

TOMASZ SIWOWSKI¹⁾

PROPOZYCJA ZASTOSOWANIA ZASAD ZRÓWNOWAŻONEGO ROZWOJU W MODERNIZACJI MOSTU

STRESZCZENIE. Zrównoważony rozwój (ang. *sustainable development*) jest filozofią rozwoju społeczno-ekonomicznego zharmonizowanego z poszanowaniem środowiska. Ogólnym założeniem tej filozofii jest zredukowanie negatywnego oddziaływania na środowisko, spowodowanego wykorzystywaniem zasobów w sytuacji wzrostu gospodarczego. Dlatego zaleca ona działania w celu zminimalizowania negatywnego wpływu produktów na środowisko we wszystkich fazach cyklu ich życia tj. „od kołyski po grób”. Działania te opierają się na wiedzy, jakiej dostarcza analiza cyklu życia, w której wykorzystuje się odpowiednie narzędzia, służące do oceny i porównania materiałów, konstrukcji, technologii i procesów pod kątem zrównoważonego rozwoju. Oszacowanie kosztów oraz oddziaływania obiektu na środowisko w ciągu całego cyklu życia jest przedmiotem dwóch rodzajów analiz: ekonomicznej oceny cyklu życia (LCCA) oraz środowiskowej oceny cyklu życia (LCA). Wyniki otrzymane z tych dwóch analiz służą łącznie do oceny stopnia wdrożenia zasad zrównoważonego rozwoju przez porównywane warianty konstrukcyjne, materiałowe lub technologiczne.

Przykładowe zastosowanie obu analiz do oceny wariantów modernizacji stalowego mostu kratownicowego jest przedmiotem niniejszej pracy. Porównawczą analizę kosztów i wpływów środowiskowych w ciągu cyklu życia mostu przeprowadzono dla trzech wariantów modernizacji mostu z wykorzystaniem nowej płyty pomostu: żelbetowej, stalowej i aluminiowej. Ekonomiczna i środowiskowa ocena wariantów modernizacji umożliwiła holistyczne spojrzenie na dość powszechny współcześnie problem wymiany pomostu w tego typu obiektach. Jednocześnie uzyskane wyniki jednoznacznie wykazały, że zarówno koszty generowane

¹⁾ dr inż. – Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Rzeszowskiej

w cyklu życia mostu, jak również związane z tym obciążenie środowiskowe były najmniejsze w przypadku pomostu aluminiowego. Tylko analiza cyklu życia może wykazać, że stosowanie w mostownictwie niekonwencjonalnych materiałów konstrukcyjnych o wysokiej trwałości (w tym przypadku stopu aluminium) jest działaniem w kierunku jak najlepszego spełniania zasad zrównoważonego rozwoju.

1. WPROWADZENIE

Zrównoważony rozwój (ang. *sustainable development*) jest filozofią rozwoju społeczno-ekonomicznego zharmonizowanego z poszanowaniem środowiska. Filozofia ta umożliwia pogodzenie dążenia do osiągnięcia satysfakcjonującego wyniku ekonomicznego z troską o otoczenie społeczne i środowisko naturalne. Podstawy instytucjonalne zrównoważonego rozwoju zostały przyjęte na konferencji ONZ pn. „Środowisko i rozwój” zwanej „Szczytem Ziemi”, która odbyła się w czerwcu 1992 r. w Rio de Janeiro. Głównym celem konferencji było dokonanie zasadniczych zmian w systemie rządzenia na świecie oraz wytyczenie kierunków rozwoju gospodarczego tak, aby trwale zabezpieczyć funkcjonowanie ekosystemu Ziemi obecnie i w przyszłości, nie tracąc z oczu potrzeb społecznych obecnego i przyszłych pokoleń. Przyjęta na konferencji tzw. Agenda-21 stanowi zbiór celów i zaleceń dotyczących poszczególnych sektorów zarządzania środowiskiem oraz ogólnych zagadnień ekonomicznych i społecznych. Zawarta tam idea zrównoważonego rozwoju opiera się na trzech filarach:

- efektywność ekonomiczna – zysk dla zbiorowości, uwzględniający koszty społeczne i środowiskowe,
- troska o środowisko – ochrona naturalnych nieodnawialnych zasobów, zminimalizowanie negatywnego oddziaływania na otoczenie;
- równowaga społeczna – tworzenie nowych miejsc pracy i aktywne działania w celu podnoszenia jakości życia.

