na zachowanie mostu.

Wybrane charakterystyki falowania wody w czasie przejazdu z różnymi prędkościami przedstawiono na Rys. 7.1.

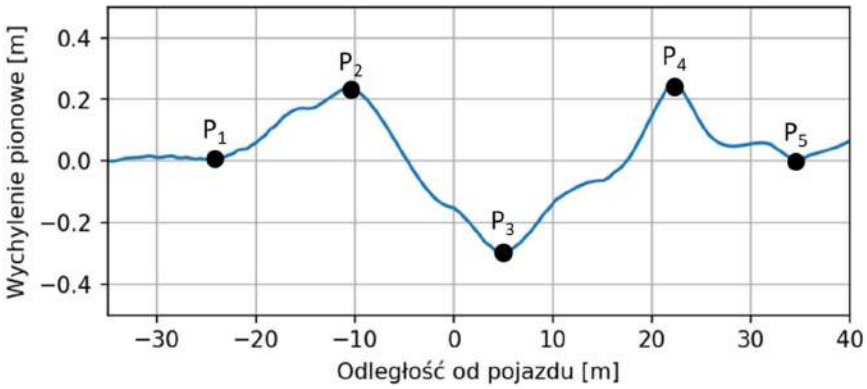


Rys. 7.1. Charakterystyki falowania dla różnych prędkości pojazdu i zanurzenia statycznego: a) 0,325 m, b) 0,5 m

Wyznaczone charakterystyki falowania, przy zróżnicowanych wartościach szczytowych, mają zbliżone przebiegi, a dla każdej z nich można wyróżnić pięć punktów charakterystycznych, odwzorowujących kształt powierzchni wody podczas przeprawiania pojazdu, identyfikujących:

- rozpoczęcie falowania (punkt P_1),
- maksymalne wychylenie przed pojazdem (punkt P_2),
- minimalne wychylenie - dolina (punkt P_3),
- maksymalne wychylenie za pojazdem (punkt P_4),
- powrót do poziomu zerowego za punktem P_4 (punkt P_5).

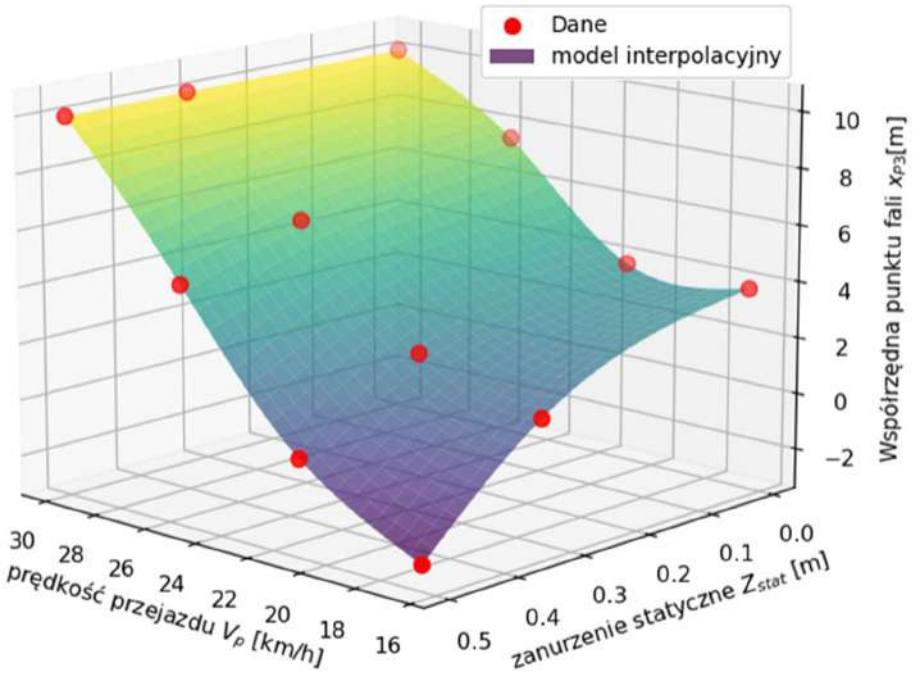
Rozmieszczenie powyższych punktów dla charakterystyki zarejestrowanej podczas przejazdu pojazdu klasy MLC 60 z prędkością 25 km/h przedstawiono na Rys. 7.2.



Rys. 7.2. Lokalizacja punktów charakterystycznych (P_1, P_2, P_3, P_4 i P_5) przebiegu fali czołowej zarejestrowanej dla przejazdu pojazdu MLC60 przy prędkości 25 km/h

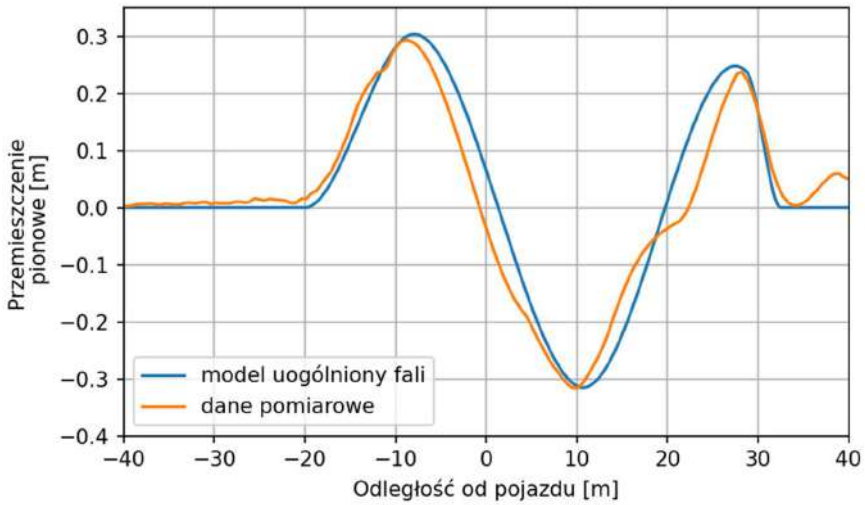
Punkty charakterystyczne zostały wyznaczone dla wszystkich wytypowanych charakterystyk falowania. Uwzględniono ponadto charakterystyki o zerowym wychyleniu punktów charakterystycznych, dla prędkości poniżej występowania fali czołowej i zerowego zanurzenia statycznego. Pozwoliło to na poszerzenie zakresu aproksymacji i zapewniło ciągłość opisu zjawiska w obszarze małych wartości zanurzenia. Dla każdego punktu określono wartości współrzędnych wychylenia pionowego (w kierunku osi 0y) oraz odległości od pojazdu (w kierunku osi 0x). Następnie przeprowadzono dwuwymiarową interpolację opartą na dyskretnych danych pomiarowych zależnych od dwóch zmiennych niezależnych: prędkości przejazdu V_p oraz zanurzenia statycznego z_{stat}. Interpolację przeprowadzono z wykorzystaniem biblioteki SciPy, stosując metodę „cubic", umożliwiającą przeprowadzenie dwuwymiarowej interpolację danych z wykorzystaniem gładkich funkcji typu „spline" [56]. Pozwoliło to na uzyskanie ciągłej, gładkiej powierzchni aproksymującej zmienność położenia punktów fali. Dla każdej współrzędnej (x_{P1}, y_{P1}, x_{P2}, y_{P2}, x_{P3}, y_{P3}, x_{P4}, y_{P4}, x_{P5}, y_{P5}) wykonano oddzielną interpolację, uzyskując serię powierzchni odwzorowujących przebieg zmian geometrii fali.

Efekt interpolacji dla wychylenia pionowego punku P_1 przedstawiono graficznie na Rys. 7.3. Na wykresie zaprezentowano jednocześnie wartości pomiarowe w postaci punktów charakterystycznych oraz wygenerowaną powierzchnię aproksymującą zależność ich położenia od prędkości przejazdu i zanurzenia statycznego.



Rys. 7.3. Wizualizacja interpolacji współrzędnej poziomej punktu P_3: x_{P3}w funkcji prędkości przejazdu v_p oraz zanurzenia statycznego z_{stat}

Uzyskane odwzorowanie umożliwiło określenie współrzędnych położenia punktów charakterystycznych dla dowolnych wartości rozpatrywanych parametrów mieszczących się w analizowanym zakresie. Do odtworzenia przebiegu falowania na podstawie tych punktów przyjęto funkcję interpolacyjną typu AKIMA spline. Metoda została wybrana z uwagi na możliwość jej bezpośredniego zastosowania w wykorzystywanym środowisku numerycznym oraz zdolność do uzyskania pozbawionych oscylacji przejść pomiędzy punktami pomiarowymi. Zestawienie charakterystyk fali czołowej, wyznaczonej dla takich samych wartości zanurzenia statycznego i prędkości pojazdu, sporządzonych na podstawie badań doświadczalnych i opracowanego modelu uogólnionego przedstawiono na rysunku Rys. 7.4.



Rys. 7.4. Porównanie charakterystyk falowania dla prędkości 30 km/h i zanurzenia statycznego 0,5 m uzyskanych z w wyniku przeprowadzenia badań doświadczalnych oraz na podstawie wyznaczonego modelu uogólnionego falowania

Wyniki badań i analiz przedstawionych w niniejszym rozdziale umożliwiły sformułowanie zależności opisujących ukształtowanie fali czołowej dla różnych wartości prędkości pojazdu oraz zanurzenia statycznego, a także opracowanie metodyki pozwalającej na implementację tych zależności w wykorzystywanym modelu numerycznym.

8. Implementacja do modelu symulacyjnego zidentyfikowanych odwzorowań masy wody towarzyszącej, fali czołowej i charakterystyki lepkości wody

Opracowany model numeryczny, którego opis przedstawiono w rozdziale 5, wymaga rozbudowania w celu uwzględnienia zjawisk hydrodynamicznych zidentyfikowanych w badaniach doświadczalnych. W tym celu opracowano metodykę odwzorowania następujących zjawisk i wielkości wyznaczonych doświadczalnie:

- zmiany zanurzenia oraz prędkości i przyspieszenia nurzania wynikających z oddziaływania fali czołowej.
- siły oporów tłumiących,
- siły bezwładności masy wody towarzyszącej.

W modelu numerycznym zjawisko fali czołowej uwzględniono wyłącznie w tym zakresie prędkości ruchu pojazdu, w którym jego występowanie zostało potwierdzone w badaniach doświadczalnych. Analiza eksperymentalna wykazała, że generowanie fali czołowej rozpoczyna się od prędkości ruchu pojazdu przekraczających 21 km/h.

W analizie oddziaływań środowiska wodnego na blok pontonowy kluczowe jest poprawne odwzorowanie zjawisk wyporu, tłumienia oraz bezwładności masy wody towarzyszącej, których opracowany model matematyczny pozwala na wyznaczanie sił w funkcji parametrów kinematycznych:

- przemieszczenia;
- prędkości;
- przyspieszenia.

Zależności opisujące te zjawiska wymagają jednak, aby parametry kinematyczne odnosić do ruchu względem powierzchni wody, a nie względem globalnego, nieruchomego układu odniesienia. Ma to istotne znaczenie przy występowaniu fali czołowej, ponieważ pionowa składowa ruchu lustra wody powoduje, że wielkości kinematyczne mierzone na pontonie względem globalnego układu odniesienia nie odpowiadają rzeczywistemu ruchowi konstrukcji względem ośrodka cieczy. Z tego względu konieczne jest wcześniejsze wyznaczenie pionowych przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń lustra wody w globalnym układzie odniesienia, a następnie obliczenie wielkości względnych poprzez odjęcie parametrów ruchu wody od odpowiadających im wartości zmierzonych na pontonie. Tak określone kinematyczne parametry względne pozwalają na poprawne obliczenie oddziaływań środowiska wodnego.

Prędkości i przyspieszenia można wyznaczyć na podstawie przebiegów czasowych przemieszczeń. W związku z tym opracowane w rozdziale 7 zależności opisujące pionowe przemieszczenia lustra wody w funkcji odległości od pojazdu, przy założeniu stałej prędkości jego ruchu, przekształcono do postaci charakterystyk czasowych. Następnie przebiegi te zróżniczkowano, co pozwoliło otrzymać przebiegi czasowe prędkości i przyspieszeń pionowych. W kolejnym kroku, wykorzystując te wyniki oraz przyjmując stałą prędkość pojazdu, wyznaczono charakterystyki prędkości i przyspieszeń w funkcji odległości od pojazdu.

Charakterystyki kinematyczne fali wykorzystano do wyznaczenia wartości zanurzenia, prędkości oraz przyspieszenia pionowego bloku pontonowego z uwzględnieniem oddziaływania fali czołowej. Uzyskane w ten sposób skorygowane parametry kinematyczne mogły być wykorzystane do określenia aktualnych wartości sił wyporu, sił oporów tłumiących oraz sił bezwładności wody towarzyszącej, działających na blok pontonowy w kolejnych krokach obliczeniowych.

Sposób wyznaczania siły wyporu przedstawiono w podrozdziale 5.3. Do zaprezentowanej metody wyznaczania siły zależnej od zanurzenia wprowadzono korektę wartości zanurzenia $y_{(p-w,ij)}$, wynikającą z kształtu powierzchni fali:

$$y_{\mathrm{p-w},ij} = \mathrm{y}_{\mathrm{p},ij} - \mathrm{y}_{\mathrm{w},ij}\ [m] \tag{8.1}$$

gdzie:

$\mathrm{y}_{\mathrm{p},ij}$ – przemieszczenie pionowe środka sektora względem globalnego układu odniesienia [m/s];

$\dot{y}_{w,ij}$ – przemieszczenie pionowe lustra wody w lokalizacji środka sektora, wyrażone w globalnym układzie odniesienia [m/s].

Wartość siły oporów tłumiących działającej na blok pontonowy została wyznaczona jako funkcja prędkości nurzania, zgodnie z zależnością (6.30). Zgodnie z przyjętą metodyką modelowania, całkowite oddziaływanie tłumiące zostało rozdzielone na 160 składowych F_{Dij} , których wektory przyłożono w środkach geometrycznych wyznaczonych elementów dyskretnych powierzchni bloku pontonowego (Rys. 5.3). Wartość siły tłumiącej zależy od prędkości ruchu środka danego sektora względem otaczającego go ośrodka. Prędkość tę, oznaczoną jako $\dot{y}_{\mathrm{p-w},ij}$ obliczono z zależności:

$$\dot{y}_{\mathrm{p-w},ij} = \dot{y}_{\mathrm{p},ij} - \dot{y}_{\mathrm{w},ij}\ \left[\frac{m}{s}\right] \tag{8.2}$$

gdzie:

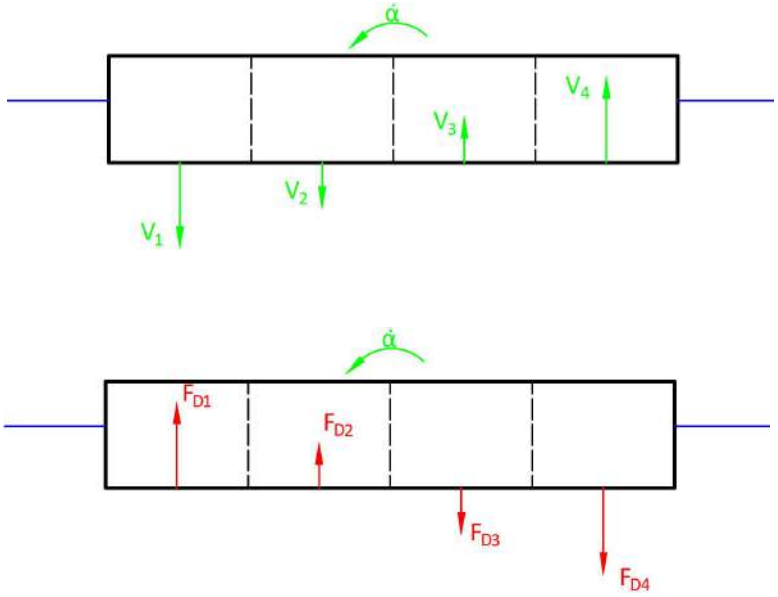
$\dot{y}_{p,ij}$ – pionowa prędkość środka sektora względem globalnego układu odniesienia [m/s];

$\dot{y}_{w,ij}$ – prędkość pionowa wody w lokalizacji środka sektora, wyrażona w globalnym układzie odniesienia [m/s].

Dla tak opisanej prędkości wartość pojedynczej składowej siły oporów tłumienia F_{Dij} dana jest zależnością:

$$F_{D,ij} = \frac{-204653{,}6\,\dot{y}_{ij} + 321115{,}4\dot{y}_{ij}{}^{2} - 317362{,}6\,\dot{y}_{ij}{}^{3} + 122401{,}61\dot{y}_{ij}{}^{4}}{160}\,[N] \tag{8.3}$$

Zastosowany podział całkowitej siły tłumiącej na składniki pozwala uwzględnić zróżnicowanie prędkości nurzania poszczególnych elementów dyskretnych bloku pontonowego. Zróżnicowanie te wynika z przemieszczania się wymuszenia oraz podatności mostu. Wahadłowy ruch pontonów powoduje, że wartości i zwroty prędkości nurzań elementów dyskretnych bloku są zależne od ich odległości od chwilowego środka obrotu. W konsekwencji generowane są pary sił o przeciwnych zwrotach, co umożliwia odtworzenie momentów tłumiących działających na blok pontonowy (Rys. 8.1).



