

ANALIZA PORÓWNAWCZA LCCA MOSTU KOMPOZYTOWEGO I OBIEKTÓW KONWENCJONALNYCH¹

Damian KALETA, Dominik MACHETA
Promost Consulting Rzeszów

W artykule przedstawiono analizę porównawczą mostu kompozytowego i obiektów konwencjonalnych (z belek typu T oraz zespolonego stalowo-betonowego) uwzględniającą koszty życia obiektu (LCC).

W referacie omówiono:

- czym jest analiza cyklu życia (LCCA),
- koszty związane z życiem obiektu mostowego,
- podstawowe charakterystyki porównywanych obiektów,
- wyniki analizy i wnioski.

Słowa kluczowe: LCCA, FRP, most kompozytowy, *Com-bridge*.

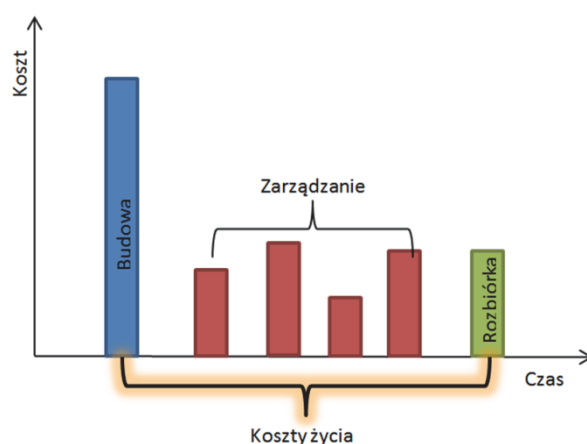
1. WPROWADZENIE

Inwestycje drogowe w tym budowa mostów pochłaniają znaczną część finansowych środków publicznych. Bardzo ważnym aspektem jest dobór takich rozwiązań które pozwalają na minimalizację kosztów inwestycji. Aktualnie podejście do minimalizacji kosztów jest krótkowzroczne. Decyduje najniższa cena budowy. Podejście to nie uwzględnia całkowitych kosztów obsługi obiektu mostowego w czasie jego eksploatacji. Coraz częściej, zwłaszcza w bogatszych krajach zaczyna się określać opłacalność wariantu budowy uwzględniając nie tylko koszty budowy, ale również zarządzania i rozbiórki. Podejście takie ma znaczenie nie tylko ekonomiczne, ale również ekologiczne i społeczne.

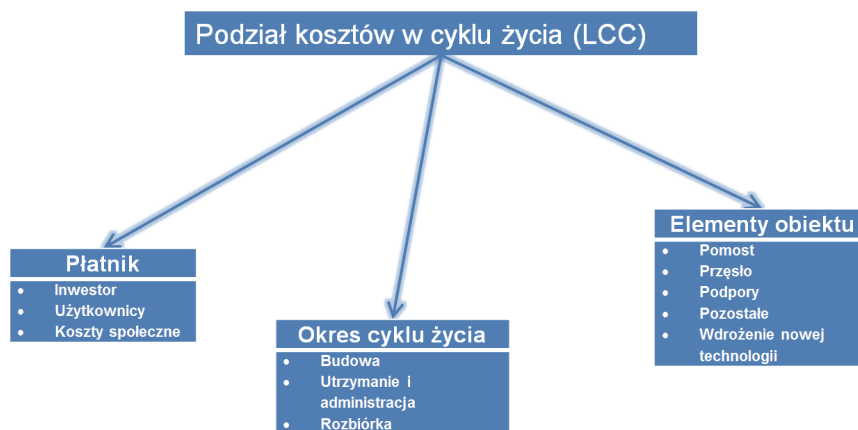
W celu określenia całkowitych kosztów życia obiektu stosuje się tzw. analizy LCCA, (ang. *Life-Cycle Cost Analysis*). LCCA jest złożoną analizą kosztową pozwalającą w szerszym zakresie spojrzeć na efektywność ekonomiczną danego rozwiązania. Narzędzie to zaczyna być coraz częściej i chętniej stosowane a wręcz wymagane przy niektórych inwestycjach.

¹ DOI 10.21008/j.1897-4007.2017.24.09

Wyróżnia się dwa rodzaje analiz LCCA: deterministyczną i probabilistyczną. Analiza deterministyczna polega na przyjęciu pewnych sztywnych założeń, działań, wartości (tzw. wartości dyskretne). Analiza probabilistyczna jest bardziej zaawansowana i wprowadza do elementów analizy deterministycznej niepewność i ryzyko o określonej wartości procentowej. Analiza LCCA obejmuje swoim zakresem wszystkie koszty związane z budową, zarządzaniem i rozbiórką. Nie jest to jednak jedyny podział kosztów. Przykładowy podział kosztów życia obiektów przedstawiono na rysunku (rys. 1.1).



Rys. 1.1. Schemat kosztów życia obiektu



Rys. 1.2. Podział kosztów życia obiektu

Jak wynika z rysunku 1.2, analiza LCCA pozwala również na uwzględnienie różnego rodzaju podziału kosztów. Najczęściej stosuje się jednak podział na

płatnika i na okres cyklu życia. Podział na elementy obiektu jest stosowany głównie w celu sprawdzenia, która część obiektu jest najbardziej cenotwórcza. Taka analiza pozwala na optymalizację rozwiązania docelowego. W przeciwieństwie do ogólnego przekonania, kosztów inwestycji i jej utrzymania nie ponosi jedynie inwestor, ale także bezpośredni użytkownicy oraz całe społeczeństwo. Przykłady kosztów ponoszonych przez poszczególne „strony” przedstawiono w tabeli 1.1.