Naprzeciw wymogom zrównoważonego rozwoju wyszedł szósty wspólnotowy program działań Unii Europejskiej w zakresie środowiska naturalnego, mający na celu przygotowanie Strategii Tematycznej w sprawie zrównoważonego wykorzystywania i zarządzania zasobami. Ogólnym celem strategii będzie zredukowanie negatywnego oddziaływania na środowisko, spowodowanego wykorzystywaniem zasobów w sytuacji wzrostu gospodarczego. W celu rozwiązania problemów dotyczących eksploatacji zasobów naturalnych Unia Europejska w ramach Strategii... wprowadzi działania obejmujące rejestrację i kontrolę eksploatacji zasobów naturalnych przez cały okres ich użytkowania, tj. „od kołyski po grób”, oraz opracuje działania konieczne do zmniejszenia ich wpływu na środowisko. Zasadniczym celem Strategii... podczas 25-letniego okresu jej realizacji jest określenie najpoważniejszych dla środowiska skutków eksploatacji zasobów naturalnych oraz promowanie rozwiązań i działań mających na celu ich przezwyciężenie, dzięki pomnażaniu wiedzy na ich temat oraz zapewnianiu łatwego do niej dostępu. Aby zrealizować ten cel, Strategia... przewiduje m.in. opracowanie i wdrożenie odpowiednich narzędzi, służących do oceny i porównania materiałów, technologii i procesów pod kątem zrównoważonego rozwoju.

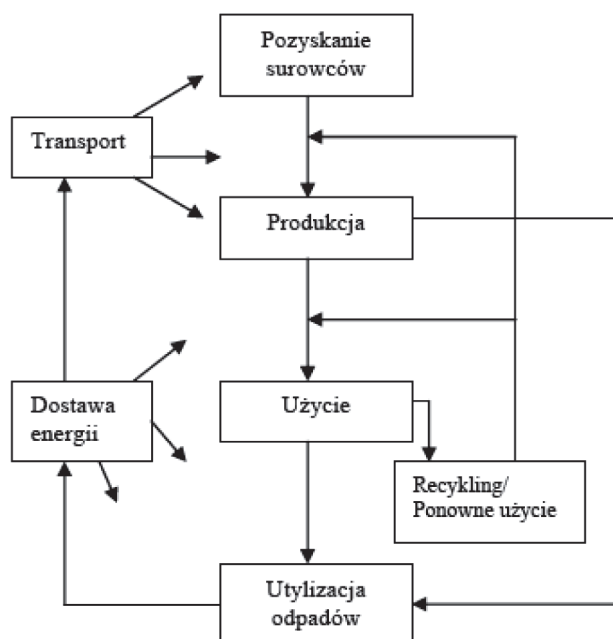
Do oceny stopnia wdrożenia zasad zrównoważonego rozwoju przez porównywane warianty konstrukcyjne, materiałowe lub technologiczne są stosowane coraz częściej dwie analizy:

- ekonomiczna ocena cyklu życia (ang. *Life Cycle Cost Analysis* LCCA),
- środowiskowa ocena cyklu życia (ang. *Life Cycle Assessment* LCA).

Obie analizy pozwalają na oszacowanie kosztów oraz oddziaływania na środowisko w ciągu całego życia obiektu. Cykl życia każdego obiektu obejmuje cztery kolejno następujące po sobie fazy (rys.1):

- pozyskanie surowców: wydobywanie, przetwarzanie surowców,
- produkcja: wytworzenie prefabrykatów, półproduktów, montaż konstrukcji,
- użytkowanie: eksploatacja, utrzymanie, naprawy,
- końcowe zagospodarowanie: rozbiórka, recykling, utylizacja odpadów.

We wszystkich fazach występuje także dostawa i zużycie energii, natomiast w niektórych fazach i pomiędzy nimi występuje transport. W każdej fazie poszczególne, charakterystyczne dla niej procesy generują określone koszty i są przyczyną różnego rodzaju emisji, a każdy rodzaj emisji w specyficzny sposób oddziałuje na środowisko.



Rys.1. Główne fazy cyklu życia produktu / obiektu
Fig.1. Main phases of product / structure life cycle

Ponieważ obie analizy muszą uwzględniać bardzo wiele różnych parametrów, w praktycznym zastosowaniu jest konieczne wykorzystanie zestawu wskaźników, które dokładnie uchwycą wpływ oraz oszacują rezultat środowiskowy i ekonomiczny, związany z każdym parametrem. Wskaźniki pełnią obecnie zasadniczą rolę w ocenie materiałów, technologii i procesów pod kątem zrównoważonego rozwoju. Dla konstrukcji budowlanych przyjmuje się zazwyczaj następujące grupy wskaźników:

- do opisu aspektów ekonomicznych – wskaźniki oceniające minimalizację wszystkich kosztów w cyklu życia obiektu przy jednoczesnej optymalizacji stosunku korzyści do nakładów,
- do opisu aspektów ekologicznych – wskaźniki oceniające zamknięty cykl życia materiałów, prowadzący do ochrony zasobów i minimalizacji odpadów, a także wskaźniki oceniające redukcję emisji CO₂ oraz zużycie energii,
- do opisu aspektów socjalnych – wskaźniki oceniające bezpieczeństwo i estetykę obiektu, a w przypadku budownictwa mieszkaniowego także komfort klimatu wewnętrznego i akustycznego oraz wpływ na zdrowie użytkowników.