Rys. 8.1. Schemat odwzorowania momentów tłumiących działających na blok pontonowy w czasie jego ruchu wahadłowego: a) zróżnicowanie wektorów prędkości nurzania elementów dyskretnych; b) wektory sił generujących moment tłumiący

Analogicznie jak w przypadku sił tłumiących, siły wynikające z oddziaływania masy towarzyszącej zostały odwzorowane jako 160 składowych $F_{\mathrm{Imt},ij}$. Wektory tych sił

przyłożono w środkach geometrycznych elementów dyskretnych powierzchni bloku pontonowego (Rys. 5.3). Zgodnie z zależnością (6.24), wartość siły bezwładności masy towarzyszącej jest funkcją pionowego przyspieszenia pojedynczego sektora względem powierzchni wody. Przyspieszenie względne, z uwzględnieniem falowania, opisuje zależność:

$$\ddot{y}_{p-w,ij} = \ddot{y}_{p,ij} - \ddot{y}_{w,ij} \text{ [m/s}^2\text{]} \tag{8.4}$$

gdzie:

$\ddot{y}_{ij,p}$– pionowe przyspieszenie środka sektora względem globalnego układu odniesienia;

$\ddot{y}_{ij,w}$ – pionowe przyspieszenie wody w lokalizacji środka sektora, wyrażone w globalnym układzie odniesienia.

Dla tak określonego przyspieszenia względnego wartość pojedynczej składowej siły masy towarzyszącej obliczana jest z zależności:

$$F_{lmt,ij} = \frac{c_{\text{mt}}\, m_{\text{p}}\, \ddot{y}_{p-w,ij}}{160} \text{ [N]} \tag{8.5}$$

gdzie:

c_{mt}– bezwymiarowy współczynnik masy towarzyszącej (dla analizowanego przypadku c_{mt}=11,4;

m_{p}– masa bloku pontonowego (dla analizowanego przypadku m_p=8262,25 kg).

Opracowane zależności matematyczne zaimplementowano w modelu numerycznym w środowisku MSC Adams/View, co pozwoliło uzyskać model uwzględniający wszystkie zjawiska hydrodynamiczne, które zostały zidentyfikowane jako istotne z punktu widzenia obciążeń mostów pontonowych typu wstęga.

9. Badania walidacyjne modelu symulacyjnego

9.1. Zakres badań walidacyjnych

Badania walidacyjne przeprowadzono w celu potwierdzenia, że opracowany model numeryczny mostu pontonowego spełnia założone wymagania w zakresie poprawnego odwzorowania zjawisk hydrodynamicznych towarzyszących przeprawianiu pojazdów i zapewnia otrzymanie zaplanowanych, powtarzalnych wyników. Walidowany model zawierał zaimplementowane doświadczalnie wyznaczone zależności opisujące opory tłumiące, masę towarzyszącą oraz oddziaływanie fali czołowej. Opracowany model numeryczny został poddany walidacji w dwóch przypadkach:

- nurzania swobodnego odcinka mostu;
- zachowania mostu w czasie przejazdu pojazdu.

Dzięki temu możliwe było zweryfikowanie zarówno poprawności odwzorowania lokalnych zjawisk hydrodynamicznych, jak i globalnej odpowiedzi układu woda–most–pojazd. Badania walidacyjne opracowano na podstawie wyników przeliczonych do skali obiektu rzeczywistego (skale: geometryczna S_L, prędkości S_V, czasu S_t, masy S_m, sił S_F i momentów sił S_M), zgodnie z wartościami wyznaczonymi w rozdziale 6.1.

9.2. Badania walidacyjne procesu nurzania pontonów

Analiza swobodnego ruchu pionowego odcinka mostu umożliwiła ocenę poprawności odwzorowania:

- sił wyporu;
- sił oporów tłumiących;
- sił oddziaływania masy towarzyszącej.

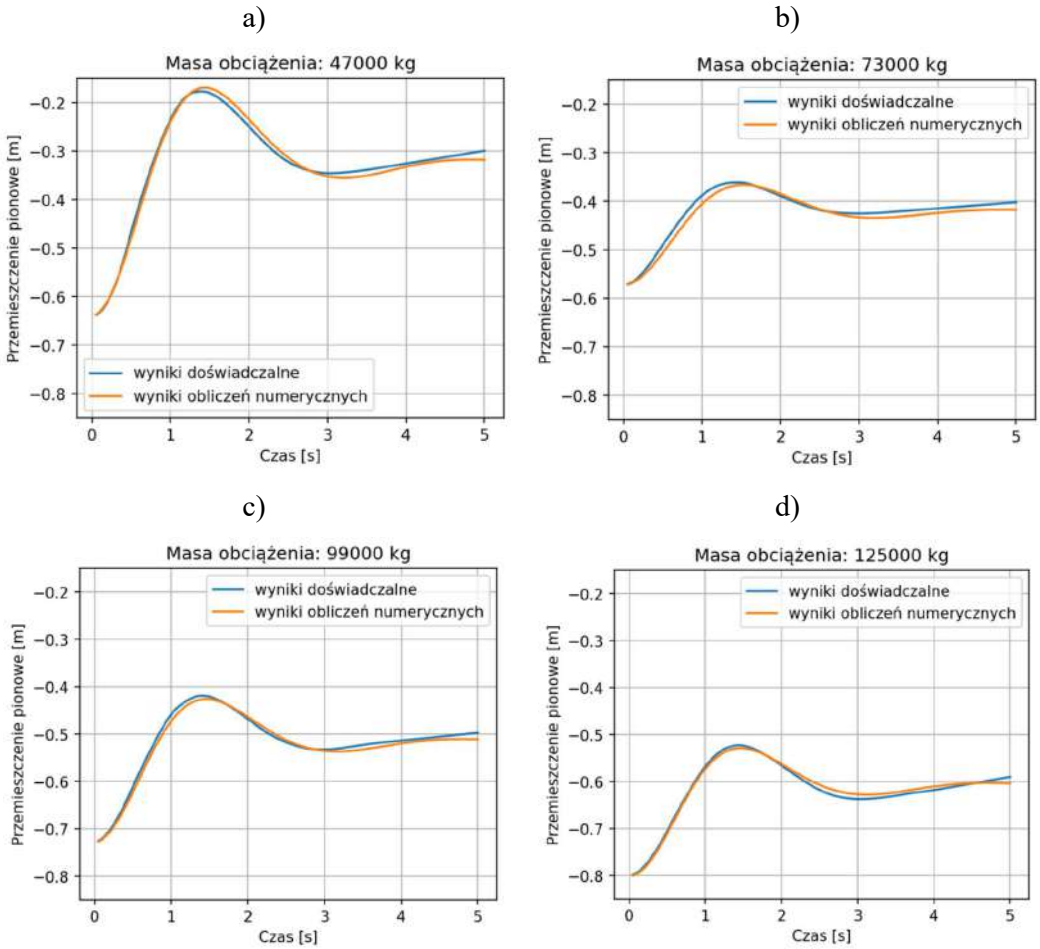
Walidację modelu przeprowadzono przez porównanie wyników badań doświadczalnych swobodnych nurzań odcinka mostu, przedstawionych w podrozdziale 6.2, z przebiegami czasowymi pionowych przemieszczeń konstrukcji uzyskanymi w symulacjach numerycznych.

Walidacji poddano model numeryczny odwzorowujący pięć sztywno połączonych bloków pontonowych, obciążonych stałą masą, które poddawane były wymuszeniu w postaci zanurzenia początkowego. Model został sformułowany zgodnie z opisem przedstawionym w podrozdziałach 5.1 i 5.3. W przygotowanym modelu pięciu sztywno połączonych bloków pontonowych zaimplementowano zidentyfikowane oddziaływania hydrodynamiczne opisane w rozdziale 8.

Badania porównawcze przeprowadzono na podstawie wybranych czterech przebiegów czasowych nurzania odcinka pięciu bloków pontonowych, uzyskanych w badaniach doświadczalnych oraz numerycznych, charakteryzujących się różnymi masami oraz wartościami zanurzeń początkowych. Dotyczy to:

- obciążenia 47 000 kg i zanurzenia początkowego 0,63 m;
- obciążenia 73 000 kg i zanurzenia początkowego 0,57 m;
- obciążenia 99 000 kg i zanurzenia początkowego 0,72m;
- obciążenia 125 000 kg i zanurzenie początkowego 0,79 m.

Dla powyższych wariantów obciążeń i zanurzeń przeprowadzono serię symulacji numerycznych, a uzyskane na podstawie wyników obliczeń charakterystyki przemieszczeń pionowych zestawiono z charakterystykami uzyskanymi na podstawie wyników badań doświadczalnych i przedstawiono na Rys. 9.1



Rys. 9.1. Zestawienie przebiegów czasowych nurzania odcinka pięciu bloków pontonowych uzyskanych w badaniach doświadczalnych oraz numerycznych: a) obciążenie 47 000 kg, zanurzenie początkowe 0,63 m; b) obciążenie 73 000 kg, zanurzenie początkowe 0,57 m; c) obciążenie 99 000 kg, zanurzenie początkowe 0,72m; d) obciążenie 125 000 kg, zanurzenie początkowe 0,79 m

Dla powyższych przebiegów wyznaczono parametry walidacyjne. Ocenę zgodności oparto na współczynniku korelacji R oraz miarach względnych: maksymalnej różnicy pomiędzy pomiarami $\delta y_{\max}$ oraz pierwiastku błędu średniokwadratowego RMSE. Parametry te zostały znormalizowane poprzez odniesienie ich do zakresu zarejestrowanych przemieszczeń R_{y} dla badań doświadczalnych, opisanego zależnością:

$$R_{\mathrm{y}} = max(y_{\mathrm{p}}) - min(y_{\mathrm{p}}) \tag{9.1}$$

gdzie:

$max(y_{\mathrm{p}})$ – maksymalna doświadczalna wartość przemieszczenia pionowego;

$min(y_{\mathrm{p}})$ – minimalna doświadczalna wartość przemieszczenia pionowego.

Zestawienie uzyskanych wartości parametrów walidacyjnych przedstawiono w Tabela 9.1.

Tabela 9.1.Wartości parametrów walidacji modelu oddziaływań środowiska wodnego

Wariant		$\boldsymbol{R}$	$\frac{\boldsymbol{\delta y_{max}}}{\boldsymbol{R_y}}$ [%]	$\frac{\boldsymbol{RMSE}}{\boldsymbol{R_y}}$ [%]
zanurzenie początkowe [m]	masa obciążenia [kg]			
-0,63	47 000	0,996	4,0	2,1
-0,57	73 000	0,990	9,1	4,9
-0,72	99 000	0,996	4,7	2,6
-0,79	125 000	0,994	4,9	2,5
średnia dla wszystkich wariantów		0,994	5,7 %	3,0 %

Na podstawie przeprowadzonego procesu walidacji stwierdzono poprawność przyjętej metody identyfikacji parametrów oraz sposobu wyznaczania sił generowanych przez środowisko wodne. Uzyskana zgodność wyników symulacji numerycznych z danymi doświadczalnymi wskazuje, że opracowany model oddziaływań hydrodynamicznych umożliwia wiarygodne odwzorowanie w środowisku numerycznym procesu nurzania bloków pontonowych.

9.3. Badania walidacyjne charakterystyki ugięcia mostu podczas przeprawiania pojazdów

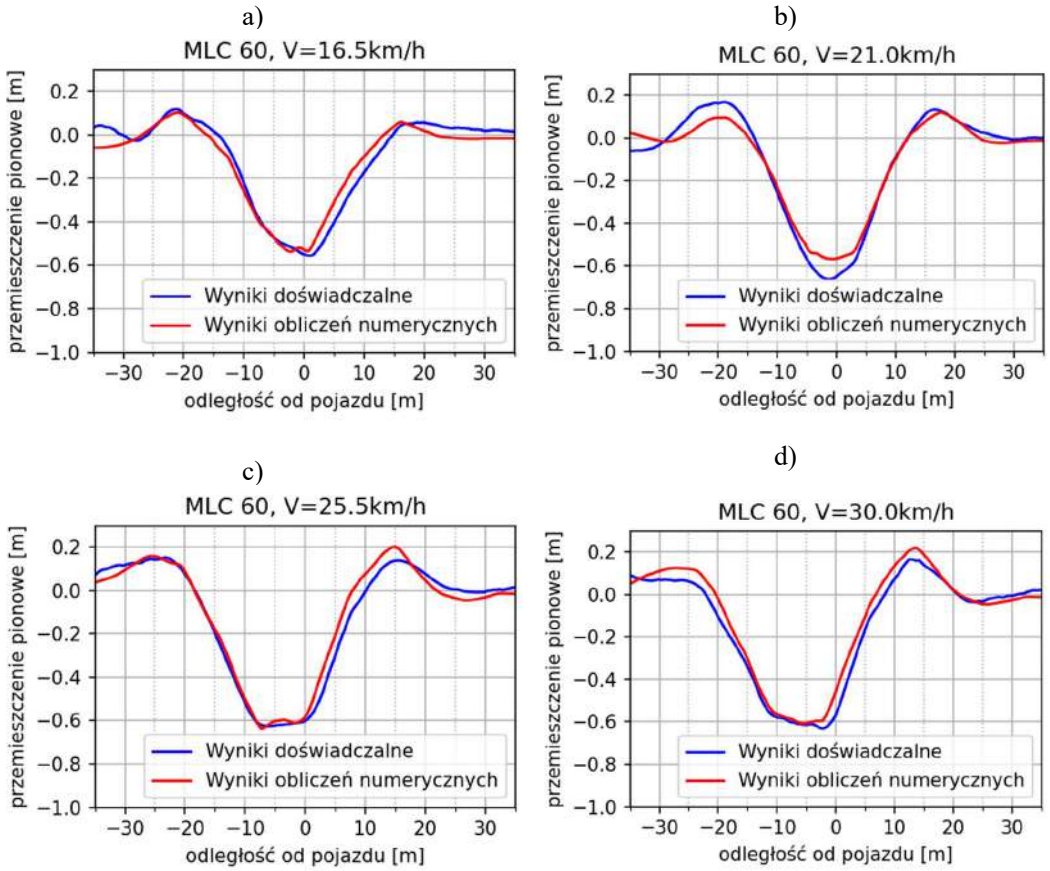
Podczas walidacji modelu numerycznego mostu pontonowego w warunkach przeprawiania pojazdu wykorzystano wyniki badań doświadczalnych przejazdu pojazdów po moście, przedstawione w podrozdziale 6.3. Ocenę poprawności modelu przeprowadzono na podstawie porównania charakterystyk przemieszczeń pionowych bloków pontonowych uzyskanych w warunkach dynamicznego oddziaływania

obciążenia ruchomego. Zachowanie konstrukcji mostu w tym przypadku wynika przede wszystkim z oddziaływania następujących zjawisk fizycznych:

- siły wyporu;
- oddziaływań hydrodynamicznych,
- wpływu fali czołowej na wartości sił wyporu i oddziaływań hydrodynamicznych,
- wzajemnych oddziaływań bloków pontonowych przenoszonych przez ich połączenia konstrukcyjne,
- oddziaływania przemieszczającego się pojazdu na konstrukcję mostu.

Wykonano serię symulacji z wykorzystaniem modelu sformułowanego zgodnie z opisem przedstawionym w rozdziale 8 oraz z uwzględnieniem oddziaływań opisanych w rozdziale 6. W trakcie badań numerycznych odwzorowano warunki, w których realizowano badania doświadczalne (Rys. 6.19 – badania identyfikacyjne). Następnie zarejestrowano przebiegi przemieszczeń pionowych bloku pontonowego zlokalizowanego w środkowej części mostu.

Uzyskane podczas obliczeń numerycznych wartości przemieszczeń pionowych przedstawiono w postaci charakterystyk, które zestawiono z charakterystykami uzyskanymi na podstawie badań doświadczalnych przemieszczeń pionowych zarejestrowanych dla bloku pontonowego, na wysokości którego wystąpiła fala o kształcie powodującym największą zmianę zanurzenia. Wybrane cztery charakterystyki sporządzone dla przeprawy pojazdu MLC60, dla prędkości: 16,5 km/h, 21 km/h, 25,5 km/h i 30 km/h przedstawiono na Rys. 9.2.



Rys. 9.2. Zestawienie wybranych przebiegów przemieszczeń pionowych bloków pontonowych uzyskanych na drodze badań doświadczalnych oraz numerycznych, wyznaczonych dla pojazdu MLC60 poruszającego się z prędkościami: a) 16,5 km/h, b) 21 km/h, c) 25,5 km/h, d) 30 km/h

Dla wszystkich porównywanych przebiegów wyznaczono parametry walidacyjne. Ocenę zgodności oparto na współczynniku korelacji R oraz parametrach analizowanych względem zakresu zarejestrowanych przemieszczeń R_y – różnica pomiarów zanurzenia w lokalizacji pojazdu $\delta y(x = 0)$ oraz pierwiastku błędu średniokwadratowego RMSE, Zestawienie uzyskanych wartości parametrów walidacyjnych przedstawiono w Tabela 9.2.

Tabela 9.2. Wartości parametrów walidacji modelu przeprawiania pojazdu po moście pontonowym

Wariant		R	$\frac{\delta y(x=0)}{R_y}$ [%]	$\frac{RMSE}{R_y}$ [%]
Prędkość pojazdu [km/h]	Klasa pojazdu			
7,5	MLC30	0,988	7,91	7,87
12	MLC30	0,994	2,07	7,56
16,5	MLC30	0,995	1,98	3,78
21	MLC30	0,982	0,39	5,85
25,5	MLC30	0,979	1,38	6,88
30	MLC30	0,986	0,76	4,94
7,5	MLC60	0,994	4,94	6,39
12	MLC60	0,993	6,56	7,95
16,5	MLC60	0,976	0,70	7,84
21	MLC60	0,990	9,67	5,94
25,5	MLC60	0,987	3,27	5,49
30	MLC60	0,986	1,12	5,34
Średnia wszystkich wariantów		0,988	3,396	6,318

Na podstawie przeprowadzonej walidacji stwierdzono, że opracowany model numeryczny w sposób wiarygodny odwzorowuje przemieszczenia mostu, co potwierdza prawidłowe zamodelowanie zarówno jego struktury, jak i sił oddziaływania środowiska wodnego. Rozkład wskaźników jakości nie wykazuje zależności od klasy obciążenia ani od prędkości ruchu pojazdu. Oznacza to, że model zachowuje porównywalny poziom dokładności w całym rozpatrywanym zakresie parametrów pracy. Uzyskana zgodność wyników symulacji z danymi doświadczalnymi potwierdza poprawność przyjętej metody identyfikacji oraz procedury wyznaczania sił generowanych przez środowisko wodne.