Tabela 1.1. Koszty ponoszone przez płatników

KOSZTY PŁATNIKÓW		
Koszty inwestora	Koszty użytkownika	Koszty społeczne
<ul style="list-style-type: none"> – projekt – budowa – bieżące utrzymanie – remonty częściowe – naprawy, wymiany, modernizacje, przebudowy – przeglądy – rozbiórka – produkcja, składowanie, utylizacja i recyding odpadów – administracja i zarządzanie 	<ul style="list-style-type: none"> – eksploatacja pojazdów – dodatkowe zużycie paliwa – czas pracy kierowców przewozów towarowych i pasażerskich – czas pasażerów w przewozach pasażerskich – wypadki drogowe 	<ul style="list-style-type: none"> – emisja toksycznych składników spalin – hałas drogowy

Celem niniejszej analizy jest sprawdzenie opłacalności budowy obiektów mostowych wykorzystujących kompozyty FRP w porównaniu z obiektami budowanymi z materiałów tradycyjnych takich jak: beton, stal, drewno.

2. METODYKA

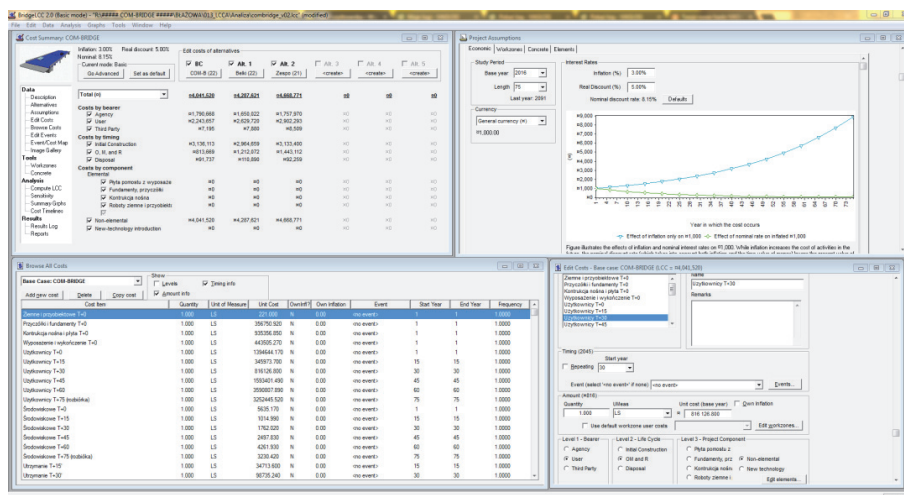
Do wykonania analiz LCCA posłużono się programem BridgeLCC 2.0 [2]. Jest to program dedykowany dla konstrukcji mostowych, stworzony na potrzeby amerykańskiego „National Institute of Standards and Technology”. W programie definiuje się wszystkie koszty związane z budową, remontami, utrzymaniem i naprawami oraz rozbiórką. Każdemu kosztowi przypisuje się również kategorię płatnika (inwestor, użytkownicy, koszty społeczne). Wskazywany jest także rok pojawienia się danego kosztu. Program po odpowiednim zdefiniowaniu strategii działań związanych z budową oraz zarządzaniem obiektem, przelicza wartość bieżąca pieniądza (ang. PV – *Present Value*).

Koszty poszczególnych działań związanych z życiem obiektu zostały wyliczone na podstawie przedmiarów robót oraz biuletynów cen Sekocenbud.

Strategie utrzymaniowe obiektów dobierano na podstawie Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie [1], w którym podane są minimalne okresy trwałości co do elementów obiektu mostowego oraz z deklaracji i kart producentów produktów stosowanych w budownictwie mostowym. Koszty użytkowników i koszty społeczne wyliczano przy użyciu własnych arkuszy na podstawie instrukcji [3].

3. OGÓLNE ZAŁOŻENIA DO ANALIZY

Niemniejszą analizę przeprowadzono jako deterministyczną. Wyjściowym jej parametrem było określenie tzw. realnej stopy dyskontowej, w celu określenia wartości pieniądza w czasie. Koszt każdego działania musi zostać sprowadzony do czasu T+0. Powstało wiele dokumentów określających wartości realnej stopy dyskontowej wydanych przez władze lokalne, krajowe oraz unii europejskiej. Wartości realnej stopy dyskontowej w tych dokumentach są różne. Dokumenty te często dotyczą konkretnych programów operacyjnych, branż czy dofinansowań i określają wartość realnej stopy dyskontowej w zależności od sytuacji ekonomicznej danego sektora gospodarczego czy regionu. Wartości te najczęściej wahają się w granicach od 4% do 6%. Na potrzeby niniejszej analizy LCCA przyjęto wartość stopy dyskontowej na poziomie 5%. Program korzystając z wartości realnej stopy dyskontowej i roku pojawienia się danego kosztu przelicza automatycznie wartość kosztów na tzw. wartość bieżącą. Przyjęto trwałość obiektu mostowego na poziomie 75 lat. Założono wykonanie remontu obiektu co 15 lat.