Przykładowe zastosowanie obu analiz cyklu życia, wykorzystujących własne i publikowane wskaźniki, do oceny wariantów modernizacji stalowego mostu kratowego jest przedmiotem niniejszej pracy.

2. ZASADY I METODYKA OCENY CYKLU ŻYCIA OBIEKTU MOSTOWEGO

Dla każdej administracji drogowej mosty to inwestycja długoterminowa, która w cyklu życia technicznego wymaga zarówno bieżącego utrzymania, jak i okresowych napraw, modernizacji lub wymiany poszczególnych elementów. Dlatego każdy most wymaga nakładów finansowych dla pokrycia kosztów szeregu działań utrzymaniowych, planowanych w jego cyklu życia. Analiza ekonomiczna inwestycji mostowej musi zatem uwzględniać przyszłe wydatki, związane z utrzymaniem mostu oraz jego rozbiórką. Podejmowanie decyzji o wyborze wariantu jedynie na podstawie kosztów budowy może prowadzić bowiem do dużych strat finansowych, zarówno inwestora jak również użytkowników mostu. Aby tych strat uniknąć, przed wyborem ostatecznego wariantu wskazane (a czasami konieczne) jest zatem przeprowadzanie analizy LCCA. Analiza LCCA może być różnorodnie wykorzystywana w procesie podejmowania decyzji w dziedzinie infrastruktury mostowej. Jednym z głównych sposobów wykorzystania LCCA jest ustalenie najbardziej efektywnego ekonomicznie wariantu przy budowie nowego obiektu. Drugim z typowych zastosowań jest opracowanie najkorzystniejszej ekonomicznie strategii utrzymaniowej, dzięki możliwości oszacowania i porównania kosztów różnych działań podejmowanych w przyszłości – w cyklu życia obiektu. Jedną z kluczowych funkcji każdej analizy LCCA jest ocena niepewności, niezawodności i ryzyka w przyjmowaniu podstawowych parametrów wejściowych analizy. Pomimo, że czyni to analizę bardziej złożoną, pozwala jej wykonawcy na bardziej realistyczną ocenę porównywanych rozwiązań i strategii przez uwzględnienie w analizie np. zmienności kosztów lub czasu wykonania poszczególnych

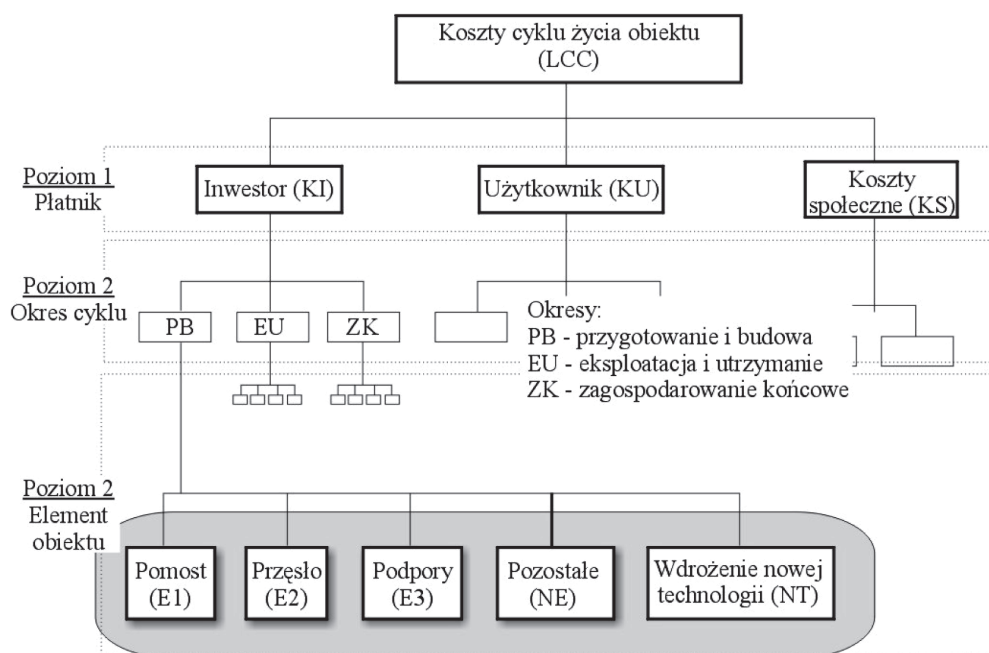
działań. W końcu jednym z fundamentalnych zastosowań LCCA jest ocena nowych materiałów i rozwiązań konstrukcyjnych. Te materiały i rozwiązania są zazwyczaj znacznie droższe przy bezpośrednim wbudowaniu i nie mogą konkurować z rozwiązaniami tradycyjnymi. Jednakże oszczędności w całym cyklu życia, uzyskane dzięki ich wdrożeniu, mogą wielokrotnie przewyższyć różnicę w kosztach wbudowania. Tylko analiza typu LCCA może to wykazać. Z drugiej strony nowe materiały mają zazwyczaj krótką historię stosowania i dlatego brakuje jeszcze rzetelnych danych, charakteryzujących ich zachowania w przyszłości. W analizie LCCA można uwzględnić ten problem, przyjmując odpowiednio wysoko poziom niepewności, związany z zastosowaniem nowego materiału.