10. Badania symulacyjne obciążeń mostów pływających o różnych strukturach łączenia bloków pontonowych

10.1. Modele badawcze

Badania symulacyjne zostały przeprowadzone w zakresie umożliwiającym wyznaczenie różnic w obciążeniach konstrukcji mostu pontonowego wynikających ze zmiany sposobu łączenia poszczególnych bloków. Podczas badań własnych, konstrukcję odniesienia stanowił park mostowy IRB, którego model numeryczny został opracowany w poprzednich rozdziałach pracy. Stanowił on podstawę do rozważań w zakresie analizy porównawczej, w której uwzględniono zaproponowane, autorskie modele rozwiązań mostów pontonowych różniących się sposobem łączenia bloków pontonowych i wartością zastępczej sztywności giętnej przy zachowaniu geometrii poszycia oraz właściwości masowych konstrukcji IRB.

Zgodnie z wynikami analizy przedstawionej w podrozdziale 2.1, sposób ukształtowania połączeń pomiędzy blokami pontonowymi wpływa na charakterystykę ugięcia mostu, a w konsekwencji na rozkład sił wyporu działających na niego. Zmniejszenie ugięcia konstrukcji, wynikające z eliminacji luzów występujących w połączeniach bloków pontonowych, przy niezmienionej zastępczej sztywności giętnej, prowadzi do zmniejszenia wartości zanurzenia konstrukcji w miejscu usytuowania pojazdu oraz do zwiększenia zanurzenia w strefach przed i za pojazdem. Taka sytuacja powoduje zwiększenie długości roboczej konstrukcji oraz wzrost ramienia działania sił wyporu w odniesieniu do mostu, w którym występują luzy w połączeniach bloków. Powinno to skutkować zwiększeniem wartości momentów przekrojowych generowanych w konstrukcji rozpatrywanego mostu pontonowego. Zatem zastępując połączenia przegubowe połączeniami sztywnymi, czyli eliminując luzy w węzłach konstrukcyjnych, należy oczekiwać zmiany rozkładu sił wyporu działających na most, a w konsekwencji zmiany wartości momentów przekrojowych w sposób wynikający nie tylko ze zmodyfikowanej struktury połączeń, lecz również ze zmiany parametrów geometrycznych konstrukcji.

W celu weryfikacji powyższych tez opracowano, z myślą o przeprowadzeniu badań porównawczych, obiekty do badań umożliwiających ocenę wpływu zmiany rodzaju połączeń z przegubowych na sztywne przy jednoczesnej minimalizacji zmian rozkładu sił wyporu. Porównanie konstrukcji spełniających ten warunek powinno umożliwić wyodrębnienie różnic w odpowiedzi konstrukcji wynikających wyłącznie ze zmiany struktury połączeń. Założenie to zrealizowano poprzez odpowiednią modyfikację

zastępczej sztywności giętnej modelu numerycznego mostu wyposażonego w połączenia sztywne. Parametr ten dobrano w taki sposób, aby konstrukcja charakteryzowała się rozkładem sił wyporu zbliżonym do występującego w konstrukcji odniesienia (most IRB) przy obciążeniu pojazdem klasy MLC 60, przyjmując jako miarę tego rozkładu wartość zanurzenia statycznego. Takie podejście umożliwiło przeprowadzenie analiz porównawczych w warunkach zapewniających izolację wpływu zmiany charakterystyki połączeń bloków pontonowych na stan obciążeń wewnętrznych konstrukcji mostu.

Należy zauważyć, że w procesie projektowania możliwości zmiany sztywności giętnej konstrukcji są często ograniczone. W takich sytuacjach wprowadzenie połączeń sztywnych może wpływać na rozkład sił wyporu, a co za tym idzie — na wartości momentów przekrojowych. Konieczne jest więc określenie skali tych zmian przy zachowaniu pierwotnej zastępczej sztywności giętnej. Z tego względu w prowadzonych analizach uwzględniono wariant modelu, charakteryzującego się sztywnością odpowiadającą sztywności konstrukcji odniesienia. Umożliwia to ocenę wpływu zastosowania połączeń sztywnych na wartości momentów przekrojowych przy niezmienionej zastępczej sztywności giętnej.

W związku z powyższym do badań porównawczych przygotowano trzy modele mostów, których geometria poszycia oraz właściwości masowe odpowiadają konstrukcji mostu IRB (rozpatrywany wariant A – konstrukcja odniesienia), lecz różniące się następującymi cechami konstrukcyjnymi:

- wariant B – konstrukcja zmodyfikowana, w której wprowadzono sztywne łączenie bloków pontonowych oraz zastosowano zmienioną wartość zastępczej sztywności giętnej, minimalizującą zmianę rozkładu sił wyporu;
- wariant C – konstrukcja zmodyfikowana, w której wprowadzono sztywne łączenie bloków pontonowych przy niezmienionej wartość zastępczej sztywności giętnej.

Na podstawie analizy konstrukcji mostu IRB przedstawionej w podrozdziale 5.4 oraz wyników wstępnych badań numerycznych wytypowano parametry odniesieniowego (A) i zmodyfikowanych (B i C) wariantów mostu wykorzystane podczas dalszych analiz teoretycznych. Zestawienie tych parametrów wraz z ich wartościami zamieszczono w Tabela 10.1.

Tabela 10.1. Parametry odniesieniowego (A) i zmodyfikowanych (B i C) rozwiązań konstrukcji mostu do badań numerycznych.

parametr	oznaczenie	A	B	C
Konstrukcja połączenia		przegubowa	sztywna	sztywna
Zanurzenie statyczne ML 60	$y_{min}(V \to 0)[m]$	0,53	0,53	0,47
Zastępcza sztywność giętna	$\left(\frac{1}{k_c}+\frac{l}{EI}\right)^{-1}\left[\frac{Nm}{rad}\right]$	$9{,}52 \cdot 10^7$	$3{,}72 \cdot 10^7$	$9{,}52 \cdot 10^7$
Kąt graniczny w przegubie	α_g [°]	0,4	-	-

Przygotowano modele numeryczne (warianty A, B i C), zgodnie z wytypowanymi rodzajami konstrukcji połączenia, wartościami zastępczej sztywności kątowej oraz kąta granicznego w przegubie.

10.2. Plan badań

Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla każdego z analizowanych rozwiązań konstrukcyjnych mostów pontonowych (warianty A, B i C) uwzględniając prędkości ruchu w zakresie 1 – 30 km/h oraz klasy obciążeń pojazdów MLC 30 i MLC60 (Tabela 10.2).

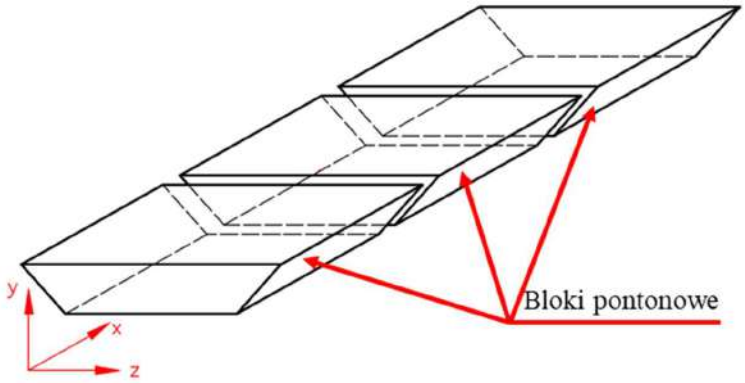
Tabela 10.2. Zestawienie prędkości i klas obciążeń pojazdów stosowanych podczas badań numerycznych

Klasa pojazdu	Prędkość pojazdu [km/h]						
MLC 30	1	5	10	15	20	25	30
MLC 60	1	5	10	15	20	25	30

Podczas obliczeń zasadniczą uwagę skupiono na wyznaczeniu wartości parametrów charakteryzujących pracę konstrukcji mostu pontonowego pod obciążeniem ruchomym, w tym:

- momentów gnących działających względem osi 0z: M_z;
- przebiegu zanurzenia w kierunku osi 0y.

Schemat zorientowania rozpatrywanych mostów względem układu odniesienia zaprezentowano na Rys. 10.1



Rys. 10.1. Orientacja układu odniesienia, względem którego dokonywano pomiarów momentów gnących oraz przemieszczeń.

Podczas wyznaczania obciążeń analizowanych konstrukcji za parametr o kluczowym znaczeniu przyjęto wartość momentu gnącego działającego względem osi 0z - M_z. Wartość tego momentu wynika ze wzajemnego oddziaływania sił reakcji środowiska wodnego oraz sił ciężkości, których rozkład generuje momenty składowe, stanowiące zasadniczy składnik obciążenia przekroju mostu. W przeprowadzonych analizach pominięto pozostałe składowe momentów gnących mając na uwadze założone na etapie budowy modeli obliczeniowych: symetryczny układu obciążenia poszczególnych bloków oraz brak oddziaływania na konstrukcję nurtu wody. Nie uwzględniano zatem momentów działających względem osi $0y$, które mogłyby występować w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych na skutek oddziaływania przepływu cieczy. Należy jednak podkreślić, że oddziaływania tego rodzaju nie mają charakteru decydującego dla nośności analizowanej konstrukcji, gdyż w istniejących rozwiązaniach mostów pontonowych stosuje się systemy kotwiczenia skutecznie ograniczające wpływ nurtu wody. Pominięto również momenty działające względem osi $0x$, ponieważ ich wpływ, z uwagi niewielkie wartości spowodowane działaniem sił na relatywnie małych ramionach, na stan obciążenia konstrukcji ma charakter drugorzędny.

Siły normalne oddziałujące na elementy nośne konstrukcji mostów wynikają przede wszystkim z przenoszenia wyznaczonych wcześniej momentów gnących M_z. Jednoznaczne określenie zależności pomiędzy tymi wielkościami wymaga przyjęcia dodatkowych założeń dotyczących geometrii bloków pontonowych. Z uwagi na dążenie do sformułowania możliwie ogólnego opisu obciążeń działających na konstrukcję mostu, prowadzoną analizę ograniczono do uwzględnienia momentów gnących. Na podstawie wyników przeprowadzonych symulacji numerycznych wyznaczano wartości tych momentów przenoszonych przez połączenie sąsiadujących bloków pontonowych

zlokalizowanych w środku mostu. Parametr ten przyjęto jako reprezentatywny dla analizy momentów gnących w całej konstrukcji.

Jako osobne zagadnienie rozpatrzono przemieszczenia bloku pontonowego mostu wzdłuż osi 0z (zanurzenie), istotne z punktu widzenia jego pracy w warunkach nurtu rzeki. Wyznaczenie zanurzenia jest istotne z dwóch powodów:

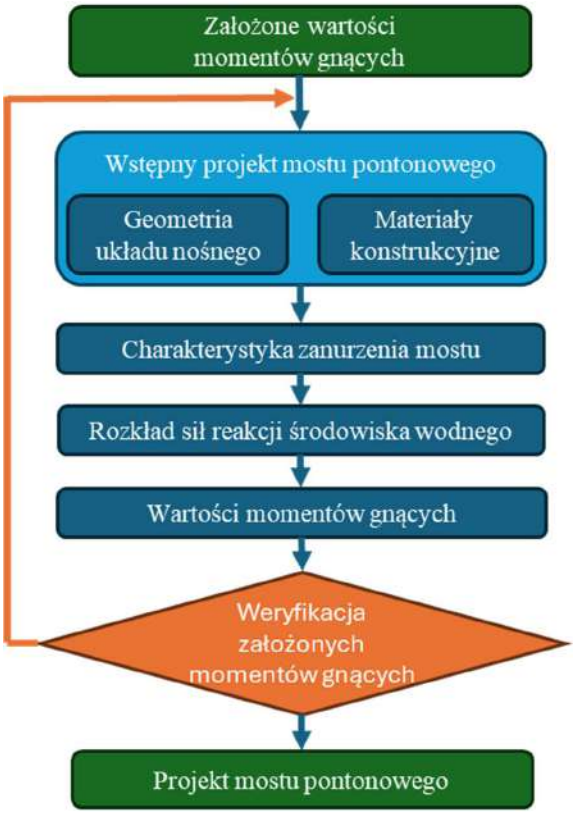
- pozwala na określenie zapasu pływalności;
- pozwala na określenie na możliwości wystąpienia hydrodynamicznych momentów destabilizujących

Pomimo faktu, że w modelu uogólnionym fali czołowej wyznaczono również przemieszczenia lustra wody powstające w czasie przeprawiania pojazdu, ich uwzględnienie podczas wyliczania zanurzenia byłoby niezasadne. Wynika to z wykazanej w podrozdziale 6.3 zmienności charakterystyki falowania. Podczas analiz numerycznych przyjęto wariant falowania wody generujący największe różnice między zanurzeniem pozornym a rzeczywistym. W większości przypadków dolina fali występowała w miejscu największego zanurzenia, co prowadziło do zwiększenia wysokości wolnej burty. Istnieje zatem istotne ryzyko, że w warunkach rzeczywistych wystąpi inna charakterystyka fali, powodująca zmniejszenie wysokości wolnej burty. Zatem przyjęcie przemieszczenia fali jako parametru odniesienia mogłoby prowadzić, do zmniejszenia wiarygodności uzyskanych wyników obliczeń. Jednocześnie należy zaznaczyć, że w wyniku niekorzystnych oddziaływań hydrodynamicznych należy liczyć się z występowaniem momentu wywracającego w przypadku mimośrodowego obciążenia konstrukcji, zwłaszcza przy dużej prędkości nurtu i niewielkiej głębokości przeszkody wodnej (zjawisko opisano w podrozdziale 2.1). Mechanizm powstawania momentu destabilizującego wynika ze zmiany przekroju przepływu wody pod kadłubem mostu, będącej konsekwencją jego przemieszczeń pionowych względem dna przeszkody. Intensywność tego zjawiska nie zależy więc od falowania swobodnej powierzchni wody. W związku z tym w badaniach własnych analizowano przemieszczenia pionowe elementów mostu z pominięciem chwilowego położenia zwierciadła wody.

10.3. Metodyka oceny wyników badań

W przypadku rozpatrywanych konstrukcji mostów pontonowych, ocena wyników obliczeń momentów gnących M_z ma kluczowe znaczenie w procesie ich projektowania, ponieważ bezpośrednio wpływa na wynik kształtowania konstrukcji nośnej bloków pontonowych. Ich wartości w głównej mierze determinują wymaganą wytrzymałość konstrukcji mostu i połączeń pomiędzy jego segmentami, a tym samym mają znaczący

wpływ na masę całej konstrukcji. Zasadniczym problemem projektowym w tym przypadku jest sposób ukształtowania struktury nośnej mostu wpływającej na charakterystykę jego zanurzenia. Zatem zarówno zmiany wartości momentów gnących, jak i zanurzenia mostu muszą być uwzględnione w procesie kształtowania jego struktury nośnej. Oczywiście między tymi dwiema wielkościami występują wzajemne zależności, co najczęściej wiąże się z koniecznością stosowania iteracyjnej metody obliczeniowej w procesie konstruowania uwzględniającego warunki założonej nośności mostu. Proces ten charakteryzuje się koniecznością uwzględnienia szeregu wzajemnych powiązań cech konstrukcyjnych i momentów gnących, co zilustrowano na Rys. 10.2.

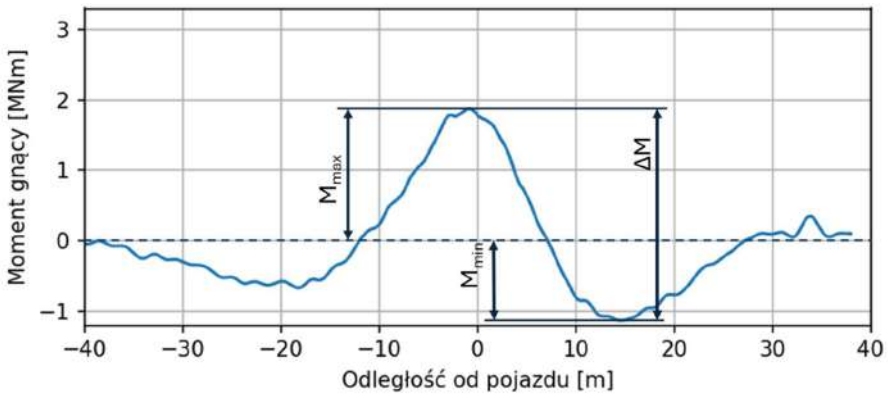


Rys. 10.2. Wizualizacja wzajemnych powiązań cech konstrukcyjnych i momentów gnących podczas projektowania mostu pontonowego

Opracowany podczas realizacji niniejszej pracy autorski model obliczeniowy umożliwia wyznaczenie momentów gnących powstających w konstrukcji mostu pontonowego podczas dynamicznego obciążenia ruchem pojazdów, bez konieczności wykonywania prototypu konstrukcji. Uzyskane wyniki badań pozwalają na powiązanie sztywności giętnej mostu oraz właściwości połączeń pomiędzy blokami pontonowymi

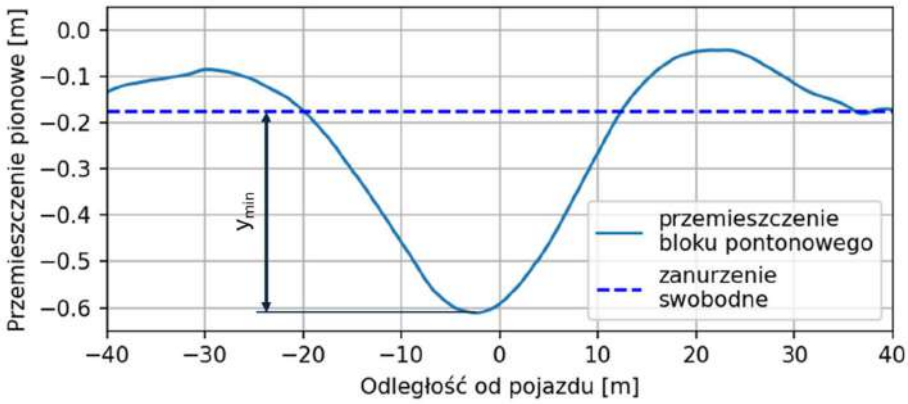
z wartościami momentów gnących występujących w trakcie przeprawiania wybranych pojazdów o różnych masach, poruszających się z różnymi prędkościami.