Rys. 3.1. Okno programu BridgeLCC2.0

4. ANALIZA LCCA

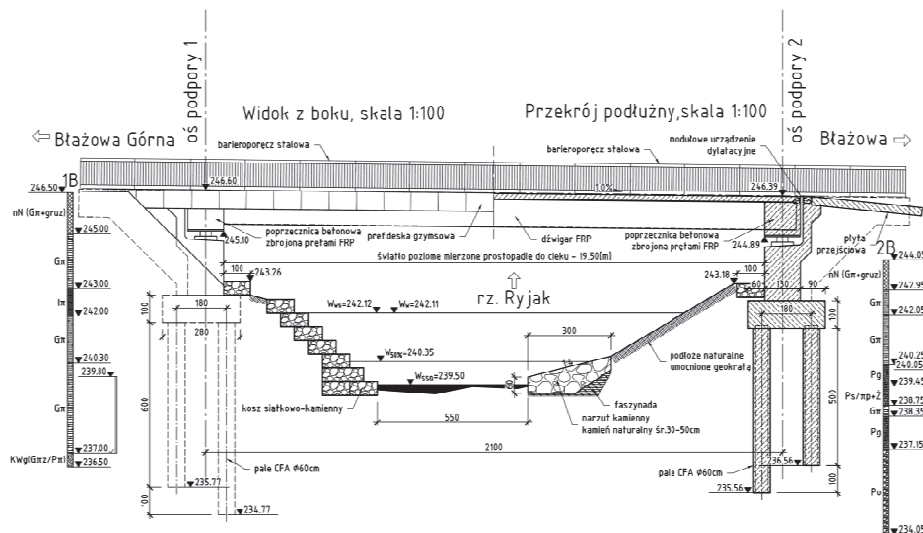
Analizowane warianty

Przedmiotem analizy był most w ciągu drogi powiatowej nr 1141R w miejscowości Błazowa nad rzeką Ryjak. Most o kompozytowym dźwigarze i płycie z betonu lekkiego powstał w ramach projektu *Com-bridge*, dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Obiekt ten jest pierwszym tego typu rozwiązaniem w Polsce.

W analizie LCCA porównano trzy warianty (koncepcje). Podstawowe parametry obiektu są następujące:

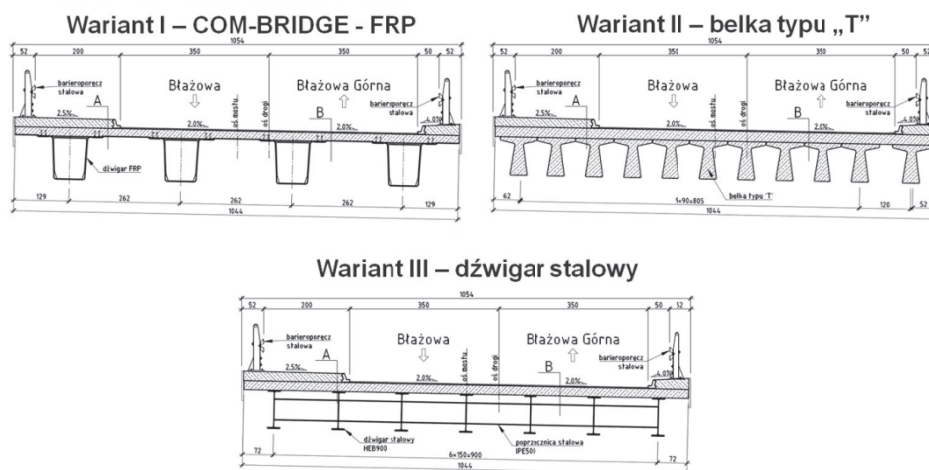
- schemat statyczny: belka swobodnie podparta,
- rozpiętość teoretyczna przęsła: 21,00m,
- długość całkowita pomostu: 22,30m,
- całkowita szerokość mostu: 10,54m,
- klasa obciążenia – klasa B wg PN-85/S-10030 [4],
- podpory – przyczółki masywne zatopione w nasypie,
- posadowienie – pośrednie, realizowane za pomocą pali wierconych zwieczonych żelbetowym oczepem.

Podstawowe parametry obiektu takie jak rozpiętość, szerokość czy schemat statyczny nie były różnicowane, w celu jak największego podobieństwa wariantów budowy. Przekrój podłużny wariantu 1 przedstawiono na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Przekrój podłużny obiektu w miejscowości Błazowa

Obiekty jeśli chodzi o przekrój podłużny nie różnią się w znaczny sposób. Zmiany dotyczą przede wszystkim ustroju nośnego przęsła. Przekroje poprzeczne oraz opis poszczególnych wariantów przedstawiono na rysunku 4.2.



Rys. 4.2. Przekroje poprzeczne poszczególnych wariantów

- **Koncepcja 1** – obiekt o konstrukcji przęsła z dźwigara kompozytowego zespolonego z żelbetową płytą pomostu. W koncepcji 1 jako zbrojenie elementów przęsła tj. płyty pomostu i kap chodnikowych wykorzystano pręty kompozytowe GFRP.
- **Koncepcja 2** – obiekt o konstrukcji przęsła z belek prefabrykowanych typu „T” z żelbetową płytą pomostu. W koncepcji 2 jako zbrojenie elementów przęsła tj. płyty pomostu i kap chodnikowych wykorzystano pręty stalowe.
- **Koncepcja 3** – obiekt o konstrukcji przęsła z belek stalowych zespolonych z żelbetową płytą pomostu. W koncepcji 3 jako zbrojenie elementów przęsła tj. płyty pomostu i kap chodnikowych wykorzystano pręty stalowe.