Główne etapy typowej analizy LCCA projektów infrastrukturalnych są następujące [1]:

- a) zdefiniowanie różnych wariantów technicznych dla obiektu,
- b) zdefiniowanie głównych parametrów ekonomicznych: okresu analizy (cyklu życia), stopy dyskontowej, wskaźnika inflacji,
- c) ustalenie terminów i zakresu głównych działań w cyklu życia obiektu (tzw. strategia utrzymaniowa),
- d) oszacowanie kosztów generowanych przez poszczególne działania w cyklu życia obiektu,
- e) obliczenie kosztów całkowitych w cyklu życia obiektu,
- f) wybór rodzaju analizy LCCA: deterministycznej lub probabilistycznej,
- g) analiza wrażliwości dla uzyskanego wyniku,
- h) analiza wyników końcowych i wnioski.

Ehlen i Marshall [2] opracowali metodykę przeprowadzania analizy LCCA obiektów mostowych, dostosowaną do oceny kosztów cyklu życia nowych materiałów konstrukcyjnych. Metodyka jest zgodna z amerykańskim standardem w dziedzinie LCCA dla materiałów i konstrukcji budowlanych [3] i zawiera specjalny system klasyfikacji kosztów, pozwalający na łatwe porównanie kosztów cyklu życia dla wariantów, wykonanych z konwencjonalnych i technologicznie zaawansowanych materiałów. Koszt cyklu życia każdego z wariantów jest obliczany jako suma kosztów poszczególnych elementów, zdyskontowanych do wartości w roku bazowym (T). Na rysunku 2 pokazano klasyfikację kosztów indywidualnego projektu. Koszt całkowity LCC podzielony jest w pierwszej kolejności w zależności od płatnika: inwestor (KI), użytkownik (KU), tzw. „trzecia strona” czyli koszty społeczne lub środowiskowe (KS). Następnie każda grupa kosztów pierwszego poziomu podzielona jest na kolejne trzy podgrupy kosztów drugiego poziomu, reprezentujące trzy główne okresy w cyklu życia obiektu: przygotowanie i budowa (PB), eksploatacja i utrzymanie (EU), zagospodarowanie końcowe (ZK). Ostatni, trzeci poziom to podział kosztów każdej z podgrup czasowych na koszty generowane przez poszczególne elementy obiektu (E-1, E-2, itd.), koszty nie związane bezpośrednio z żadnym z elementów (NE) oraz

koszty wdrożenia nowego materiału/technologii (NT). Koszty związane z elementami obiektu mostowego rozdziela się zazwyczaj na: podpory, dźwigary główne i pomost. Koszty nie związane z elementami obiektu to np. koszty tymczasowej organizacji ruchu. Koszty wdrożenia nowego materiału/technologii zawierają koszty następujących działań: laboratoryjnych badań materiałowych, badań w skali naturalnej, badań nieniszczących, konsultingu przy projektowaniu i wdrożeniu, badań prototypu, monitoringu po wdrożeniu prototypu, itp. Wydzielenie tych kosztów osobno pozwala na ocenę bezpośrednich i długoterminowych kosztów cyklu życia, związanych z wdrożeniem nowego materiału. Przedstawiona powyżej metodologia LCCA została zautomatyzowana za pomocą oprogramowania komputerowego BridgeLCC 2.0, pozwalającego na łatwe i szybkie przeprowadzanie deterministycznej i probabilistycznej analizy LCCA obiektów mostowych [4]. W niniejszej pracy wykorzystano ten program do analizy porównawczej wariantów modernizacji obiektu mostowego.



Rys.2. Klasyfikacja kosztów cyklu życia projektu infrastrukturalnego
Fig.2. Life cycle costs classification of infrastructural project

Środowiskowa ocena cyklu życia (LCA) jest techniką zarządzania środowiskowego, w której ocenia się efekty środowiskowe (pozytywne i negatywne) związane z produktem w całym okresie jego życia. W analizie LCA jest możliwa pełna ocena wpływu produktu na środowisko, gdyż bierze się pod uwagę wszystkie ekosystemy i ich elementy oraz identyfikuje się transfer oddziaływania na środowisko z jednego

komponentu środowiska na inny. Prawidłowo przeprowadzone badanie LCA ułatwia podjęcie decyzji i wskazanie produktu lub procesu, który w najmniej szkodliwy sposób wpływa na środowisko. Taka informacja razem z innymi czynnikami, takimi jak koszt lub dane dotyczące użytkowania, może być wykorzystana do wyboru produktu z grupy produktów równoważnych technicznie.