Opracowane przebiegi momentów gnących analizowano pod kątem ich wartości maksymalnych M_{max} i minimalnych M_{min}, determinujących wymaganą wytrzymałość konstrukcji bloków pontonowych na zginanie oraz wytrzymałość elementów ich połączeń. Dodatkowo analizie poddano zakres zmienności momentu ΔM, mający decydujące znaczenie w ocenie trwałości zmęczeniowej. Przykładowy przebieg momentu gnącego w połączeniu bloków pontonowych, wraz z oznaczonymi wartościami M_{max}, M_{min} i ΔM, przedstawiono na Rys. 10.3.



Rys. 10.3. Przykładowy przebieg zmian momentu gnącego mostu w funkcji odległości od środka ciężkości pojazdu, zarejestrowany dla wariantu *B* obciążonego pojazdem MLC 60 poruszającym się z prędkością 25 km/h, obrazujący sposób interpretacji wartości maksymalnej $M_{\max}$, minimalnej $M_{\min}$ i zakresu zmienności momentu ΔM

Oceny wartości przemieszczeń dokonano z uwzględnieniem ich maksymalnej amplitudy w kierunku pionowym (w dół) względem zanurzenia swobodnego, wyrażonej poprzez minimalne przemieszczenie pionowe $y_{\min}$ (Rys. 10.4).



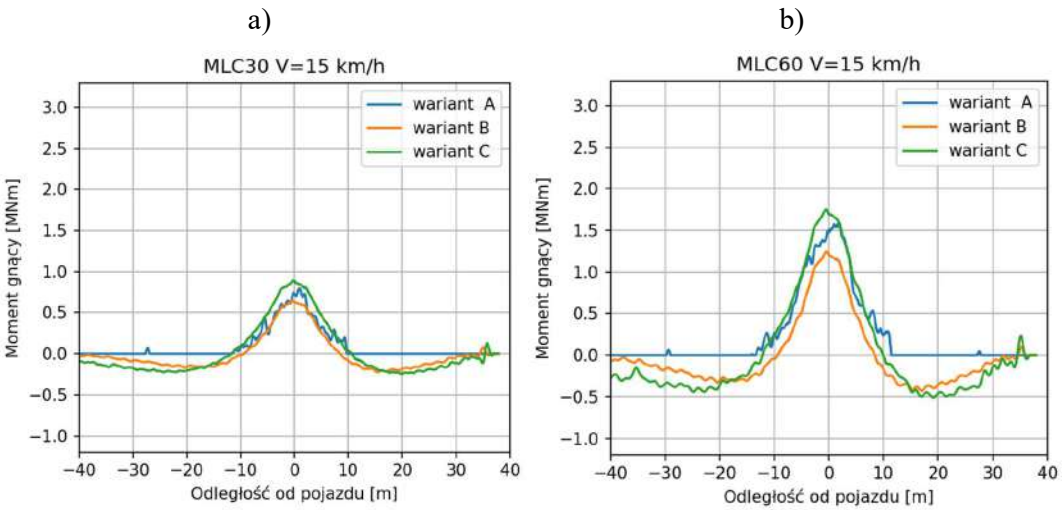
Rys. 10.4. Przykładowy przebieg przemieszczeń bloku pontonowego, zarejestrowany dla wariantu B obciążonego pojazdem MLC 60 poruszającym się z prędkością 25km/h, obrazujący sposób interpretacji wartości minimalnej y_{min}

Wysokość wolnej burty jest definiowana, jako różnica pomiędzy maksymalnym przemieszczeniem pionowym a wysokością bloku pontonowego, w przypadku mostu IRB wynosi 0,78 m [14]. Wartość parametru y_{min} oceniano pod kątem spełnienia warunku ograniczenia przemieszczeń, tj. nieprzekroczenia przyjętej wysokości bloku pontonowego.

10.4. Wyniki badań

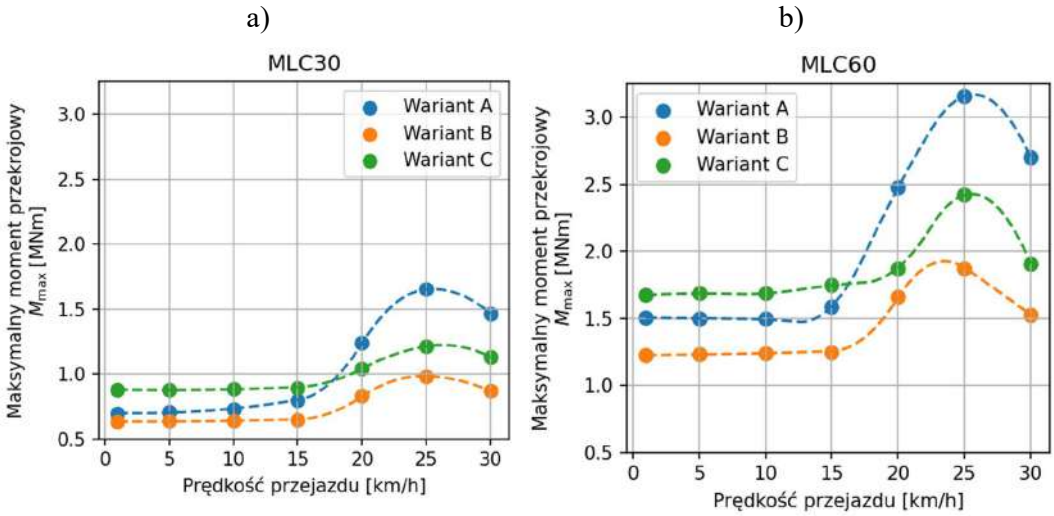
10.4.1. Momenty gnące

Przeprowadzone zgodnie z planem badań symulacje pozwoliły na wyznaczenie przedbiegów momentów gnących w połączeniu bloków pontonowych. Wartości wyznaczono dla analizowanych wariantów konstrukcji mostów A, B i C. Przykładowe wykresy ilustrujące zmiany tych momentów gnących dla wybranego połączenia w funkcji położenia pojazdów MLC 30 i MLC 60 przemieszczających się z prędkością 15 km/h, przedstawiono na Rys. 10.5.



Rys. 10.5. Przykładowe przebiegi momentów gnących zarejestrowane dla analizowanych wariantów konstrukcyjnych przy obciążeniu pojazdami przemieszczającymi się z prędkością 15 km/h: a) obciążenie pojazdem MLC 30, b) obciążenie pojazdem MLC 60

Zbiorcze zestawienie wyliczonych wartości maksymalnych momentów gnących $M_{\max}$ występujących dla różnych mas i prędkości pojazdów oraz rozpatrywanych wariantów mostów (A, B i C) przedstawiono na Rys. 10.6. Trend zmian wyznaczono przy użyciu wygładzającej funkcji sklejanej (spline) stopnia drugiego.



Rys. 10.6. Zestawienie maksymalnych wartości momentów gnących wyznaczonych w połączeniu bloków pontonowych, w funkcji prędkości przejazdu, zarejestrowanych dla różnych wariantów konstrukcyjnych mostów (A, B i C): a) pojazd klasy MLC 30 b) pojazd klasy MLC60

Wartości liczbowe maksymalnego momentu gnącego przedstawiono w Tabela 10.3.

Tabela 10.3. Wartości maksymalnych momentów gnących wyznaczonych w połączeniach bloków pontonowych, zarejestrowane dla różnych wariantów konstrukcyjnych mostów (A, B i C) oraz klas (MLC 30 i MLC 60) i prędkości pojazdów

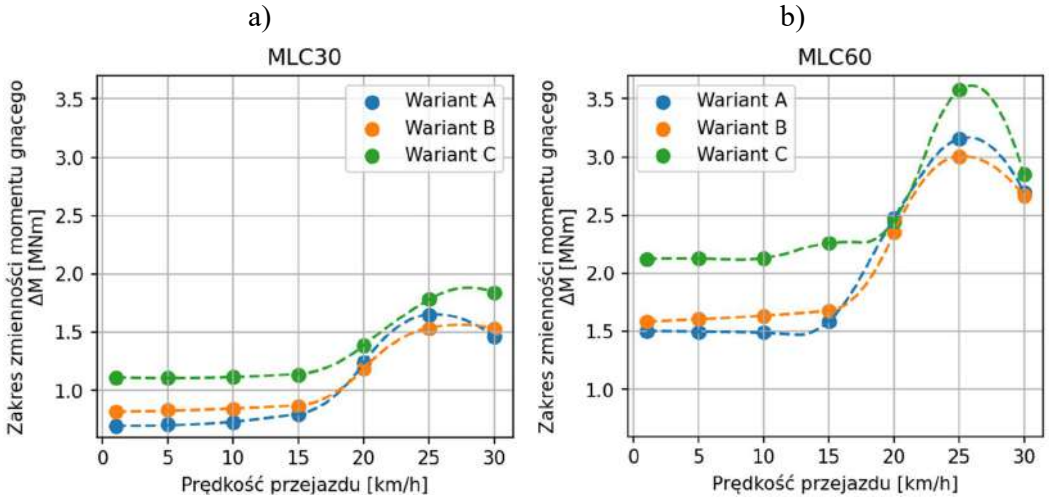
MLC	Prędkość [km/h]	Moment maksymalny [MN·m]		
		Wariant A	Wariant B	Wariant C
30	1	0,697	0,63	0,876
30	5	0,709	0,639	0,881
30	10	0,73	0,639	0,882
30	15	0,796	0,645	0,892
30	20	1,238	0,831	1,045
30	25	1,651	0,983	1,213
30	30	1,465	0,868	1,129
60	1	1,505	1,222	1,674
60	5	1,497	1,234	1,686
60	10	1,496	1,24	1,684
60	15	1,583	1,248	1,75
60	20	2,477	1,658	1,871
60	25	3,157	1,874	2,424
60	30	2,699	1,523	1,906

W przypadku pojazdu MLC 30, dla prędkości poniżej 15 km/h, wartości momentów gnących zmieniają się w relatywnie niewielkim zakresie. Najmniejsze wartości momentu gnącego, około 0,6 MN·m, uzyskano dla wariantu sztywnego B. Dla wariantu przegubowego A wartości te mieszczą się w przedziale 0,7–0,8 MN·m, natomiast największe wartości, wynoszące około 0,9 MN·m, występują dla wariantu sztywnego C.

Po przekroczeniu prędkości 20 km/h największy wzrost momentów gnących obserwuje się dla wariantu przegubowego A, dla którego przy prędkości 25 km/h wartość maksymalnego momentu osiąga wartość około 1,65 MN·m.

W przypadku pojazdu MLC 60 przebiegi zmian rozpatrywanych momentów mają zbliżony charakter, jednak ich wartości są około dwukrotnie większe. Dla małych prędkości, do 15 km/h, najmniejsze wartości momentu gnącego, około 1,25 MN·m, uzyskano dla wariantu sztywnego B. Dla wariantu przegubowego A wartości te mieszczą się w przedziale 1,5–1,6 MN·m, natomiast największe wartości wynoszą 1,7 – 1,8 MN·m i występują dla wariantu sztywnego C. Dla prędkości powyżej 20 km/h wystąpił znaczący wzrost wyliczonych momentów. Największą z ich wartości obserwuje się dla wariantu przegubowego A, dla którego przy prędkości 25 km/h moment gnący wynosi około 3,2 MN·m.

Analizie poddano także zakresy zmian momentów gnących ΔM dla różnych mas i prędkości pojazdów oraz wariantów porównawczych mostu, a ich wyliczone wartości przedstawiono na Rys. 10.7. Trendy zmian wyznaczono przy użyciu wygładzającej funkcji sklejanej (spline) drugiego stopnia.



Rys. 10.7. Zestawienie zakresu zmian maksymalnego momentu gnącego w połączeniach bloków pontonowych w funkcji prędkości przejazdu, zarejestrowane dla różnych wariantów konstrukcyjnych mostu (A, B i C): a) pojazd klasy MLC 30 b) pojazd klasy MLC60

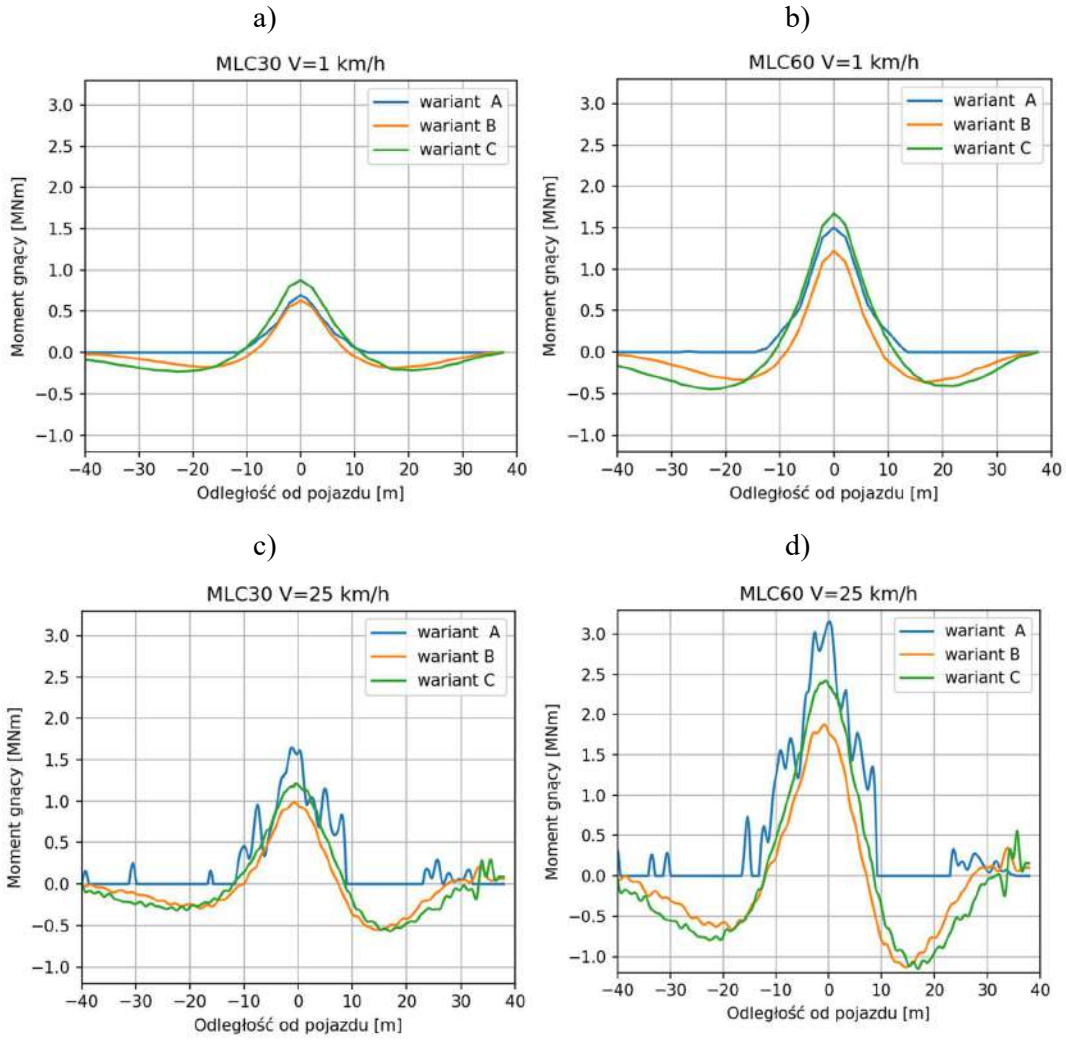
Wartości liczbowe zakresu zmienności momentu gnącego przedstawiono w Tabela 10.4.

Tabela 10.4. Wartości zakresu zmienności momentu gnącego mierzonego w połączeniu bloków pontonowych, zarejestrowane dla różnych wariantów konstrukcyjnych mostu oraz klas i prędkości pojazdów

MLC	Prędkość [km/h]	Zakres zmienności momentu [M**N·m**]		
		Wariant A	Wariant B	Wariant C
30	1	0,697	0,817	1,109
30	5	0,709	0,833	1,11
30	10	0,73	0,844	1,117
30	15	0,796	0,869	1,137
30	20	1,238	1,191	1,385
30	25	1,651	1,536	1,785
30	30	1,465	1,535	1,84
60	1	1,505	1,583	2,123
60	5	1,497	1,611	2,127
60	10	1,496	1,634	2,13
60	15	1,583	1,674	2,264
60	20	2,477	2,349	2,446
60	25	3,157	3,005	3,577
60	30	2,699	2,665	2,848

Podobnie jak w przypadku wartości maksymalnych momentu, zakres zmienności momentu gnącego dla prędkości do 15 km/h pozostaje dla obu pojazdów na zbliżonym poziomie i nie wykazuje istotnej zależności od prędkości przejazdu. Po przekroczeniu 20 km/h widoczny jest jednak wyraźny wzrost wartości ΔM. W całym przedziale prędkości, dla obu klas obciążeń, największe wartości wyznaczono dla wariantu C. Warianty A i B utrzymują się na zbliżonym poziomie. Dla MLC30 największy zakres zmienności momentu wyznaczono dla wariantu C przy 30 km/h i wyniósł 1,9 MN·m, natomiast dla MLC60 wartość największa została zarejestrowana dla prędkości 25 km/h i wyniosła 3,6 MN·m.