Koszty inwestora

Zgodnie z powyższym poszczególne warianty różnią się konstrukcją nośną przęsła. Takie zróżnicowanie ma wpływ na inne elementy obiektu takie jak posadowienie, sposób oparcia przęsła na przyczółkach (ilość łożysk) itp. Główne różnice przedstawiono w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Różnice w poszczególnych wariantach

Element	Koncepcja 1 dźwigar FRP	Koncepcja 2 belki typu "T"	Koncepcja 3 zespolony stalowo- betonowy	Komentarz
Dźwigar	Kompozytowy	Belka prefabry- kowana typu "T"	Dźwigar zespolony	Różnicowanie koncepcji
Posadowienie	Pale CFA długości 130m	Pale CFA dłu- gości 150m	Pale CFA długości 130m	Zmiany wynikają z różnicy ciężarów konstrukcji
Podpory	Żelbetowe masywne $V=83.8m^3$	Żelbetowe masywne $V=86.8m^3$	Żelbetowe masywne $V=92.8m^3$	Zmianie ulega kształt przyczółku, objętości betonu i ilości zbrojenia
Płyta pomostu	Beton lekki LC35/38, zbrojona pręta- mi kompozyto- wymi GFRP	Beton C35/45, zbrojona prę- tami stalowymi	Beton C35/45, zbrojona prętami stalowymi	Zmiana ze względów konstrukcyjno- wytrzymałościowych
Kapy chodnikowe	Beton lekki LC30/33, zbro- jone prętami kompozytowymi GFRP	Beton C30/37, zbrojona prę- tami stalowymi	Beton C30/37, zbrojona prętami stalowymi	Zmiana ze względów konstrukcyjno- wytrzymałościowych
Łożyska	4 szt. o nośności 1500kN	8 szt. o nośno- ści 2000kN	14 szt. o nośności 1500kN	Zmiana ze względów konstrukcyjno- wytrzymałościowych

Oprócz elementów wymienionych w powyższej tabeli, zmianie ulegają również czynniki, nie wpływające w znaczącym stopniu na całkowity koszt inwestycji. Są to: ilości i/lub systemy zabezpieczeń antykorozyjnych oraz hydroizolacji. Wartości tych pozycji nie przedstawiano w tabeli, ale uwzględniono w kalkulacji kosztowej.

W ramach przebudowy obiektu mostowego, niezbędne jest również przebudowanie dojazdów do mostu. Przy wyliczaniu kosztów związanych z budową obiektu brano pod uwagę nie tylko budowę samego mostu, ale całość inwestycji. Koszty budowy wyliczono na podstawie cen jednostkowych zawartych w biuletynach Sekocenbud [5, 6, 7, 8]. Ceny niezawarte w publikacji uzyskano od producentów i wykonawców elementów.

Oprócz wariantowości rozwiązań dot. budowy przęsła, przyjęto także różniące się od siebie rozwiązania w zakresie strategii utrzymaniowej obiektu. W analizie ograniczono się do przęsła obiektów. Przyjęto że podpory będą utrzymywane w jednakowym stopniu w każdym wariantcie, a sam kształt przy-

czółków będzie miał pomijalny wpływ na koszty napraw. Czas (rok) wybudowania obiektu jest określany jako $T=0$. Założono cykl życia technicznego obiektu równy 75lat. Naprawy będą odbywały się co 15 lat, i będą obejmowały czynności przedstawione w tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Strategie utrzymaniowe dla poszczególnych wariantów

Strategie utrzymaniowe dla poszczególnych wariantów			
Czas cyklu życia [rok]	Koncepcja 1 dźwigar FRP	Koncepcja 2 belki typu „T”	Koncepcja 3 zespolony stalowo-betonowy
T=0	Budowa	Budowa	Budowa
T+15	<ul style="list-style-type: none"> - Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu - Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego płyty pomostu 	<ul style="list-style-type: none"> - Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu - Remont poprzecznic i belek „T” - Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego poprzecznic betonowych i belek „T” 	<ul style="list-style-type: none"> - Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu - Remont płyty pomostu - Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego płyty pomostu - Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego dźwigarów
T+30	<ul style="list-style-type: none"> - Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu - Remont płyty pomostu - Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego płyty pomostu - Wymiana łożysk i dylatacji 	<ul style="list-style-type: none"> - Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu - Remont poprzecznic i belek „T” - Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego poprzecznic betonowych i belek „T” - Wymiana łożysk i dylatacji 	<ul style="list-style-type: none"> - Rozbiórka starej płyty pomostu - Wykonanie nowej płyty pomostu - Ponowne wykonanie wyposażenia - Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego dźwigarów - Wymiana łożysk i dylatacji
T+45	<ul style="list-style-type: none"> - Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu - Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego płyty pomostu 	<ul style="list-style-type: none"> - Rozbiórka starej płyty pomostu - Wykonanie nowej płyty pomostu - Ponowne wykonanie wyposażenia - Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego poprzecznic betonowych i belek „T” 	<ul style="list-style-type: none"> - Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu - Remont płyty pomostu - Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego płyty pomostu - Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego dźwigarów
T+60	<ul style="list-style-type: none"> - Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu - Remont płyty pomostu - Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego płyty pomostu - Wymiana łożysk i dylatacji 	<ul style="list-style-type: none"> - Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu - Remont poprzecznic i belek „T” - Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego poprzecznic betonowych i belek „T” - Wymiana łożysk i dylatacji 	<ul style="list-style-type: none"> - Rozbiórka starej płyty pomostu - Wykonanie nowej płyty pomostu - Ponowne wykonanie wyposażenia - Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego dźwigarów - Wymiana łożysk i dylatacji
T+75	<ul style="list-style-type: none"> - Rozbiórka przęsła i wyposażenia - Utylizacja i składowanie materiałów z rozbiórki 	<ul style="list-style-type: none"> - Rozbiórka przęsła i wyposażenia - Utylizacja i składowanie materiałów z rozbiórki 	<ul style="list-style-type: none"> - Rozbiórka przęsła i wyposażenia - Utylizacja i składowanie materiałów z rozbiórki - Recycling złomu stalowego