Międzynarodowa Organizacja ds. Standaryzacji ISO definiuje LCA jako technikę oceny aspektów środowiskowych i potencjalnych wpływów związanych z produktem, która obejmuje cztery etapy:

1. Określenie celu i zakresu badań.
2. Inwentaryzacja (analiza) zbioru istotnych efektów wejściowych i wyjściowych, jakie wywołuje system produktu (ang. *life cycle inventory LCI*).
3. Ocena potencjalnych wpływów na środowisko związanych z efektami wejściowymi i wyjściowymi systemu (ang. *life cycle impact assessment LCIA*).
4. Interpretacja rezultatów analizy zbioru oraz oceny wpływu w odniesieniu do celów badań.

Schemat blokowy analizy LCA pokazano na rysunku 3. Metodyka sporządzania analizy LCA oraz wykonywanie jej poszczególnych etapów jest szczegółowo opisana w normach serii ISO 14000 [5 - 8] oraz w komentarzu Polskiego Komitetu Normalizacyjnego do norm serii ISO 14000 [9]. Wraz z upowszechnianiem się analiz LCA rozwija się także oprogramowanie oraz bazy danych, służące do analizy zbioru (LCI) oraz oceny wpływu (LCIA). Przegląd oprogramowania do analiz LCA przedstawiono m.in w pracy [10]. Do najczęściej wykorzystywanych w profesjonalnych badaniach należy oprogramowanie EDIP, SimaPro, Umberto i BEES. Jego wybór zależy od przedmiotu badań oraz rodzaju i zakresu prowadzonej analizy.

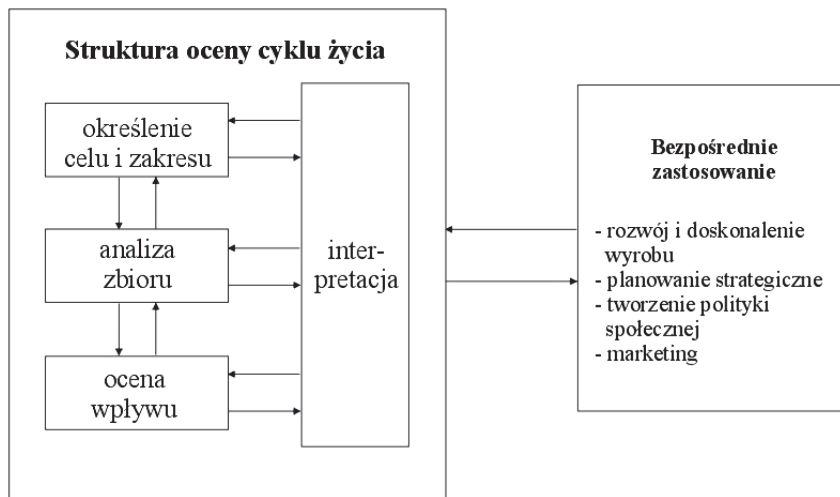
Ostatnio podejmowane są próby integracji obu analiz cyklu życia (LCCA i LCA). Celem tych działań jest próba scharakteryzowania cyklu życia obiektu za pomocą jednego wskaźnika, charakteryzującego spełnienie przez oceniany materiał / konstrukcję / technologię wymagań zrównoważonego rozwoju, i uwzględniającego jednocześnie aspekty ekonomiczne, środowiskowe i społeczne. Jedną z propozycji integracji wyników LCA i LCCA jest wyrażenie podane wzorem (1) poniżej [11]:

$$Score_j = \left[\left(EnvW_t \cdot \frac{EnvS_j}{\sum_j EnvS_j} \right) + \left(EconW_t \cdot \frac{LCC_j}{\sum_j LCC_j} \right) \right] \cdot 100, \quad (1)$$

gdzie:

- $Score_j$ – ogólny wynik dla wariantu j ,
- $EnvW_t, EconW_t$ – wagi ważności odpowiednio dla środowiska i ekonomii,
- $EnvS_j$ – wynik analizy LCA dla wariantu j ,
- LCC_j – wynik analizy LCCA dla wariantu j .

Wzór ten zastosowano w niniejszej pracy do holistycznej oceny cyklu życia dla poszczególnych wariantów modernizacji mostu, a przez to do oceny stopnia realizacji przez dany wariant zasad równoważonego rozwoju.