W celu przeprowadzenia pogłębionej analizy uzyskanych wyników, na Rys. 10.8 przedstawiono przebiegi momentów gnących w połączeniach bloków pontonowych w funkcji odległości od położenia pojazdu. Dotyczą one symulacji przeprowadzonych dla obciążeń odpowiadających klasom MLC 30 i MLC 60, przy prędkościach minimalnych oraz przy prędkościach dla których uzyskano największe wartości momentu gnącego.



Rys. 10.8. Zestawienie przebiegów momentów gnących: a) Obciążenie pojazdem MLC30 jadącym z prędkością 1 km/h, b) obciążenie pojazdem MLC60 jadącym z prędkością 1 km/h; c) Obciążenie pojazdem MLC30 jadącym z prędkością 25 km/h, d) obciążenie pojazdem MLC60 jadącym z prędkością 25 km/h

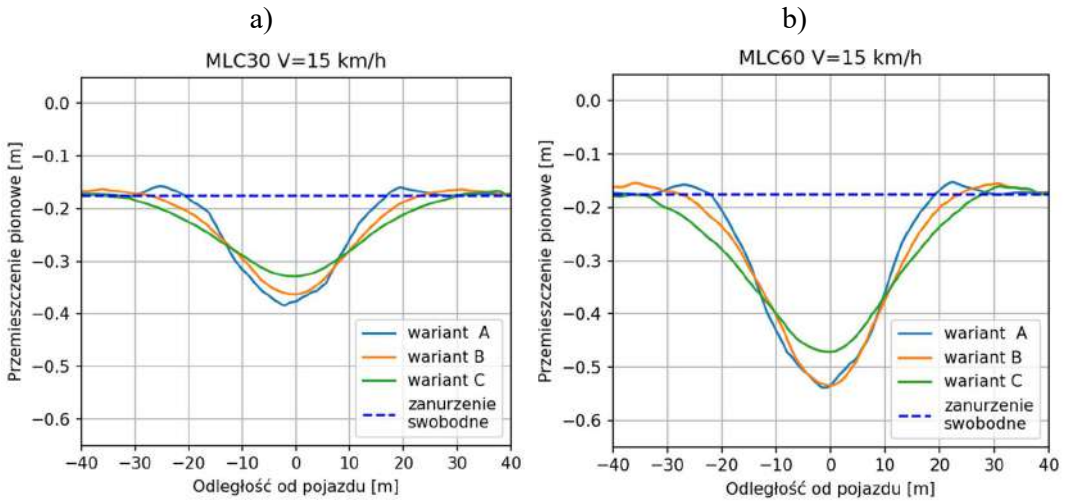
Zgodnie z wynikami wcześniejszej analizy, dla małych prędkości przejazdu największe wartości momentów gnących występują w wariancie sztywnym C, jednak wraz ze wzrostem prędkości obserwuje się wyraźne chwilowe wahania wartości momentu gnącego. Dla prędkości pojazdu powyżej 20 km/h największe wartości momentów gnących występują w wariancie A. Właściwość ta wynika z obciążeń dynamicznych pojawiających się w połączeniach bloków pontonowych w momencie wybierania luzów.

W przypadku wariantów B i C, w obszarach zlokalizowanych przed i za pojazdem, na skutek braku przegubów występują momenty gnące o przeciwnym zwrocie wektorów tychże momentów względem momentów występujących bezpośrednio w strefie

oddziaływania pojazdu. Prowadzi to do istotnego zwiększenia zakresu zmienności momentu gnącego w przypadku konstrukcji sztywnych.

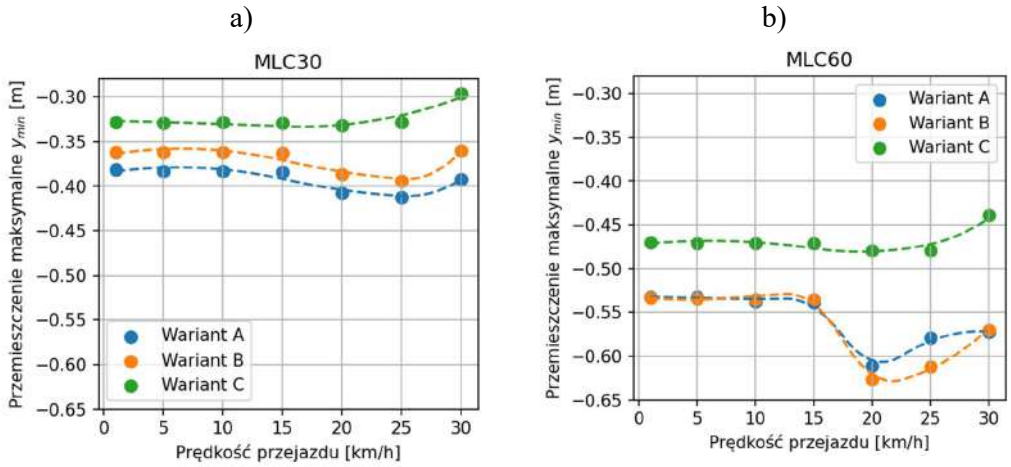
10.4.2. Przemieszczenia pionowe mostu

Wyniki przeprowadzonych symulacji numerycznych umożliwiły również opracowanie przebiegów zmian przemieszczeń pionowych bloku pontonowego dla rozważanych wariantów konstrukcyjnych (A, B i C) podczas obciążenia przemieszczającymi się z różnymi prędkościami pojazdami MLC 30 i MLC 60. Przykładowe wykresy tych przemieszczeń opracowane dla prędkości 15 km/h przedstawiono na Rys. 10.9.



Rys. 10.9. Przykładowe przebiegi przemieszczeń pionowych zarejestrowane dla analizowanych wariantów konstrukcyjnych przy obciążeniu pojazdami przemieszczającymi się z prędkością 15 km/h: a) obciążenie pojazdem MLC 30, b) obciążenie pojazdem MLC 60

Zbiorcze zestawienie maksymalnych przemieszczeń pionowych bloku pontonowego dla różnych mas i prędkości pojazdów oraz wariantów porównawczych mostu przedstawiono na Rys. 10.10. Również w tym przypadku trend zmian wyznaczono przy użyciu wygładzającej funkcji sklejanej (spline) drugiego stopnia.



Rys. 10.10. Zestawienie maksymalnych przemieszczeń pionowych bloku pontonowego w funkcji prędkości przejazdu, zarejestrowanych dla różnych klas obciążeń pojazdów oraz wariantów konstrukcyjnych mostu: a) pojazd klasy MLC 30, b) pojazd klasy MLC60

Wartości liczbowe maksymalnych przemieszczeń pionowych przedstawiono w Tabela 10.5.

Tabela 10.5. Wartości maksymalnych przemieszczeń pionowych zarejestrowane dla różnych wariantów konstrukcyjnych mostu oraz klas i prędkości pojazdów

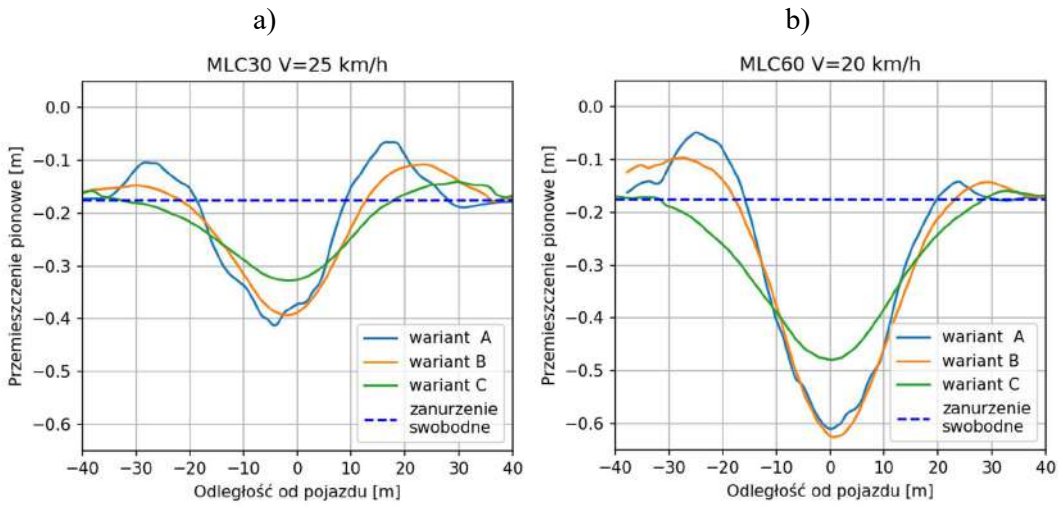
MLC	Prędkość [km/h]	Maksymalne przemieszczenia pionowe [m]		
		Wariant A	Wariant B	Wariant C
30	1	-0,381	-0,362	-0,328
30	5	-0,383	-0,362	-0,329
30	10	-0,383	-0,362	-0,329
30	15	-0,384	-0,363	-0,329
30	20	-0,408	-0,387	-0,332
30	25	-0,413	-0,394	-0,328
30	30	-0,392	-0,361	-0,296
60	1	-0,532	-0,534	-0,47
60	5	-0,533	-0,534	-0,471
60	10	-0,538	-0,535	-0,471
60	15	-0,539	-0,535	-0,471
60	20	-0,611	-0,627	-0,48
60	25	-0,579	-0,612	-0,479
60	30	-0,573	-0,57	-0,439

W przypadku pojazdu klasy MLC 30, w całym analizowanym zakresie prędkości, największe zanurzenie bloku pontonowego występuje dla wariantu A, wartości pośrednie uzyskano dla wariantu B, natomiast najmniejsze — dla wariantu C. W wariantach A i B obserwuje się niewielki wzrost zanurzenia (o około 10 %) względem niskich prędkości wraz ze wzrostem prędkości w zakresie od 20 km/h do 25 km/h. Dla wszystkich analizowanych wariantów konstrukcyjnych przy prędkości 30 km/h występuje wyraźne zmniejszenie wartości maksymalnych przemieszczeń pionowych. Wariant C

charakteryzuje się najbardziej stabilnym przebiegiem odpowiedzi oraz najmniejszą wrażliwością na zmianę prędkości przejazdu.

Dla pojazdu klasy MLC 60 obserwuje się zbliżony charakter zmian, przy czym wzrost maksymalnych przemieszczeń pionowych, po przekroczeniu prędkości 20 km/h, w wariantach konstrukcyjnych A i B jest większy niż dla wariantu C o około 15 %. Największe zanurzenie zarejestrowano dla wariantów A i B przy prędkości 20 km/h, odpowiednio –0,61 m i –0,63 m. Również w tym przypadku wariant C w całym analizowanym zakresie prędkości generuje najmniejsze zanurzenie oraz najbardziej równomierny przebieg odpowiedzi dynamicznej. W żadnym z analizowanych przypadków nie przekroczone zostało zanurzenie maksymalne wyznaczone przez zapas wyporności.

Na Rys. 10.11 zestawiono przebiegi przemieszczeń pionowych w funkcji odległości od położenia pojazdu dla pojazdów MLC 30 i MLC 60 poruszających się z prędkościami, przy których odnotowano największe przemieszczenia pionowe.



Rys. 10.11. Przebiegi przemieszczeń pionowych w warunkach powodujących wystąpienie największych przemieszczeń pionowych: a) obciążenie pojazdem MLC 30 poruszającym się z prędkością 25 km/h, b) obciążenie pojazdem MLC 60 poruszającym się z prędkością 20 km/h

Na podstawie przedstawionych przebiegów przemieszczeń pionowych można stwierdzić, że dla obu rozpatrywanych klas obciążeń, konstrukcja mostu według wariantu A osiąga największe maksymalne zanurzenie, a jednocześnie wykazuje największe wychylenia w kierunku dodatnich wartości na osi 0z. W przypadku wariantu B, pomimo zbliżonej wartości maksymalnego zanurzenia, zaobserwowano mniejszą niż dla wariantu A amplitudę przemieszczeń w kierunku dodatnich wartości na osi 0z. Najmniejsze

wartości maksymalnego zanurzenia, jak i amplitudy przemieszczeń konstrukcji mostu w kierunku dodatnich wartości na osi 0z uzyskano dla wariantu konstrukcyjnego C.

Szczegółowe zestawienie wyrażonych procentowo zmian maksymalnych wartości analizowanych parametrów (maksymalnego przemieszczenia pionowego, maksymalnego momentu gnącego i zakresu zmienności momentu gnącego w całym zakresie prędkości przejazdu) uzyskanych w wyniku zastąpienia wariantu konstrukcyjnego A wariantem B oraz wariantu A wariantem C przedstawiono w Tabela 10.6.

Tabela 10.6. Zestawienie procentowych zmian maksymalnych wartości analizowanych parametrów w całym zakresie prędkości przejazdu, wyznaczonych dla przejścia z wariantu konstrukcyjnego A na wariant B oraz z wariantu A na wariant C. Zmniejszenie wartości parametru, interpretowane jako efekt korzystny, oznaczono kolorem zielonym, natomiast zwiększenie wartości, interpretowane jako efekt niekorzystny, oznaczono kolorem czerwonym

Parametr	Porównanie wpływu zmiany konstrukcyjnej wariantów na zmianę wartości parametrów [%]			
	A → B		A → C	
	MLC30	MLC60	MLC30	MLC60
Maksymalne przemieszczenie pionowe	-4,6	+3,6	-18,9	-20,8
Maksymalny moment gnący	-40,5	-39,2	-26,1	-23,4
Zakres zmienności momentu gnącego	-5,4	-5,1	+13,8	+14,1

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że w przypadku przeprawiania obu analizowanych klas pojazdów MLC 30 i MLC 60 zastosowanie wyłącznie sztywnego połączenia bloków pontonowych, przy jednoczesnym zredukowaniu sztywności giętnej E·I, zapewnia:

- uzyskanie większej stabilności konstrukcji mostu charakteryzującej się mniejszym zakresem jego przemieszczeń pionowych,
- ograniczenie wartości maksymalnych momentów gnących w osi 0z o 39,2% (dla MLC 60 i prędkości 25 km/h)
- ograniczenie o 5,1 % wartości zakresu zmienności momentów gnących w połączeniach bloków.

Wprowadzenie sztywnego łączenia bloków (bez luzów) i zachowanie niezmienionej sztywności giętnej zapewnia:

- ograniczenie zanurzeń maksymalnych o 21%.
- ograniczenie maksymalnych momentów gnących w połączeniach bloków o 23,4 % (dla MLC 60 i prędkości 25 km/h).

– zwiększenie o 14,1 % wartości zakresu zmienności momentów w połączeniach bloków.

11. Podsumowanie i wnioski końcowe

Praca niniejsza w przeważającej części zawiera wyniki autorskich badań doświadczalnych i symulacji numerycznych dotyczących mostów pontonowych w zakresie wpływu hydrodynamicznego oddziaływania wody na praktyczne aspekty ich użytkowania z uwzględnieniem zaproponowanych modyfikacji istniejących rozwiązań konstrukcyjnych.

Wyniki przeprowadzonej na wstępie analizy istniejących konstrukcji oraz przeglądu literatury dotyczącej rozwoju mostów pontonowych wskazały na występowanie złożonych zależności pomiędzy parametrami konstrukcyjnymi obiektu, oddziaływaniami środowiska wodnego a ograniczeniami taktycznymi wynikającymi z wymagań stawianych tego typu konstrukcjom. Efektem tego etapu realizacji pracy było zidentyfikowanie luki badawczej w zakresie wpływu sposobu łączenia bloków pontonowych na stan obciążeń konstrukcji mostów pontonowych typu wstęga. Przeprowadzone analizy wykazały zarazem, że badania w tym obszarze prowadzone są głównie z wykorzystaniem metod numerycznych, co wynika ze złożoności rozpatrywanego problemu oraz trudności w jego opisie analitycznym. Podejście to umożliwia redukcję liczby ograniczeń upraszczających. Skłoniło to Autora do opracowania modelu numerycznego mostu, opartego na metodzie układów wieloczłonowych, umożliwiającego analizę zróżnicowanych konfiguracji połączeń bloków pontonowych. W modelu tym uwzględniono zasadnicze parametry rozpatrywanej konstrukcji, takie jak: sztywność giętną konstrukcji nośnej, sztywność kątową elementów łączących oraz luzy graniczne występujące w przegubach łączących poszczególne bloki. Na podstawie wyników przeprowadzonej analizy danych literaturowych zidentyfikowano wartości tych parametrów dla konstrukcji odniesienia w postaci mostu IRB.

W dostępnej literaturze przedmiotu brakuje informacji umożliwiających wyznaczenie charakterystyk hydrodynamicznych mostów pontonowych, a w konsekwencji wiarygodne odwzorowanie zjawisk zachodzących w obrębie tychże mostów podczas przeprawy pojazdów. W ramach niniejszej pracy zaprojektowano i zbudowano stanowisko laboratoryjne, które wykorzystano do przeprowadzania badań eksperymentalnych oraz opracowano metodykę analizy uzyskanych tą drogą wyników. Na tej podstawie, w początkowym etapie badań teoretycznych, opracowano model matematyczny sił oporu tłumiącego oraz masy towarzyszącej, dedykowany

analizowanemu mostowi pontonowego, na podstawie badań walidacyjnych wykazano poprawne odwzorowanie wymienionych powyżej zjawisk w tymże modelu.