Tabela 4.2. Strategie utrzymaniowe dla poszczególnych wariantów

Strategie utrzymaniowe dla poszczególnych wariantów			
Czas cyklu życia [rok]	Koncepcja 1 dźwigar FRP	Koncepcja 2 belki typu „T”	Koncepcja 3 zespolony stalowo-betonowy
T=0	Budowa	Budowa	Budowa
T+15	<ul style="list-style-type: none"> – Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu – Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego płyty pomostu 	<ul style="list-style-type: none"> – Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu – Remont poprzecznic i belek „T” – Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego poprzecznic betonowych i belek „T” 	<ul style="list-style-type: none"> – Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu – Remont płyty pomostu – Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego płyty pomostu – Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego dźwigarów
T+30	<ul style="list-style-type: none"> – Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu – Remont płyty pomostu – Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego płyty pomostu – Wymiana łożysk i dylatacji 	<ul style="list-style-type: none"> – Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu – Remont poprzecznic i belek „T” – Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego poprzecznic betonowych i belek „T” – Wymiana łożysk i dylatacji 	<ul style="list-style-type: none"> – Rozbiórka starej płyty pomostu – Wykonanie nowej płyty pomostu – Ponowne wykonanie wyposażenia – Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego dźwigarów – Wymiana łożysk i dylatacji
T+45	<ul style="list-style-type: none"> – Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu – Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego płyty pomostu 	<ul style="list-style-type: none"> – Rozbiórka starej płyty pomostu – Wykonanie nowej płyty pomostu – Ponowne wykonanie wyposażenia – Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego poprzecznic betonowych i belek „T” 	<ul style="list-style-type: none"> – Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu – Remont płyty pomostu – Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego płyty pomostu – Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego dźwigarów
T+60	<ul style="list-style-type: none"> – Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu – Remont płyty pomostu – Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego płyty pomostu – Wymiana łożysk i dylatacji 	<ul style="list-style-type: none"> – Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu – Remont poprzecznic i belek „T” – Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego poprzecznic betonowych i belek „T” – Wymiana łożysk i dylatacji 	<ul style="list-style-type: none"> – Rozbiórka starej płyty pomostu – Wykonanie nowej płyty pomostu – Ponowne wykonanie wyposażenia – Odnowienie zabezpieczenia antykorozyjnego dźwigarów – Wymiana łożysk i dylatacji
T+75	<ul style="list-style-type: none"> – Rozbiórka przęsła i wyposażenia – Utylizacja i składowanie materiałów z rozbiórki 	<ul style="list-style-type: none"> – Rozbiórka przęsła i wyposażenia – Utylizacja i składowanie materiałów z rozbiórki 	<ul style="list-style-type: none"> – Rozbiórka przęsła i wyposażenia – Utylizacja i składowanie materiałów z rozbiórki – Recycling złomu stalowego

Dla wariantu 1 przyjęto, że zastosowanie jako zbrojenia prętów kompozytowych zwiększy trwałość płyty pomostu i wyeliminuje konieczność jej remontu. Pręty kompozytowe nie korodują, a środowisko nad rzeką jest mało agresywne. W przypadku koncepcji 2 założono całkowitą wymianę płyty pomostu po 45 latach a w koncepcji 3 co 30 lat. Założenie wynika z faktu, że płyta pomostu

z wariantu 2. oparta na belkach typu „T” jest od spodu całkowicie chroniona przed wpływem powietrza atmosferycznego. W koncepcji 3 płyta jest bardziej odsłonięta od spodu stad bardziej narażona na korozję. Koszty remontów, napraw i utrzymania wyliczono na podstawie cen jednostkowych zawartych w biuletynach Sekocenbud.

Podczas rozbiórki powstają odpady materiałowe podlegające utylizacji. Poszczególne koncepcje będą się różnić typami (beton, stal zbrojeniowa, stal konstrukcyjna, pręty zbrojeniowe kompozytowe, dźwigary kompozytowe) i ilościami materiałów podlegających utylizacji. Przyjmuje się optymistyczny wariant, że po rozbiórce 70% dźwigarów kompozytowych zostanie ponownie wykorzystanych. Uzasadnia się to tym, że część dźwigarów może ulec znacznemu zniszczeniu podczas rozbiórki betonowej poprzecznicy. Długość całkowita obiektu to 22,3m, natomiast poprzecznic mają po 1,3m długości, co oznacza że uszkodzeniu ulegnie około 15% dźwigara. Przyjmuje się że rozbiórka zespolonej z dźwigarem płyty pomostu nie uszkodzi dźwigarów ze względu na następujące czynniki:

- zastosowanie lekkiego betonu, który jest bardziej kruchy i łatwiejszy do rozbierania,
- powierzchnię dźwigarów, która nie jest chropowata co powoduje że połączenie beton-FRP nie jest dokładne i umożliwi odspajanie się betonu,
- sposób zespolenia, tj. blachy ze śrubami, które w razie zniszczenia śrub można zdemontować i wymienić na nowe.