Rys.3. Etapy analizy LCA wg PN-EN ISO 14040:2000

Fig.3. Stages of LCA analysis according to PN-EN ISO 14040:2000

3. OCENIANE WARIANTY MODERNIZACJI MOSTU

Przedmiotem ekonomicznej i środowiskowej oceny cyklu życia są trzy warianty modernizacji mostu przez Wisłę w Nagnajowie, położonego w ciągu drogi krajowej nr 9 i zbudowanego w latach 1959 - 1961 (rys.4). Podstawowe założenia do modernizacji mostu były związane z koniecznością dostosowania jego parametrów użytkowych do obowiązujących przepisów technicznych [12]. Założono zwiększenie nośności dźwigarów głównych i pomostu oraz uzyskanie 60-letniej trwałości mostu po modernizacji. W przypadku pomostu wymagane trwałości są mniejsze i wynoszą: dla elementów konstrukcyjnych pomostu – 30 lat, dla wyposażenia pomostu (izolacja, nawierzchnia, itp.) – 15 lat oraz dla zabezpieczenia antykorozyjnego stali i betonu – 15 lat. Aby spełnić wyżej wymienione wymagania modernizacja mostu obejmowała m.in: wzmocnienie bezpośrednio stalowych dźwigarów głównych i belek rusztu pomostu, całkowitą wymianę płyty pomostu, odnowę zabezpieczenia antykorozyjnego i wyposażenia, remont podpór. Projekt i realizację modernizacji mostu wg wariantu wybranego przez administratora przedstawił autor w pracy [13].

Podstawowym elementem modernizacji mostu jest całkowita wymiana istniejącej płyty pomostu wraz z wyposażeniem oraz wzmocnienie belek pomostu i dźwigarów głównych. Porównawczą analizę kosztów i wpływów środowiskowych w ciągu cyklu życia mostu przeprowadzono dla trzech wariantów nowej płyty pomostu: żelbetowej,

stalowej i aluminiowej. Wariant trzeci zakłada wykorzystanie do modernizacji paneli pomostu ze stopu aluminium, opisanych przez autora m.in. w pracach [14] i [15]. Ponieważ pozostałe elementy modernizacji mostu (np. rozbiórki, naprawy, zabezpieczenie antykorozyjne dźwigarów, remont podpór, itp.) są niezależne od rodzaju nowego pomostu, nie uwzględniano ich w analizie. W tablicy 1 przedstawiono podstawowe parametry rozpatrywanych wariantów nowego pomostu. Każdy z nich spełnia jednakoż wymagania przepisów dotyczące nośności, natomiast w różny sposób wymagania dotyczące trwałości. Związane jest to głównie z różną trwałością materiałów, z których wykonano pomost. Poza materiałem i trwałością poszczególne warianty pomostu różnią się między sobą także ciężarem jednostkowym oraz związanym z nim zakresem wzmocnienia dźwigarów głównych i belek pomostu. Ponadto założono standardowe dla każdego rodzaju pomostu wyposażenie oraz zabezpieczenie antykorozyjne.



Rys.4. Most przez Wisłę w Nagnajowie
Fig.4. General view of Vistula river bridge in Nagnajow

Tablica 1. Charakterystyka wariantów modernizacji mostu
Table 1. Characterization of bridge modernisation variants

Parametr pomostu	Wariant modernizacji		
	1	2	3
Rodzaj	Płyta żelbetowa, monolityczna	Płyta stalowa, ortotropowa	Płyta aluminiowa, panele z profili wyciskanych
Materiał	Beton zwykły B 40	Stal konstrukcyjna S420	Stop aluminium 6005A
Masa jednostkowa [kg/m ²]	525	151	83
Grubość [mm]	210	12	167
Wypozażenie	Odwodnienie standardowe, izolacja typu SBS, nawierzchnia z dwóch warstwy betonu asfaltowego o grubości 90 mm	Odwodnienie indywidualne, izolacja natryskowa, nawierzchnia z dwóch warstwy betonu asfaltowego o grubości 90 mm	Odwodnienie indywidualne, nawierzchnio-izolacja żywiczna o grubości 10 mm
Zabezpieczenie antykorozyjne	Standardowa powłoka PCC	Metalizacja + standardowy zestaw farb	Nie wymagane
Trwałość [lat]	30	60	60

4. EKONOMICZNA OCENA CYKLU ŻYCIA DLA WARIANTÓW MODERNIZACJI MOSTU

W celu sporządzenia dokładnej analizy ekonomicznej cyklu życia jest niezbędna wiedza dotycząca rodzaju działań, podejmowanych przez administratora obiektu w ciągu całego życia technicznego modernizowanego mostu, tj. kolejno w okresach przygotowania i budowy (w tym przypadku modernizacji), eksploatacji i utrzymania oraz rozbiórki i utylizacji materiałów z rozbiórki. Te działania będą generować zarówno koszty administracji drogowej, koszty użytkowników oraz koszty społeczne. W tablicy 2 podano zestawienie podstawowych prac utrzymaniowych, planowanych do wykonania w czasie całego zakładanego cyklu życia technicznego mostu, tj. 60 lat. W ramach bieżącego utrzymania założono wykonywanie corocznych prac porządkowych, 5-letnich przeglądów i tzw. remontów częściowych pomostu co 7 lat.