W prezentowanych w literaturze metodykach badań mostów pontonowych pomijany jest aspekt skutków oddziaływania fali czołowej na most pontonowy podczas przeprawy. W ramach przeprowadzonych prac badawczych zidentyfikowano występowanie tego zjawiska, wyznaczono jego przebiegi w warunkach doświadczalnych oraz opracowano model uogólniony, umożliwiający określenie postaci fali dla zróżnicowanych wartości zanurzenia statycznego mostu oraz prędkości poruszania się przeprawianego pojazdu. Wyznaczony uogólniony model fali czołowej został następnie zaimplementowany w opracowanym modelu numerycznym, a przeprowadzona walidacja potwierdziła poprawność zastosowanego odwzorowania.

W celu przeprowadzenia analizy porównawczej w zakresie efektów zróżnicowania rozwiązań konstrukcyjnych mostów pontonowych zaproponowano trzy warianty konstrukcji mostu, które przy zachowaniu tych samych: geometrii poszycia oraz właściwości masowych, różniły się rozwiązaniem wybranych cechami. Pozwoliło to ocenić skutki zmiany sposobu łączenia bloków pontonowych przy niezmienionym rozkładzie sił wyporu, a także modyfikacji połączeń tychże bloków przy zachowaniu zastępczej sztywności giętnej konstrukcji. Wyniki analizy praktycznych aspektów zastosowania zaproponowanych wariantów konstrukcji mostu umożliwiły określenie wpływu konfiguracji połączeń bloków oraz sztywności konstrukcji nośnej mostu na stan obciążeń jego elementów. W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano między innymi charakterystyki momentów gnących występujących w konstrukcji, a także wartości pionowych przemieszczeń mostu.

Zrealizowanie nakreślonego zakresu pracy umożliwiło osiągnięcie założonych celów pracy - naukowego i utylitarnego. Wykazano, że sposób połączenia bloków pontonowych w istotny sposób wpływa na wartości obciążeń konstrukcji. Uzyskane wyniki potwierdziły także, że zastosowanie połączeń sztywnych prowadzi do ograniczenia maksymalnych momentów gnących oraz zmniejszenia maksymalnych przemieszczeń pionowych bloków pontonowych. Na podstawie wyników badań sformułowano wytyczne projektowe dotyczące uwzględniania sposobu łączenia bloków w mostach pontonowych nowej generacji.

Osobnym obszarem przeprowadzonych badań były prace służące wyznaczeniu wartości momentów gnących dla trzech zaproponowanych wariantów konstrukcji mostu, które poprzedzono opracowaniem metodyki wykorzystania w tym celu przygotowanego

wcześniej modelu numerycznego. W ten sposób możliwym było również zidentyfikowanie zjawisk szczególnie istotnych z punktu widzenia procesu projektowania, a także określenie zakresów prędkości ruchu pojazdów, przy których ich oddziaływanie konstrukcję mostu było najistotniejsze. Na podstawie uzyskanych wyników badań dowiedziono, że projektowanie mostu wymaga właściwego doboru sztywności konstrukcji z uwzględnieniem założonego zanurzenia oraz wymagań wytrzymałościowych. Ponadto stwierdzono występowanie gwałtownych przyrostów momentu gnącego jako skutku efektów dynamicznych pojawiających się podczas wybierania luzów w przegubowych połączeniach bloków pontonowych. Wymienione powyżej rezultaty zrealizowanych badań mogą znaleźć zastosowanie zarówno na etapie projektowania, jak i podczas oceny funkcjonalności rozważanych konstrukcji przeprawowych.

W pracy w szczególności skoncentrowano się na analizie momentów gnących oddziałujących na konstrukcję mostu. W celu wyodrębnienia zjawisk krytycznych z punktu widzenia ich wartości oraz ograniczenia wpływu pozostałych czynników pominięto oddziaływanie nurtu wody oraz wpływ ograniczonej głębokości przeszkody wodnej. Przyjęto także, że konstrukcja nie ulega przechyłom wskutek mimośrodowego obciążenia wywołanego przeprawianymi pojazdami ani w wyniku działania sił generowanych przez system kotwiczenia. Czynniki te nie mają istotnego znaczenia z punktu widzenia wpływu na rozpatrywane właściwości użytkowe mostu, mogą jednak stanowić przedmiot rozważań w szerszej ocenie pracy konstrukcji, zwłaszcza w odniesieniu do jej stateczności.

Uzyskane wyniki badań charakteryzują się znaczącym potencjałem aplikacyjnym. Wyznaczają jednocześnie kierunki dalszych, pogłębionych analiz. Dotyczy to przede wszystkim zagadnień związanych ze statecznością mostu. Na szczególną uwagę zasługuje problem rozkładu sił ciśnienia hydrodynamicznego działających na most w warunkach początkowego przechyłu konstrukcji. Zjawisko to może prowadzić do powstawania momentu pogłębiającego wychylenie mostu, a w konsekwencji do zalania pokładu, zsuwania się transportowanych pojazdów, a nawet utraty stateczności. Szczególnie istotne wydaje się ustalenie, w jaki sposób szerokość i zanurzenie mostu, a także głębokość oraz prędkość nurtu przeszkody wodnej wpływają na wartości tych momentów oraz w jakim zakresie możliwe jest przeciwdziałanie temu zjawisku.

Wyniki przeprowadzonych podczas realizacji niniejszej pracy badań mostów pontonowych typu wstęga umożliwiają sformułowanie następujących wniosków:

1. Na podstawie wyników analizy cech konstrukcyjnych mostu IRB, stanowiącego konstrukcję odniesienia podczas prowadzonych badań własnych, wyznaczono wartości kluczowych wielkości charakteryzujących ten most, w tym:
   - sztywność giętną konstrukcji:
   $$E \cdot I = 7{,}36 \cdot 10^8 \, N \cdot m^2,$$
   - sztywność kątową elementów połączenia bloków pontonowych:
   $$k_{\mathrm{c}} = 7{,}0945 \cdot 10^8 \, \frac{\mathrm{N{\cdot}m}}{rad},$$
   - kąt graniczny w przegubowym łączeniu bloków pontonowych:
   $$\alpha_g = 0{,}4\,°.$$
2. Wyliczone z wykorzystaniem autorskiego modelu numerycznego wartości przemieszczeń pionowych mostu IRB wskazują na wiarygodność dokonanego odwzorowania obiektu rzeczywistego. Walidacji modelu dokonano w odniesieniu do wyników pomiarów przeprowadzonych na rzeczywistej konstrukcji mostu IRB, opublikowanych w pracy [27]. Wyznaczone wskaźniki walidacyjne opisujące różnice pomiędzy wartościami przemieszczeń pionowych uzyskanymi w poszczególnych punktach pomiarowych badanego odcinka mostu wynoszą:
   - współczynnik determinacji: 0,998;
   - różnica maksymalna: 0,022 m;
   - RMSE: 0,00036 m.
3. Analiza przemieszczeń pion owych odcinka mostu pontonowego umożliwiła wyznaczenie modelu matematycznego sił tłumienia lepkiego przez ośrodek wodny, w postaci:
   $$F_{\mathrm{D}} = -\,204653{,}6\,\dot{y} + 321115{,}44\dot{y}^2 - 317362{,}6006\,\dot{y}^3 + 122401{,}61325\dot{y}^4\ [N]$$
   oraz określenie wartości bezwymiarowego współczynnika masy towarzyszącej:
   $$C_{\mathrm{mt}} = 11{,}4$$
4. Na podstawie wyników badań doświadczalnych modelu mostu pontonowego typu wstęga potwierdzono występowanie podczas przejazdu przez most zjawiska fali czołowej. Stwierdzono, że zjawisko to pojawia się przy prędkościach przekraczających 21 km/h. Wykazano również, że jego występowanie istotnie wpływa na wartości zanurzenia bloków pontonowych w zakresie prędkości od 21

do 25 km/h. Zachodzi zatem konieczność uwzględniania zjawiska fali czołowej podczas badań użytkowych konstrukcji mostów pontonowych.

5. Największy wpływ zjawiska fali czołowej na wartość maksymalnego zanurzenia mostu stwierdzono przy prędkości 25 km/h. Występowanie tego zjawiska powodowało zwiększenie maksymalnego zanurzenia rzeczywistego mostu o około 30% w odniesieniu do zanurzenia pozornego.
6. Głębokość dolin fali czołowej generowanej przez poruszający się pojazd klasy MLC 60 jest o około 55–65% większa niż w przypadku przeprawiania pojazdu klasy MLC 30.
7. Wyniki badań doświadczalnych wskazują na niewielki i porównywalny wpływ fali czołowej na wartości maksymalnego zanurzenia rzeczywistego mostu podczas przemieszczania się pojazdów z największą (30 km/h) i najmniejszymi (7,4 – 12 km/h) prędkościami pojazdów klasy MLC30 i MLC60. Niewielka, w przypadku pojazdów przemieszczających się z prędkością 30 km/h, wartość maksymalnego zanurzenia mostu, to wynik zaobserwowanego przy tej prędkości przesunięcia doliny fali czołowej względem miejsca usytuowania pojazdu.
8. Opracowane i zbudowane na potrzeby realizacji pracy stanowiska badawcze umożliwiły przeprowadzenie walidacji modelu symulacyjnego. Walidacja odwzorowania nurzania bloków pontonowych wykazała średni współczynnik korelacji $R = 0{,}994$, średnią różnicę wartości maksymalnego zanurzenia bloku pontonowego odniesioną do amplitudy ruchu $\frac{\delta y_{max}}{R_y} = 5{,}7\%$ oraz średni pierwiastek z błędu średniokwadratowego odniesiony do amplitudy ruchu o wartości $\frac{RMSE}{R_y} = 3{,}0\ \%$. Walidacja charakterystyki przemieszczeń bloku pontonowego w czasie przeprawiania pojazdów wykazała średni współczynnik korelacji $R = 0{,}988$, średnią różnicę wartości maksymalnego zanurzenia bloku pontonowego w chwilowej lokalizacji pojazdu odniesioną do amplitudy ruchu $\frac{\delta y(x=0)}{R_y} = 3{,}396\%$ oraz średni pierwiastek z błędu średniokwadratowego odniesiony do amplitudy ruchu o wartości $\frac{RMSE}{R_y} = 6{,}318\ \%$.
9. Zastosowanie sztywnych połączeń bloków pontonowych w porównaniu z połączeniami przegubowymi, w warunkach takiego samego zanurzenia statycznego, zapewnia większą stabilność konstrukcji mimo niewielkiego wzrostu maksymalnego zanurzenia o 3,6 %. W przypadku połączeń sztywnych

stwierdzono: mniejszą zmienność ruchów pionowych, istotne ograniczenie maksymalnych momentów gnących o 39,2 % oraz mniejszy zakresu zmienności momentów gnących w połączeniach bloków o 5,1%.

10. Wprowadzenie sztywnych połączeń bloków, przy zachowaniu niezmienionej zastępczej sztywności giętnej, zapewnia ograniczenie maksymalnych zanurzeń mostu o 21% oraz maksymalnych momentów gnących w połączeniach o 23,4% w porównaniu z mostem o przegubowym połączeniu bloków. W konstrukcji tego typu stwierdzono również zwiększenie zakresu zmienności momentów gnących o 14%.

Kierunki dalszych badań:

1. Określenie wpływu nurtu rzecznego na obciążenia mostu pontonowego, wynikające zarówno z oddziaływania sił hydrodynamicznych wywołanych przepływem wody, jak i z pracy systemu kotwiczenia. Szczególnego zbadania wymaga ocena wpływu ukształtowania systemu kotwiczenia, a także prędkości nurtu na wartości obciążeń działających na konstrukcję.
2. Wyznaczenie wpływu nurtu na stateczność mostu pontonowego. Wpływ ten może wynikać z oddziaływań hydrodynamicznych pojawiających się w warunkach przechyłu poprzecznego konstrukcji. Wyjaśnienia wymaga w szczególności wpływ prędkości przepływu i głębokości wody, jak również cech geometrycznych mostu pontonowego na jego stateczność w analizowanych warunkach eksploatacyjnych.
3. Określenie obciążeń oraz oceny stateczności mostu pontonowego w warunkach jednoczesnego poruszania się wielu pojazdów po obiekcie. W tym zakresie zasadne jest zbadanie, w jaki sposób ruch wielu pojazdów – zarówno w tym samym kierunku, jak i po przeciwległych pasach ruchu – wpływa na formowanie się fali czołowej oraz na wartości obciążeń oddziałujących na konstrukcję mostu.

Bibliografia

[1] Ministerstwo Obrony Narodowej, Szefostwo Wojsk Inżynieryjnych, 1986, Park pontonowy PP-64, Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej. Warszawa.

[2] Ministerstwo Obrony ZSRR, 1965, Podręcznik do parku pontonowo-mostowego PMP. Moskwa: Wydawnictwo Wojskowe Ministerstwa Obrony ZSRR.

[3] Army Recognition Group, https://www.armyrecognition.com/focus-analysis-conflicts/army/defence-security-industry-technology/russian-army-receives-the-pp-2005-pontoon-bridge-manufactured-by-the-oka-shipyard-11711163?highlight=WyJydXNzaWEiXQ== [dostęp 17.09.2025]

[4] isnet.ru, http://saper.isnet.ru/texnica-2/pmp-m.html [dostęp 15.03.2023]

[5] isnet.ru, http://saper.isnet.ru/texnica-2/pps-84.html [dostęp 20.02.2023]

[6] topwar.ru, topwar.ru/81847-pontonnyy-park-pp-91.html [dostęp 10.02.2025]

[7] Warszawska Grupa Luka&Maro, lukamaro.pl/2019/09/03/most-pontonowy-przez-wisle-w-warszawie-juz-gotowy/ [dostęp 26.11.2019]

[8] Fabryka Samochodów Ciężarowych, 1975, STAR 660M2 Instrukcja obsługi samochodu. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.

[9] forsal.pl, https://g.forsal.pl/p/_wspolne/pliki/4304000/4304476-most-pontonowy-w-warszawie.jpg [dostęp 09.10.2025]

[10] wikipedia.org, upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/eb/PP-64_Wst%C4%99ga_pontoon_ bridge.jpg [dostęp 26.11.2019]

[11] www.wojsko-polskie.pl, https://www.wojsko-polskie.pl/dgrsz/articles/aktualnosci-w/2019-09-101-most-pontonowy-na-wisle/ [dostęp 10.02.2025]

[12] Department of the Army, Waszyngton 1993, Technical manual, operator's and unit maintenance manual, Improved float bridge (ribbon bridge).

[13] army.mil, https://nara.getarchive.net/media/us-army-usa-soldiers-assigned-to-the-502nd-engineer-company-use-mb-3-bridge-1687a3 [dostęp 10.02.2025]

[14] Headquarters, Department of the Army, Waszyngton 2003, Operator's manual for Improved Ribbon Bridge (IRB).

[15] CEFA, 2020, Steel Ribbon Bridge Floating Bridge and Ferry System, Soultz-sous-Forêts: CEFA. https://www.cefa.fr/wp-content/uploads/2024/02/SRB.pdf

[16] defence24.com, https://defence24.com/industry/new-floating-bridge-systems-for-the-polish-armed-forces-as-of-2025-interview [dostęp 22.09.2025]

[17] CNIM Systemes Insdustriels, PFM Motorized Floating Bridge Technical specification, Paryż: CNIM. https://cnim.com/sites/default/files/fichiers/defense-et-securite/plaquette-PFM-web-2016.pdf [dostęp 15.05.2023]

[18] businesswire.com, https://www.businesswire.com/news/home/20180611006212/en/A-Modernized-Version-of-Motorized-Floating-Bridges-for-the-French-Army [dostęp 15.05.2024]

[19] youtube.com, https://www.youtube.com/watch?v=IUhuADS6wQ8 [dostęp 22.09.2025]

[20] gdels.com, https://www.gdels.com/en/products/bridge-systems/m3 [dostęp 11.12.2025]

[21] M. J. Łopatka, 04.2018, Assessment of River Crossing Possibility with Existing Pontoon Bridge, Challenges to national defence in contemporary geopolitical situation, s. 25–31, doi: 10.47459/cndcgs.2018.3.

[22] Dowództwo Wojsk Lądowych, 2008, Regulamin działań wojsk lądowych, w DWLąd Wewn. 115/2008. PION SZKOLENIA.

[23] P. Cieślar, S. Kowalkowski, Kawka Waldemar, 2008, Wykorzystanie wojsk inżynieryjnych w działaniach taktycznych, Wydanie drugie. Warszawa: Wydawnictwo Akademii Obrony Narodowej.