Dodatkowo uznaje się, że ze względu na brak badań w zakresie zmiany wytrzymałości kompozytów wystawionych na działanie warunków atmosferycznych w dłuższym okresie czasu, po demontażu dźwigarów zostaną one wykorzystane do budowy konstrukcji o mniejszym znaczeniu komunikacyjnym i podlegającej mniejszym obciążeniom, np. kładki pieszo-rowerowe. Zmniejszenie wykorzystania dźwigara do 70% jego długości wynika z faktu, że takie konstrukcje najczęściej mają mniejsze rozpiętości. Reasumując zakłada się 15% strat podczas rozbiórki poprzecznic betonowych, 15% odpadu, 70% wykorzystania ponownego dźwigara. W wariantcie 2 przyjmuje się całkowitą rozbiórkę obiektu i utylizację materiałów. Nie przewiduje się możliwości ponownego wbudowania belek „T” ani żelbetowej płyty pomostu. W wariantcie 3 wybrano przyjazny środowisku i korzystny przypadek, w którym przewiduje się wykorzystanie 90% konstrukcji stalowej ponownie. Uzasadnia się to faktem, że około 10% mostu będą stanowiły poprzecznic, które jako elementy krótkie, zapewne nie znajdą swojego ponownego zastosowania. Zakłada się oddanie zarówno poprzecznic jak i stalowych elementów wyposażenia (barieroporęcze) na składowisko złomu. Pozostałe, nie wymienione wcześniej, materiały i elementy takie jak: beton (żelbet), krawężniki polimerobetonowe, łożyska, nawierzchnię i izolację należy zutylizować. Koszty rozbiórek wyliczono na podstawie cen jednostkowych zawartych w biuletynach Sekocenbud.

Koszty użytkowników i społeczne

Jako koszty użytkowników analizowano także koszty związane z budową, remontami i rozbiórką mostu. W czasie eksploatacji wszystkie koncepcje będą miały jednakowe parametry użytkowe, przez co będą jednakowo obciążać użytkowników. Natomiast wymierne koszty ponoszone przez użytkowników będą wynikały z różnic w czasie trwania robót na etapie budowy i remontu. Wzrost kosztów wynika z konieczności wyłączenia obiektu z użytkowania na okres robót. Obliczenia kosztów wykonano na podstawie „Instrukcji oceny efektywności ekonomicznej przedsięwzięć drogowych i mostowych dla dróg powiatowych” [3]. W czasie robót zostaną wyznaczone objazdy. Będą one miały różne długości, tj. około 2.1km dla samochodów do 3.5t oraz 17.5km dla pojazdów o wyższym ciężarze. Wartości te wyznaczano na podstawie danych rzeczywistych tj. długości rzeczywistych objazdów które wyznaczono na czas robót. Do kosztów użytkowników zaliczono:

- koszty eksploatacji, czyli wzrost kosztów eksploatacyjnych pojazdów ze względu na wydłużenie trasy przejazdu,
- koszty przewozów pasażerskich i towarowych uwzględniających wydłużenie czasu przejazdu,
- koszty wypadków drogowych, ze względu na podwyższenie ryzyka wypadków, związanego bezpośrednio z długością dodatkowego przejazdu.

Ze względu na różnicę w strategii utrzymaniowej (tabela 4.3) czas poszczególnych budowy oraz remontów dla poszczególnych wariantów (koncepcji) będzie różny, co przedstawiono w tabeli poniżej.

Tabela 4.3. Czas trwania robót dla poszczególnych wariantów

Czas trwania robót (ograniczeń w ruchu)			
Czas cyklu życia [rok]	Koncepcja 1 dźwigar FRP	Koncepcja 2 belki typu „T”	Koncepcja 3 zespolony stalowo-betonowy
T=0	Budowa: 122 dni	Budowa: 125 dni	Budowa: 129 dni
T+15	Remont: 16 dni	Remont: 18 dni	Remont: 18 dni
T+30	Remont: 18 dni	Remont: 20 dni	Remont z ponownym wykonaniem płyty pomostu: 42 dni
T+45	Remont: 16 dni	Remont z ponownym wykonaniem płyty pomostu: 40 dni	Remont: 18 dni
T+60	Remont: 18 dni	Remont: 20 dni	Remont z ponownym wykonaniem płyty pomostu: 42 dni
T+75	Rozbiórka: 10 dni	Rozbiórka: 12 dni	Rozbiórka: 10 dni

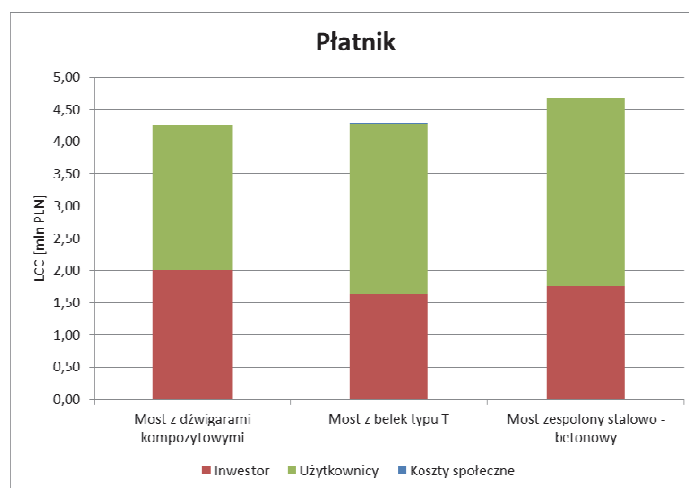
Koszty społeczne uwzględniają negatywny wpływ zwiększonych emisji toksycznych składników spalin. Są one bezpośrednio związane z czasem robót budowlanych oraz remontowych. W tym okresie użytkownicy drogi muszą korzystać z objazdów, co generują dodatkową emisję spalin. Koszty użytkowników i koszty społeczne wyliczono zgodnie z wytycznymi [3].