Bardzo duży wpływ na całkowity koszt cyklu życia ma przyjęty sposób tymczasowej organizacji ruchu podczas robót modernizacyjnych i utrzymaniowych. Generuje on bowiem bardzo duże koszty użytkowników oraz koszty społeczne w przypadku każdego projektu modernizacyjnego. W analizowanym przypadku tymczasowa organizacja ruchu będzie konieczna dla wszystkich wariantów w latach T, T+15, T+30 oraz

T+45. Związane to jest z wykonaniem wymiany izolacji i nawierzchni, remontów pomostów oraz wykonania nowej płyty pomostu i jej wyposażenia w wariancie 1. Dla wszystkich trzech wariantów założono taką samą tymczasową organizację ruchu, tj. wykonywanie robót połową jezdni, "pod ruchem". Taka organizacja wymaga wprowadzenia ruchu wahadłowego na jednym pasie jezdni, sterowanego sygnalizacją świetlną. Przy długim odcinku drogi objętym robotami (około 1 km) oraz ze względu na natężenie ruchu na drodze krajowej, ograniczenie przejazdu do 1 pasa ruchu spowoduje duże przestoje, korki oraz opóźnienia w ruchu, które znacząco wpływają na ekonomiczne i środowiskowe aspekty cyklu życia dla poszczególnych wariantów modernizacji. Parametrem decydującym o wielkości kosztów użytkowników oraz kosztów środowiskowych jest czas trwania ograniczeń w ruchu, związany z czasem wykonywania robót. Ze względu na różnice w konstrukcji i materiale pomostu oraz technologii jego wykonania (monolit, prefabrykat), czas wykonania robót jest różny w poszczególnych wariantach. Przyjęty w analizie LCCA czas robót (=czas ograniczeń w ruchu) dla poszczególnych wariantów zestawiono w tablicy 3. Należy przyznać, że przyjęty w analizie LCCA wariant tymczasowej organizacji ruchu jest dyskusyjny. Przyjmuje się bowiem, że wykonanie monolitycznego pomostu żelbetowego wymaga całkowitego zamknięcia mostu i wprowadzenia objazdu lub budowy mostu objazdowego. Także w przypadku użycia prefabrykatów (paneli) metalowych, przyjęta organizacja ruchu może mieć wpływ na trwałość robót modernizacyjnych. Jednakże ze względu na porównawczy cel analizy zdecydowano się nie różnicować tymczasowej organizacji ruchu w poszczególnych wariantach.

Koszty poszczególnych robót przyjęto na podstawie kosztorysu inwestorskiego modernizacji mostu w cenach 2006 r. [13]. W przypadku pomostu aluminiowego koszt wykonania oszacowano na podstawie informacji podanych u producentów kształtowników wyciskanych, natomiast koszty wdrożenia nowej technologii przyjęto na podstawie kosztów badań własnych prowadzonych w Zakładzie Dróg i Mostów Politechniki Rzeszowskiej na poziomie 500 tys. PLN. Koszty związane z utylizacją lub składowaniem oraz ewentualnym recyklingiem wszystkich materiałów pochodzących z rozbiórki przyjęto na podstawie informacji firm, zajmujących się taką działalnością.

Do kosztów użytkowników zaliczono: koszt czasu pracy kierowców, koszt czasu pasażerów oraz koszty związane z opóźnieniami w transporcie. W obliczeniach tych kosztów założono, że średni czas oczekiwania na światłach przed mostem wyniesie 20 min (1/3 h) i w związku z tym średnia prędkość podróży na odcinku 1 km drogi, objętym robotami, spadnie do wartości 0,67 Vpdr. W obliczeniach pominięto koszty eksploatacji pojazdów oraz koszty wypadków drogowych, gdyż założona organizacja ruchu nie powoduje wydłużenia drogi podróży. Natomiast w kosztach społecznych uwzględniono koszty uciążliwości dla środowiska, związane ze zwiększoną emisją toksycznych składników spalin przenoszonych przez otoczenie drogi.