[24] NATO, Umowa standaryzacyjna STANAG 2021: Military load classification of bridges, ferries, rafts and vehicles.
[25] B. Hornbeck, J. Kluck, J. Johannes, 2019, Trilateral design and test code for military bridging and gap-crossing equipment, TARDEC BRIDGING, OMB No. 0704-0188.
[26] Marcin Dejewski, Dariusz Kalinko, Marian Łopatka, 2019, Nowoczesne mosty pontonowe typu wstęga, Przegląd sił zbrojnych, nr 2, s. 112–119.
[27] M. Trim, J. Padula, cze. 2020, Structural analysis of an Improved Ribbon Bridge subjected to hydrodynamic and vehicular loading, Engineer Research and Development Center (U.S.), Vicksburg, ERDC/GSL TR-20-13. https://hdl.handle.net/11681/37100 [dostęp 04.09.2025]
[28] M. Trim, R. Bennett, cze. 2020, Improved Ribbon Bridge structural response validation testing, Engineer Research and Development Center (U.S.), Vicksburg, ERDC/GSL TR-20-22. https://hdl.handle.net/11681/37113 [dostęp 22.09.2025]
[29] A. Fenerci, K. A. Kvåle, X. Xiang, O. Øiseth, 05.2022, Hydrodynamic interaction of floating bridge pontoons and its effect on the bridge dynamic responses, Marine Structures, t. 83, s. 103174, doi: 10.1016/j.marstruc.2022.103174.
[30] M. Cui, Z. Cheng, P. Chen, T. Moan, 11.2024, A frequency-domain hydroelastic approach for modeling and stochastic dynamic analysis of pontoon-type floating bridges, Engineering Structures, t. 318, s. 118740, doi: 10.1016/j.engstruct.2024.118740.
[31] M. Cui, Z. Cheng, T. Moan, 05.2022, A generic method for assessment of inhomogeneous wave load effects of very long floating bridges, Marine Structures, t. 83, s. 103186, doi: 10.1016/j.marstruc.2022.103186.
[32] J. Sun, P. Jiang, Y. Sun, C. Song, D. Wang, 04.2018, An experimental investigation on the nonlinear hydroelastic response of a pontoon-type floating bridge under regular wave action, Ships and Offshore Structures, t. 13, nr 3, s. 233–243, doi: 10.1080/17445302.2017.1356438.
[33] Y. Miao, X. Chen, L. Xu, H. Huang, C. Tian, S. Ji, 03.2025, Numerical studies of hydroelastic performances of a pontoon-truss composite floating bridge under regular waves, J Mar Sci Technol, t. 30, nr 1, s. 1–17, doi: 10.1007/s00773-024-01034-y.
[34] Z. Tajali, M. Shafieefar, 12.2011, Hydrodynamic analysis of multi-body floating piers under wave action, Ocean Engineering, t. 38, nr 17–18, s. 1925–1933, doi: 10.1016/j.oceaneng.2011.09.025.
[35] K. A. Kvåle, O. Øiseth, 03.2017, Structural monitoring of an end-supported pontoon bridge, Marine Structures, t. 52, s. 188–207, doi: 10.1016/j.marstruc.2016.12.004.
[36] Ø. W. Petersen, O. Øiseth, T. S. Nord, E. Lourens, 07.2018, Estimation of the full-field dynamic response of a floating bridge using Kalman-type filtering algorithms, Mechanical Systems and Signal Processing, t. 107, s. 12–28, doi: 10.1016/j.ymssp.2018.01.022.
[37] J. Zhang, G. Miao, J. Liu, W. Sun, 10.2008, Analytical Models of Floating Bridges Subjected by Moving Loads for Different Water Depths, J Hydrodyn, t. 20, nr 5, s. 537–546, doi: 10.1016/S1001-6058(08)60092-X.
[38] Y. Hou, F. Song, R. Ma, 2009, Dynamic Simulation of Vehicle Floating Bridge System Based on ADAMS, w 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Zhangjiajie, Hunan, China: IEEE, s. 212–216. http://ieeexplore.ieee.org/document/5203412/ [dostęp 16.05.2025]
[39] J. Pratt et al., 2009, Patent Transportable Flotation System, USOO7481176B2

[40] H. Wang, X. Jin, 03.2016, Dynamic analysis of maritime gasbag-type floating bridge subjected to moving loads, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, t. 8, nr 2, s. 137–152, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2015.11.002.
[41] H. Huang, X. Chen, J. Liu, Q. Chen, 03.2021, A theoretical calculation method of irregular bridge span pontoon connected by elastic hinges, Marine Structures, t. 76, s. 102929, doi: 10.1016/j.marstruc.2020.102929.
[42] S. Fu, W. Cui, 12.2012, Dynamic responses of a ribbon floating bridge under moving loads, Marine Structures, t. 29, nr 1, s. 246–256, doi: 10.1016/j.marstruc.2012.06.004.
[43] A. S. Elareshy, M. M. A. Wahab, S. A. Mazek, A. M. Osman, 12.2020, Numerical Modeling of New Connection Pontoon under Static and Dynamic Loads, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., t. 974, nr 1, s. 012006, doi: 10.1088/1757-899X/974/1/012006.
[44] Z. Jun, L. Wei, 09.2021, Dynamic model of a hinged-girder floating bridge subjected by moving loads, Applied Ocean Research, t. 114, s. 102804, doi: 10.1016/j.apor.2021.102804.
[45] A. Derewońko, W. Krasoń, 06.2024, Selected Research Issues of Prototype Floating Systems, Acta Mechanica et Automatica, t. 18, nr 2, s. 204–211, doi: 10.2478/ama-2024-0024.
[46] G. Viecili, A. Braimah, A. E. H. O. Abd El Halim, O. El-Desouky, 01.2013, Dynamic Behavior of Ribbon Floating Bridges: Analytical and Experimental Studies, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, t. 2331, nr 1, s. 35–44, doi: 10.3141/2331-04.
[47] G. Viecili, A. E. H. O. A. E. Halim, A. Braimah, O. El-Desouky, 03.2014, Transportation Optimization of Ribbon Floating Bridges: Analytical and Experimental Investigation, TOCIEJ, t. 8, nr 1, s. 42–56, doi: 10.2174/1874149501408010042.
[48] S. Fu, W. Cui, X. Chen, C. Wang, 01.2005, Hydroelastic analysis of a nonlinearly connected floating bridge subjected to moving loads, Marine Structures, t. 18, nr 1, s. 85–107, doi: 10.1016/j.marstruc.2005.05.001.
[49] Y. Miao, X. Chen, Y. Ye, J. Ding, H. Huang, 04.2021, Numerical modeling and dynamic analysis of a floating bridge subjected to wave, current and moving loads, Ocean Engineering, t. 225, nr 108810, https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029801821002456 [dostęp 24.03.2025]
[50] T. Niezgodziński, M. Niezgodziński, 2017, Wzory wykresy i tablice wytrzymałościowe, 9. wyd. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
[51] W. Majewski, 2019, Hydrauliczne badania modelowe w inżynierii wodnej. w Seria Publikacji Naukowo-Badawczych IMGW-PIB. Warszawa: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej - Państwowy Instytut Badawczy.
[52] H. Gu, P. Stansby, T. Stallard, E. Carpintero Moreno, 10.2018, Drag, added mass and radiation damping of oscillating vertical cylindrical bodies in heave and surge in still water, Journal of Fluids and Structures, t. 82, s. 343–356, doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2018.06.012.
[53] ITTC – International Towing Tank Conference, 2011, Resistance Test, Recommended Procedure 7.5-02-02-01.
[54] MAN Energy Solutions, 2018, Basic principles of ship propulsion. Optimisation of hull, propeller, and engine interactions for maximum efficiency. Kopenhaga: MAN Energy Solutions.

[55] Joint Committee for Guides in Metrology, 2008, Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement, Sèvres, JCGM 100:2008.
[56] SciPy Developers, 2026, ciPy v1.17.0: CubicSpline Documentation. https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.interpolate.CubicSpline.html [dostęp 15.05.2025]

Spis rysunków

Rys. 1.1. Klasyfikacja mostów pontonowych 11
Rys. 1.2. Blok pontonowy parku PP-2005 w położeniu transportowym, oznaczono zamek do łączenia pontonów [3] 12
Rys. 1.3. Most PMP-M z rozłożonymi płozami hydrodynamicznymi [4] 13
Rys. 1.4. Warianty mostów pontonowych budowanych z parku PP-84: a) konfiguracja 1, b) konfiguracja 1,5, c) konfiguracja 2 [5] 13
Rys. 1.5. Jednostki napędowe parku PP-91: a) blok zmotoryzowany MZ-235 wpięty w oś mostu (kolor czerwony), b) kuter holowniczy BMK-255 [6] 14
Rys. 1.6. Blok pontonowy parku PP-64 [7] 14
Rys. 1.7. Mosty zbudowane z wykorzystaniem PP-64: a) konfiguracja wstęgi mieszanej typu C [9], b) konfiguracja wstęgi podwójnej [10] 15
Rys. 1.8. Rozmieszczenie łączników burtowych mostu PP-64 [11] 15
Rys. 1.9. Most pontonowy IRB w czasie budowy przeprawy [13] 16
Rys. 1.10. Przeprawa mostowa zrealizowana z wykorzystaniem PFM [16] 17
Rys. 1.11. Schemat łączenia bloków pontonowych PFM [17] 18
Rys. 1.12. Panele zwiększające wysokość wolnej burty w moście PFM: a) konfiguracja transportowa, b) konfiguracja robocza [17] 19
Rys. 1.13. Widok konstrukcji mostu PFM: a) zintegrowany pędnik [18], b) prom z widocznymi rampami najazdowymi[18], [19] 19
Rys. 1.14. Przeprawa mostowa zrealizowana z wykorzystaniem M3 [20] 20
Rys. 2.1. Schemat układania się mostu pontonowego obciążonego ciężarem pojazdu na powierzchni wody 24
Rys. 2.2. Rozkład prędkości wody i ciśnienia hydrostatycznego pod niesymetrycznie obciążonym blokiem pontonowym (p_w – ciśnienie hydrostatyczne pod dnem pontonu, V_w – prędkość wody, H_w – wysokość przekroju wody pod kadłubem) 25
Rys. 2.3. Nośność mostu PFM dla różnych wartości prędkości nurtu i głębokości wody [17] 26
Rys. 2.4. Schematy składania bloków pontonowych na czas transportu (widok od czoła pontonu): a) mosty z grupy PMP i IRB, b) most PFM 27
Rys. 2.5. Zmiany parametrów użytkowych mostu w funkcji jego wysokości wyznaczone dla mostu o szerokości 10 m, długości roboczej 20 m, zapasie

wyporności 0,8 i środku ciężkości 0,2 m nad jezdnią mostu): a) zmiana wyporności, b) zmiana stateczności [opracowanie własne] 28
Rys. 2.6. Zmiany parametrów użytkowych mostu w funkcji jego szerokości wyznaczone dla mostu o długości roboczej 20 m, wysokości 0,8 m, zapasie wyporności 0,8 i środku ciężkości 0,2 m nad jezdnią mostu): a) zmiana wyporności, b) zmiana stateczności [opracowanie własne] 28
Rys. 2.7. Wpływ szerokości mostu na jego nośność dla analizowanych konstrukcji mostów pontonowych: PMP MLC66, PMP-M (wstęga 1,5) MLC 99, PMP-M (wstęga 2) MLC 132, PP-64 (wstęga 1) MLC 44, PP-64 (wstęga 2) MLC 88, RB/IFB MLC80, IRB MLC 80, SRB MLC 85, PFM MLC 70, PFM F2 MLC 90..... 29
Rys. 2.8. Schemat obciążonych mostów o różnych typach łączenia bloków pontonowych: a) łączenia przegubowe, b) połączenia sztywne 30
Rys. 2.9. Model doświadczalny mostu do badań reakcji konstrukcji na fale środowiskowe [32]..... 36
Rys. 2.10. Walidacja modelu numerycznego: a) wykorzystany model doświadczalny, b) porównanie wartości operatora amplitudy odpowiedzi (RAO, ang. Response Amplitude Operator) dla badan numerycznych oraz laboratoryjnych [33]..... 36
Rys. 2.11. Warianty konstrukcyjne porównywanych mostów pontonowych [34] 37
Rys. 2.12. Czujniki do badania rzeczywistego mostu pontonowego: a) akcelerometr, b) radar mierzący falowanie wody [35] 38
Rys. 2.13. Model numeryczny mostu pontonowego wykonany z wykorzystaniem metody wieloczłonowej [38]..... 39
Rys. 2.14. Badania numeryczne systemu pływającego: a) statyczne badania obciążeń konstrukcji pojazdem, b) dynamiczne badania obciążeń konstrukcji falą środowiskową [40]..... 40
Rys. 2.15. Obiekt rzeczywisty rozpatrywany w pracy [43] obciążony ładunkiem..... 41
Rys. 2.16. Przemieszczenia pionowe mostu wywołane obciążeniem od poruszającego się pojazdu [44]..... 42
Rys. 2.17. Model doświadczalny do badań przemieszczeń mostu w czasie poruszania się pojazdu: a) model przeszkody wodnej i mostu, b) model pojazdu [46], [47]

Rys. 2.18. Przykładowy wykres porównujący przemieszczenia bloku mostu pontonowego w czasie przemieszczania się pojazdu o masie 1,5 kg z prędkością 0,205 m/s [47] 43
Rys. 2.19. Walidacja modelu numerycznego mostu: a) widok modelu doświadczalnego wykorzystanego do wyznaczenia przemieszczeń, b) porównanie przemieszczeń bloków pontonowych w czasie przeprawiania pojazdu, wyznaczone na podstawie metod doświadczalnych oraz numerycznych [42] 44
Rys. 2.20. Charakterystyki czasowe przemieszczeń pionowych w czasie przejazdu pojazdu z prędkością 9 m/s, uzyskane na podstawie badań numerycznych i doświadczalnych z pracy [42] oraz badań numerycznych z pracy [49] 45
Rys. 2.21. Badania statyczne rzeczywistego mostu pontonowego: a) schemat obciążania skrajnie podpartych bloków pontonowych, b) badania odcinka mostu na przeszkodzie wodnej [27] 45
Rys. 4.1. Schemat blokowy planu badań 50
Rys. 5.1. Odwzorowanie geometrii bloku pontonowego: a) obiekt rzeczywisty [27], b) wizualizacja geometrii bloku pontonowego w środowisku MSC Adams/View 53
Rys. 5.2. Model pojazdu: a) schemat poglądowy – widoki z góry i z boku; b) wizualizacja modelu w środowisku wirtualnym w widoku bocznym 54
Rys. 5.3. Podział modelu numerycznego kadłuba bloku pontonwego na segmenty: a) widok ogólny kadłuba, b) wizualizacja poziału kadłuba oraz przyłożenia sił dyskretnych w płaszczyźnie yz; c) wizualizacja podziału kadłuba oraz przyłożenia sił dyskretnych w płaszczyźnie yx 55
Rys. 5.4. Schemat odwzorowania połączeń bloków pontonowych 57
Rys. 5.5. Przykładowe charakterystyki momentu zastępczej sztywności kątowej, pozwalające na odwzorowanie różnych podatności na odkształcenia kątowe konstrukcji oraz struktury łączenia bloków pontonowych: a) połączenie przegubowe, b) połączenie sztywne [opracowanie własne] 57
Rys. 5.6. Odkształcenia kątowe w połączeniach i konstrukcji bloków pontonowych odwzorowane zastępczym momentem gnącym: a) obrót w przegubie w zakresie luzu, b) kąt wynikający z podatności elementów połączenia bloków pontonowych, c) kąt wynikający ze zginania konstrukcji nośnej bloków pontonowych 58

Rys. 5.7. Schemat statycznego obciążenia pojedynczego bloku pontonowego mostu IRB [27] 60
Rys. 5.8. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych D1, D2 i D5 w czasie obciążania konstrukcji bloku pontonowego w wariantach I-A i I-B: a) widok z boku, b) widok z góry [27] 61
Rys. 5.9. Model zastępczego pojedynczego bloku pontonowego 63
Rys. 5.10. Rozkład obciążenia dwóch połączonych bloków pontonowych mostu IRB [27] 64
Rys. 5.11. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych D1, D2 w czasie obciążania konstrukcji bloku pontonowego w wariantach II-A i II-B [27]: a) widok z boku, b) widok z góry 65
Rys. 5.12. Schemat modelu zastępczego dwóch bloków pontonowych w zakresie odkształceń konstrukcji nośnej bloków pontonowych 67
Rys. 5.13. Schemat modelu zastępczego dwóch bloków pontonowych w zakresie odkształceń elementów połączenia bloków pontonowych 68
Rys. 5.14. Wizualizacja obiektu badań oraz rozmieszczenia zbiorników obciążających i punktów pomiarowych [27] 69
Rys. 5.15. Wizualizacja modelu numerycznego badanego odcinka mostu pontonowego 69
Rys. 5.16. Zestawienie wartości zanurzeń w punktach pomiarowych wyznaczonych na obiekcie rzeczywistym [27] oraz na podstawie symulacji przeprowadzonych w MSC Adams/View 70
Rys. 6.1. Stanowisko laboratoryjne do badań identyfikacyjnych odcinka mostu w obszarze tłumienia i masy wody towarzyszącej: a) model odcinka mostu; b) urządzenie zwalniające c) optyczny układ pomiarowy 75
Rys. 6.2. Schemat procesu identyfikacji modelu matematycznego siły oporów tłumiących 76
Rys. 6.3. Schemat procesu identyfikacji masy wody towarzyszącej 77
Rys. 6.4. Przykładowe charakterystyki czasowe nurzania swobodnego modelu odcinka mostu obciążonego masą 1,9 kg i zanurzeniu początkowym -22,3 mm: a) przemieszczenia; b) prędkości; c) przyśpieszenia 78
Rys. 6.5. Zarys przekroju wzdłużnego bloku pontonowego z wymiarami wykorzystanymi do wyznaczenia siły wyporu 79