Wyniki

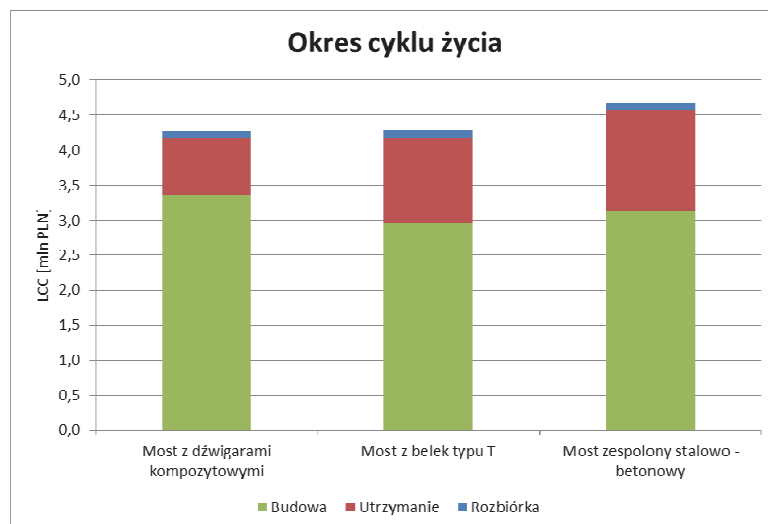
Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 4.4 oraz wykresy (rys. 4.3 i 4.4).

Tabela 4.4. Zestawienie kosztów w cyklu życia wraz z podziałem na płatników i okres cyklu życia

Nazwa kategorii kosztów		Wariant					
		Koncepcja 1 dźwigar FRP		Koncepcja 2 belki typu „T”		Koncepcja 3 zespólny stalowo-betonowy	
		[mln zł]	[%]	[mln zł]	[%]	[mln zł]	[%]
Koszty całkowite cyklu życia (LCC)		4,263	100	4,288	101	4,669	110
Płatnik	Inwestor	2,012	100	1,650	82	1,758	87
	Użytkownicy	2,244	100	2,630	117	2,902	129
	Koszty społeczne	0,007	100	0,008	110	0,009	118
Okres cyklu życia	Budowa	3,358	100	2,965	88	3,133	93
	Utrzymanie i administracja	0,814	100	1,212	149	1,443	177
	Rozbiórka	0,092	100	0,111	121	0,092	101



Rys. 4.3. Koszty LCC z podziałem ze względu na płatnika



Rys. 4.4. Koszty LCC z podziałem ze względu na okres cyklu życia

Analizując otrzymane wartości można stwierdzić, że najtańszym jest wariant 1 z dźwigarem kompozytowym FRP, jednakże różnice w całkowitym koszcie życia nie są duże. Maksymalna różnica to 9,5%. Zatem, nie ma wariantu którego przewaga byłaby na tyle znaczna, aby uznać go za najlepszy. Porównując koszty ponoszone przez Inwestora należy stwierdzić, że najtańszym z jego punktu widzenia rozwiązaniem jest konstrukcja z kompozytu. Najdroższym jest wariant zespolony stalowo-betonowy.

W przypadku użytkowników i kosztów społecznych najlepszym jest most kompozytowy. Różnice pomiędzy poszczególnymi wariantami są już procentowo większe i sięgają nawet 29,3%. Należy wyraźnie zaznaczyć że koszty społeczne mają niewielki udział w całkowitym koszcie życia obiektu, tj. około 0,2%, czyli mają charakter pomijalny. Natomiast koszty które ponoszą użytkownicy są największym (przy podziale ze względu na płatnika) kosztem w całym życiu obiektu i mogą stanowić nawet 2/3 całkowitej wartości w życiu obiektu, a więc jest to składowa o największym wpływie na wartość całkowitą w cyklu życia. Wyniki analizy jednoznacznie potwierdzają, że most kompozytowy jest rozwiązaniem lepszym z punktu widzenia czasu, gdyż na koszty użytkowników wpływa głównie czas trwania robót budowlanych, utrzymaniowych i rozbiórkowych.

Biorąc pod uwagę okres cyklu życia obiektu największy udział w cenie ma koszt budowy (około 67–79%). I tutaj najdroższym wariantem jest most kompozytowy, a najtańszym z belek typu „T”. Nie powinno to dziwić, gdyż można stwierdzić, że w Polsce prym w konstrukcjach mostowych wiezie właśnie beton. Belki typu „T” są prefabrykatami dostępnymi na rynku już od wielu lat dlatego technologia ich wywarzania została już zoptymalizowana. Najdroższym

rozwiązaniem w tym przypadku jest konstrukcja z FRP. Należy tu mieć na uwadze, że technologia kompozytów FRP w Polsce nie jest na wysokim poziomie. Rozwiązanie to, jeśli chodzi o inwestora jest najdroższe. Dodatkowo wpływ na wynik ma aktualny poziom wiedzy na temat zachowania kompozytów z punktu widzenia nośności. Przeglądając aktualnie dostępne normy np. amerykańskie widać, jak wielkim współczynnikiem bezpieczeństwa są obciążone tego typu konstrukcje. Nośność materiałów FRP jest znacznie zredukowana co powoduje, że trzeba zużyć większej ich ilości co z kolei podnosi cenę. Być może w ramach rozwoju technologii materiał zostanie lepiej przebadany i współczynniki staną się mniej rygorystyczne, co obniży ceny mostów kompozytowych. Przy aktualnym podejściu do przetargów i pieniędzy publicznych wygranym byłby niewątpliwie most z belek typu „T”.

Kolejnym z kosztów pojawiającym się w cyklu życia obiektu jest utrzymanie i administracja. W tym przypadku widać wyraźną przewagę konstrukcji z FRP. Różnicę pomiędzy poszczególnymi wariantami są znaczne i dochodzą nawet do 77%. Cenowo najdroższy wariant stalowy jest droższy o 630 tys. zł. od najtańszego kompozytowego, którego całkowity koszt utrzymania wyniesie 813 tys. Dzięki tej różnicy wariant kompozytowy jest najtańszy jeśli chodzi o całkowity koszt życia, mimo większych kosztów inwestycyjnych podczas budowy.

Jeśli chodzi o koszt rozbiórki ma on najmniejszy wpływ na całkowity koszt życia obiektu. Mimo, że różnice procentowo mogą być znaczne – nawet o 20% na niekorzyść wariantu z belek typu „T”, to całkowita różnica w kosztach utylizacji obiektu to około 19 tys, co nie jest wartością znaczną jeśli chodzi o całkowity koszt życia obiektu. Warto zauważyć, że konstrukcja stalowa ma podobny koszt utylizacji co obiekt kompozytowy. Za utylizację betonu i kompozytu należy bowiem zapłacić, natomiast stal oddana na złom to częściowy zwrot kosztów za surowiec.

Wnioski

Prezentowana wyżej analiza pozwala wysunąć następujące wnioski:

- Wśród wybranych wariantów brak wyraźnego lidera;
- Koszty użytkowników stanowią znaczną część kosztów życia;
- Największe koszty ponoszone są w czasie budowy;
- Koszty społeczne i rozbiórka stanowią znikomą część kosztów całkowitych;
- Koszty użytkowników rosną wraz z długością wykonywanych prac budowlanych;
- Rok powstania kosztu znacząco wpływa na jego wartość w czasie T+0.

Podsumowanie

Poszczególne warianty są do siebie bardzo zbliżone jeśli chodzi o całkowity koszt życia. Różnice cenowe poszczególnych wariantów nie są na tyle duże, aby można jednoznacznie określić wariant preferowany. Należy mieć jednak na uwadze, że zarówno beton jak i stal są już materiałami obecnymi na rynku od

dłuższego czasu. Cena betonu i stali nie powinna się znacznie zmieniać jeśli chodzi o koszty produkcji. Natomiast można się spodziewać wzrostu cen stali jako surowca, ze względu na jego ograniczone zasoby. W przypadku kompozytów FRP rozwój technologii wykonania może się przyczynić do obniżenia kosztów produkcji. Największe koszty inwestycji ponoszą użytkownicy. Związane są one bezpośrednio z czasem budowy oraz utrzymania i rozbioru. Konstrukcje z FRP są bardziej odporne na błędy wykonawcze i korozję. Tutaj również można się spodziewać, że konstrukcja z FRP będzie miała znaczną przewagę w perspektywie przyszłych lat.

LITERATURA

- [1] Dz.U.2000.63.735. Warunki techniczne, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie. Polska: Minister Transportu i Gospodarki Morskiej, 2000.
- [2] Ehlen, M., *BridgeLCC 2.0 users manual. Life-cycle costing software for preliminary design of bridges*, Gaithersburg, USA, Polska: National Institute of Standards and Technology, 2003.
- [3] Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Instrukcja oceny efektywności ekonomicznej przedsięwzięć drogowych i mostowych dla dróg powiatowych, Warszawa, 2008.
- [4] PN-85/S-10030. (1982). Obiekty mostowe. Obciążenia. Polski Komitet Normalizacyjny. 2008.
- [5] Sekocenbud. Biuletyn cen robót drogowych, mostowych i torowych BCD IV/2016, Warszawa: Ośrodek Wdrożeń Ekonomiczno-Organizacyjnych Budownictwa PROMOCJA Sp. z o.o., 2016.
- [6] Sekocenbud. Biuletyn cen robót przygotowawczych BCP IV/2016. Warszawa: Ośrodek Wdrożeń Ekonomiczno-Organizacyjnych Budownictwa PROMOCJA Sp. z o.o., 2016.
- [7] Sekocenbud. Biuletyn cen robót remontowo-budowlanych oraz zabytkowych BRR 4/2016. Warszawa: Ośrodek Wdrożeń Ekonomiczno-Organizacyjnych Budownictwa PROMOCJA Sp. z o.o., 2016.
- [8] Sekocenbud. Biuletyn cen robót ziemnych i inżynierskich BRZ 4/2016. Warszawa: Ośrodek Wdrożeń Ekonomiczno-Organizacyjnych Budownictwa PROMOCJA Sp. z o.o., 2016.

COMPARATIVE LCCA ANALYSIS OF THE FRP COMPOSITE AND CONVENTIONAL BRIDGES

Summary

The article presents actual comparative LCCA analysis of the FRP composite and conventional bridges (made of prefabricated concrete T beams and steel-concrete composite bridge) considering the life cycle cost (LCCA)

The paper discusses:

- what is life cycle cost analysis (LCCA),

- costs related to the life of the bridge,
- basic characteristics of the objects being compared,
- results of analysis and conclusions.