Rys. 6.6. Przykładowe charakterystyki czasowe sił oddziałujących na badany model odcinka mostu w czasie nurzania modelu odcinka mostu obciążonego masą 1,9 kg i zanurzeniu początkowym -22,3 mm: a) siła wyporu; b) siła bezwładności bloku pontonowego; c) suma sił oporów i bezwładności masy wody towarzyszącej 80
Rys. 6.7. Wykres wartości sił oporów w funkcji prędkości nurzania oddziałujących na obiekt rzeczywisty wraz z aproksymatą w formie wielomianu czwartego stopnia 83
Rys. 6.8. Przykładowe charakterystyki czasowe siły działających na model odcinka mostu obciążonego masą 1,9 kg, będące odpowiedzią na wymuszenie w postaci zanurzenia początkowego $yp - wt = 0 = -22{,}3\ \mathrm{mm}$: a) siła oporów hydrodynamicznych; b) siła bezwładności masy wody towarzyszącej 84
Rys. 6.9. Histogram wartości bezwymiarowego współczynnika masy towarzyszącej 86
Rys. 6.10. Schemat stanowiska pomiarowego 88
Rys. 6.11. Widok konstrukcji basenu badawczego 88
Rys. 6.12. Pojedynczy blok pontonowy modelowanego obiektu rzeczywistego [27].. 89
Rys. 6.13. Model mostu pontonowego: a) odlew korpusu modelu, b) model mostu z oznaczonymi przegubami łączącymi kolejne bloki pontonowe..... 89
Rys. 6.14. Basen pomiarowy wraz z modelami mostu i pojazdu, z naniesionymi osiami układu współrzędnych 90
Rys. 6.15. Model pojazdu MLC60 na moście: a) rysunek poglądowy od czoła pojazdu, b) widok boczny z zaznaczonymi znacznikami pomiarowymi pojazdu..... 90
Rys. 6.16. Widok przeciągarki wykorzystywanej do wymuszania ruchu modeli pojazdów 91
Rys. 6.17. Rozmieszczenie pływaków do pomiaru fal: a) widok modelu, b) schemat rozmieszczenia pływaków 91
Rys. 6.18. Układ pomiarowy w czasie badań: a) kamery systemu pomiarowego (K_1, K_2), b) widok odczytu mierzonych parametrów..... 92
Rys. 6.19. Plan badań identyfikacyjnych charakterystyki ugięcia mostu i fali czołowej przeszkody wodnej..... 93
Rys. 6.20. Przykładowe charakterystyki mierzonych przemieszczeń w funkcji czasu, zarejestrowane dla pontonu nr 6 i prędkości pojadu 25 km/h: a)

przemieszczenia pionowe wody (y_{wi}) i pontonu (y_{pi}), b) położenie pontonu (x_{pi}) i pojazdu (x_v) w kierunku osi mostu 94
Rys. 6.21. Schemat blokowy obrazujący sposób przetwarzania wyników pomiarowych z dziedziny czasu do dziedziny odległości względem pojazdu 95
Rys. 6.22. Przykładowe charakterystyki zanurzenia pozornego i rzeczywistego pontonu nr 6 oraz pionowego przemieszczenia wody, w funkcji ich odległości od pojazdu: a) pojazd klasy MLC 30, prędkość 7,4 km/h; b) pojazd klasy MLC 60, prędkość 7,4 km/h; c) pojazd klasy MLC 60, prędkość 25,5 km/h; d) pojazd klasy MLC 60, prędkość 30 km/h (pojazd na wykresie schematycznie wskazuje swoje ustawienie – przód/tył) 96
Rys. 6.23. Przykładowe charakterystyki widmowe uzyskane z analizy widmowej przebiegów falowania wody uzyskane dla pojazdu MLC60 przy prędkości: a) 7,4 km/h, b) 16,5 km/h, b) 30 km/h 97
Rys. 6.24. Zestawianie charakterystycznych długości fal zidentyfikowanych na podstawie lokalnych maksimów amplitudy widma (lokalnych maksimów FFT) przebiegów falowania wody w funkcji prędkości ruchu pojazdów klasy: a) MLC 30, b) MLC 60 98
Rys. 6.25. Przykładowe charakterystyki przemieszczeń pionowych fali w czasie przejazdu pojazdu MLC60 z różnymi prędkościami, gdzie: $min(yw)$ – przemieszczenie w dolinie fali, $ywxp - v = 0$ – przemieszczenie w miejscu chwilowej lokalizacji pojazdu 99
Rys. 6.26. Rozkłady zidentyfikowanych wartości maksymalnej głębokości doliny fali w funkcji prędkości pojazdu: a) testy z wykorzystaniem pojazdu MLC30, b) testy z wykorzystaniem pojazdu MLC60 100
Rys. 6.27. Przedstawienie rozkładu zidentyfikowanych wartości odległości doliny fali czołowej od pojazdu w funkcji jego prędkości: a) testy z wykorzystaniem pojazdu MLC30, b) testy z wykorzystaniem pojazdu MLC60 101
Rys. 6.28. Rozkłady zidentyfikowanych wartości poziomu lustra wody w miejscu usytuowania pojazdu w funkcji jego prędkości: a) pojazd MLC30, b) pojazd MLC60 101
Rys. 6.29. Przykładowe charakterystyki pozornego i rzeczywistego zanurzenia pontonu w czasie przejazdu pojazdu MLC60 z prędkością 30 km/h wraz z naniesionymi punktami doliny zanurzenia rzeczywistego $\min(yp - w6)$ oraz doliny zanurzenia pozornego $\min(yp6)$ 102

Rys. 6.30. Reprezentacja rozkładu zidentyfikowanych wartości doliny zanurzenia rzeczywistego $\min(yp - w)$ i pozornego $\min(yp)$ jako funkcja prędkości pojazdu: a) testy z wykorzystaniem pojazdu MLC30, b) testy z wykorzystaniem pojazdu MLC60 103
Rys. 7.1. Charakterystyki falowania dla różnych prędkości pojazdu i zanurzenia statycznego: a) 0,325 m, b) 0,5 m 106
Rys. 7.2. Lokalizacja punktów charakterystycznych (P_1, P_2, P_3, P_4 i P_5) przebiegu fali czołowej zarejestrowanej dla przejazdu pojazdu MLC60 przy prędkości 25 km/h 107
Rys. 7.3. Wizualizacja interpolacji współrzędnej poziomej punktu P_3: xP3 w funkcji prędkości przejazdu v_p oraz zanurzenia statycznego z_{stat} 108
Rys. 7.4. Porównanie charakterystyk falowania dla prędkości 30 km/h i zanurzenia statycznego 0,5 m uzyskanych z w wyniku przeprowadzenia badań doświadczalnych oraz na podstawie wyznaczonego modelu uogólnionego falowania 109
Rys. 8.1. Schemat odwzorowania momentów tłumiących działających na blok pontonowy w czasie jego ruchu wahadłowego: a) zróżnicowanie wektorów prędkości nurzania elementów dyskretnych; b) wektory sił generujących moment tłumiący 112
Rys. 9.1. Zestawienie przebiegów czasowych nurzania odcinka pięciu bloków pontonowych uzyskanych w badaniach doświadczalnych oraz numerycznych: a) obciążenie 47 000 kg, zanurzenie początkowe 0,63 m; b) obciążenie 73 000 kg, zanurzenie początkowe 0,57 m; c) obciążenie 99 000 kg, zanurzenie początkowe 0,72m; d) obciążenie 125 000 kg, zanurzenie początkowe 0,79 m 115
Rys. 9.2. Zestawienie wybranych przebiegów przemieszczeń pionowych bloków pontonowych uzyskanych na drodze badań doświadczalnych oraz numerycznych, wyznaczonych dla pojazdu MLC60 poruszającego się z prędkościami: a) 16,5 km/h, b) 21 km/h, c) 25,5 km/h, d) 30 km/h 118
Rys. 10.1. Orientacja układu odniesienia, względem którego dokonywano pomiarów momentów gnących oraz przemieszczeń. 123
Rys. 10.2. Wizualizacja wzajemnych powiązań cech konstrukcyjnych i momentów gnących podczas projektowania mostu pontonowego 125

Rys. 10.3. Przykładowy przebieg zmian momentu gnącego mostu w funkcji odległości od środka ciężkości pojazdu, zarejestrowany dla wariantu B obciążonego pojazdem MLC 60 poruszającym się z prędkością 25 km/h, obrazujący sposób interpretacji wartości maksymalnej $M\max$, minimalnej $M\min$ i zakresu zmienności momentu ΔM 126
Rys. 10.4. Przykładowy przebieg przemieszczeń bloku pontonowego, zarejestrowany dla wariantu B obciążonego pojazdem MLC 60 poruszającym się z prędkością 25km/h, obrazujący sposób interpretacji wartości minimalnej $ymin$ 126
Rys. 10.5. Przykładowe przebiegi momentów gnących zarejestrowane dla analizowanych wariantów konstrukcyjnych przy obciążeniu pojazdami przemieszczającymi się z prędkością 15 km/h: a) obciążenie pojazdem MLC 30, b) obciążenie pojazdem MLC 60 127
Rys. 10.6. Zestawienie maksymalnych wartości momentów gnących wyznaczonych w połączeniu bloków pontonowych, w funkcji prędkości przejazdu, zarejestrowanych dla różnych wariantów konstrukcyjnych mostów (A, B i C): a) pojazd klasy MLC 30 b) pojazd klasy MLC60 128
Rys. 10.7. Zestawienie zakresu zmian maksymalnego momentu gnącego w połączeniach bloków pontonowych w funkcji prędkości przejazdu, zarejestrowane dla różnych wariantów konstrukcyjnych mostu (A, B i C): a) pojazd klasy MLC 30 b) pojazd klasy MLC60 129
Rys. 10.8. Zestawienie przebiegów momentów gnących: a) Obciążenie pojazdem MLC30 jadącym z prędkością 1 km/h, b) obciążenie pojazdem MLC60 jadącym z prędkością 1 km/h; c) Obciążenie pojazdem MLC30 jadącym z prędkością 25 km/h, d) obciążenie pojazdem MLC60 jadącym z prędkością 25 km/h 131
Rys. 10.9. Przykładowe przebiegi przemieszczeń pionowych zarejestrowane dla analizowanych wariantów konstrukcyjnych przy obciążeniu pojazdami przemieszczającymi się z prędkością 15 km/h: a) obciążenie pojazdem MLC 30, b) obciążenie pojazdem MLC 60 132
Rys. 10.10. Zestawienie maksymalnych przemieszczeń pionowych bloku pontonowego w funkcji prędkości przejazdu, zarejestrowanych dla różnych klas obciążeń pojazdów oraz wariantów konstrukcyjnych mostu: a) pojazd klasy MLC 30, b) pojazd klasy MLC60 133

Rys. 10.11. Przebiegi przemieszczeń pionowych w warunkach powodujących wystąpienie największych przemieszczeń pionowych: a) obciążenie pojazdem MLC 30 poruszającym się z prędkością 25 km/h, b) obciążenie pojazdem MLC 60 poruszającym się z prędkością 20 km/h 134

Spis tabel

Tabela 1.1. Liczba przeprawianych pojazdów po której należy przeprowadzić przegląd główny [17] 18
Tabela 1.2. Zestawienie podstawowych cech konstrukcyjnych i parametrów użytkowych analizowanych mostów pontonowych 21
Tabela 2.1. Zestawienie wybranych materiałów stosowanych w wojskowych konstrukcjach mostowych [25] 31
Tabela 2.2. Zestawienie wpływu parametrów technicznych na parametry użytkowe oraz taktyczne mostów pontonowych 33
Tabela 5.1. Parametry więzu kontaktowego łączącego bloki pontonowe i koła pojazdu 54
Tabela 5.2. Warianty obciążeń jednego bloku pontonowego 60
Tabela 5.3. Wartości przemieszczeń punktów pomiarowych D1, D2 i D5 i wyliczonych wartości $uśr$ dla wariantów obciążeń I-A i I-B [27] 62
Tabela 5.4. Warianty obciążeń konstrukcji dwóch połączonych bloków pontonowego 64
Tabela 5.5. Wartości przemieszczeń punktów pomiarowych pod wpływem zadanych obciążeń 66
Tabela 5.6. Zestawienie parametrów walidacyjnych modelu symulacyjnego 70
Tabela 6.1. Współczynniki oporów dla obiektu półsferycznego, dla różnych wartości liczby Keulegana-Carpentera (KC) [52] 82
Tabela 6.2. Parametry jakości dopasowania aproksymacji wielomianowej 83
Tabela 6.3. Wartości współczynnika korelacji masy towarzyszącej oraz zanurzenia wynikającego z masy obciążników i chwilowego 86
Tabela 6.4. Zestawienie wartości statystyk testowych U i wartości p dla testu Manna-Whitneya 103
Tabela 9.1. Wartości parametrów walidacji modelu oddziaływań środowiska wodnego 116
Tabela 9.2. Wartości parametrów walidacji modelu przeprawiania pojazdu po moście pontonowym 119
Tabela 10.1.Parametry odniesieniowego (A) i zmodyfikowanych (B i C) rozwiązań konstrukcji mostu do badań numerycznych. 122
Tabela 10.2.Zestawienie prędkości i klas obciążeń pojazdów stosowanych podczas badań numerycznych 122

Tabela 10.3.Wartości maksymalnych momentów gnących wyznaczonych w połączeniach bloków pontonowych, zarejestrowane dla różnych wariantów konstrukcyjnych mostów (A, B i C) oraz klas (MLC 30 i MLC 60) i prędkości pojazdów 128
Tabela 10.4.Wartości zakresu zmienności momentu gnącego mierzonego w połączeniu bloków pontonowych, zarejestrowane dla różnych wariantów konstrukcyjnych mostu oraz klas i prędkości pojazdów..... 130
Tabela 10.5.Wartości maksymalnych przemieszczeń pionowych zarejestrowane dla różnych wariantów konstrukcyjnych mostu oraz klas i prędkości pojazdów 133
Tabela 10.6.Zestawienie procentowych zmian maksymalnych wartości analizowanych parametrów w całym zakresie prędkości przejazdu, wyznaczonych dla przejścia z wariantu konstrukcyjnego A na wariant B oraz z wariantu A na wariant C. Zmniejszenie wartości parametru, interpretowane jako efekt korzystny, oznaczono kolorem zielonym, natomiast zwiększenie wartości, interpretowane jako efekt niekorzystny, oznaczono kolorem czerwonym 135

Streszczenie rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy:

Badania obciążeń mostów pływających
o różnych strukturach łączenia bloków pontonowych

Celem pracy jest zbadanie wpływu sposobu łączenia bloków pływających na obciążenia konstrukcji mostu pontonowego typu wstęga oraz określenie wytycznych projektowych uwzględniających sposób łączenia bloków mostów pontonowych nowej generacji. Przeprowadzony przegląd istniejących rozwiązań konstrukcyjnych oraz literatury przedmiotu pozwolił na identyfikację luki badawczej w zakresie oddziaływania konfiguracji połączeń bloków pontonowych na pracę konstrukcji mostu pływającego.

W ramach pracy opracowano model numeryczny mostu pontonowego oparty na metodzie układów wieloczłonowych MBS, umożliwiający odwzorowanie dynamiki układu most–pojazd–środowisko wodne. W modelu uwzględniono sztywność giętną konstrukcji nośnej, sztywność kątową elementów łączących oraz luzy występujące w przegubach bloków pontonowych. Na podstawie badań identyfikacyjnych wyznaczono charakterystykę siły oporu tłumiącego oraz bezwymiarowy współczynnik masy wody towarzyszącej, co umożliwiło uwzględnienie efektów hydrodynamicznych w modelu symulacyjnym. Dodatkowo zidentyfikowano zjawisko fali czołowej generowanej podczas ruchu pojazdu po moście oraz opracowano jego model uogólniony, zależny od zanurzenia statycznego mostu i prędkości przejazdu.

Poprawność przyjętych założeń i implementacji oddziaływań środowiska wodnego zweryfikowano poprzez walidację wyników symulacji z rezultatami badań doświadczalnych w skali. Opracowany model wykorzystano następnie do przeprowadzenia badań symulacyjnych mostów o zróżnicowanej strukturze połączeń bloków pontonowych i wartości zastępczej sztywności giętnej konstrukcji.

Uzyskane wyniki umożliwiły ocenę wpływu konfiguracji połączeń na rozkład momentów gnących oraz przemieszczenia pionowe mostu podczas przeprawiania pojazdów. Wykazano istotny wpływ struktury połączeń bloków pontonowych na stan obciążeń konstrukcji, co może stanowić podstawę do optymalizacji rozwiązań konstrukcyjnych mostów pontonowych pod kątem ich wytrzymałości i właściwości eksploatacyjnych.

Słowa kluczowe: most pontonowy, układy wieloczłonowe (MBS), oddziaływania hydrodynamiczne, fala czołowa, masa wody towarzyszącej, połączenia bloków pontonowych, momenty gnące, przemieszczenia pionowe.

Ph.D. thesis abstract

Dissertation Title:

Investigation of loads in riboon floating bridges with various configurations of pontoons connections

The dissertation investigates the influence of pontoon block connection methods on the load state of ribbon floating bridges. A review of existing structural solutions and the relevant literature made it possible to identify a research gap concerning the effect of pontoon block connection configurations on the structural response of floating bridges.

As part of the study, a numerical model of the crossing was developed using the multibody systems (MBS) method, which enabled the representation of the dynamic behavior of the bridge–vehicle–water environment system. The model accounts for the bending stiffness of the load-bearing structure, the rotational stiffness of the connecting elements, and the clearances occurring in the joints between pontoon blocks. Based on identification studies, the damping resistance force characteristic and the added mass coefficient were determined, making it possible to incorporate hydrodynamic effects into the simulation model. In addition, the frontal wave generated during vehicle movement across the crossing was identified, and a generalized model of this phenomenon was developed as a function of the bridge's static draft and the vehicle crossing speed.

The correctness of the adopted assumptions and the implementation of water-environment interactions were verified by validating the simulation results against the results of scaled laboratory tests. The developed model was then used to perform simulation studies of bridges with different pontoon block connection structures and varying equivalent bending stiffness.

The obtained results made it possible to assess the influence of connection configuration on the distribution of bending moments and the vertical displacements of the bridge during vehicle crossing. A significant effect of pontoon block connection structure on the load state of the bridge was demonstrated, which may provide a basis for optimizing structural solutions for pontoon bridges in terms of strength and operational performance.

Keywords: pontoon bridge, multibody systems (MBS), hydrodynamic interactions, bow wave, added mass, pontoons connections, bending moments, vertical displacements