Tablica 2. Scenariusze cyklu życia dla wariantów modernizacji mostu
Table 2. Life cycle scenarios for bridge modernisation variants

Czas cyklu życia [rok]	Scenariusz cyklu życia dla poszczególnych wariantów modernizacji	Pomost stalowy	Pomost aluminiowy
T	- Rozbiórka starej płyty żelbetowej. - Wykonanie płyty żelbetowej B 40. - Wzmocnienie stalowych belek pomostu (100 %). - Wzmocnienie stalowych dźwigarów głównych (100 %). - Zabezpieczenie antykorozyjne betonu. - Wypośażenie pomostu.	- Rozbiórka starej płyty żelbetowej. - Wykonanie płyty stalowej S420. - Wzmocnienie stalowych belek pomostu (30 %). - Wzmocnienie stalowych dźwigarów głównych (50 %). - Zabezpieczenie antykorozyjne stali. - Wypośażenie pomostu.	- Rozbiórka starej płyty żelbetowej. - Wykonanie płyty aluminiowej AW 6005A. - Wzmocnienie stalowych belek pomostu (30 %). - Wypośażenie pomostu.
T+15	- Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu. - Remont płyty żelbetowej. - Odnowa zabezpieczenia antykorozyjnego betonu.	- Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu. - Odnowa zabezpieczenia antykorozyjnego stali.	Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu.
T+30	- Rozbiórka starej płyty żelbetowej wraz z wypośażeniem. - Wykonanie nowej płyty żelbetowej B 40. - Zabezpieczenie antykorozyjne betonu. - Wypośażenie pomostu.	- Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu. - Naprawa pomostu stalowego. - Odnowa zabezpieczenia antykorozyjnego stali.	- Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu. - Naprawa pomostu aluminiowego.

Czas cyklu życia [rok]	Scenariusz cyklu życia dla poszczególnych wariantów modernizacji		
	Pomost żelbetowy	Pomost stalowy	Pomost aluminiowy
T+45	- Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu. - Remont płyty żelbetowej. - Odnowa zabezpieczenia antykorozyjnego betonu.	- Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu. - Odnowa zabezpieczenia antykorozyjnego stali.	Wymiana nawierzchni i izolacji na płycie pomostu.
T+60	- Rozbiórka całej konstrukcji pomostu. - Utylizacja i składowanie materiałów z rozbiórki.	- Rozbiórka całej konstrukcji pomostu. - Utylizacja i składowanie materiałów z rozbiórki. - Recykling złomu stalowego.	- Rozbiórka całej konstrukcji pomostu. - Utylizacja i składowanie materiałów z rozbiórki. - Recykling złomu aluminiowego.

Obliczenia tych kosztów użytkowników oraz kosztów środowiska przeprowadzono zgodnie z instrukcją IBDiM [16], przyjmując jako podstawę średnioroczne dobowe natężenie ruchu dla drogi krajowej nr 9 w 2005 r. Natężenie ruchu w latach T, T+15, T+30 oraz T+45 obliczono na podstawie zasad prognozowania wskaźników wzrostu ruchu wewnętrznego na sieci drogowej oraz prognozy wskaźnika wzrostu PKB na okres 2007 - 2037 do celów planistyczno - projektowych dla dróg krajowych [17]. Do obliczenia kosztów bieżących ponoszonych w przyszłości przyjęto stopę dyskontową na poziomie 6 %, zgodnie z ogólnymi wytycznymi sporządzania studiów wykonalności dla projektów współfinansowanych ze środków unijnych, oraz średnioroczną inflację na poziomie 2 %. W celu łatwiejszego porównania z danymi, publikowanymi w wielu pracach europejskich lub amerykańskich, wszystkie koszty przeliczono i podano w euro (€), stosując kurs 1 € = 4 PLN.

Tablica 3. Czas trwania robót (czas ograniczeń w ruchu pojazdów) dla wariantów modernizacji mostu

Table 3. Work time (time of traffic limitations) for bridge modernisation variants

Czas cyklu życia [rok]	Wariant modernizacji mostu		
	Pomost żelbetowy	Pomost stalowy	Pomost aluminiowy
T	Pomost: 225 dni Ustrój nośny: 75 dni Razem: 300 dni	Pomost: 180 dni Ustrój nośny: 60 dni Razem: 240 dni	Pomost: 180 dni Ustrój nośny: 30 dni Razem: 210 dni
T+15	Pomost: 60 dni	Pomost: 90 dni	Pomost: 30 dni
T+30	Pomost: 225 dni	Pomost: 120 dni	Pomost: 60 dni
T+45	Pomost: 60 dni	Pomost: 90 dni	Pomost: 30 dni

Jak już wspomniano, do ekonomicznej oceny cyklu życia wariantów modernizacji mostu w Nagnajowie zastosowano specjalistyczne oprogramowanie BridgeLCC 2.0 [4], stworzone do wspomagania procesów podejmowania decyzji w budownictwie mostowym w zakresie oceny efektywności ekonomicznej różnych wariantów materiałowych, technologicznych lub utrzymaniowych. Użytkownik programu zakłada wskaźniki ekonomiczne (stopa dyskontowa, poziom inflacji), długość cyklu życia, główne parametry mostu (długość, powierzchnia pomostu) oraz ustala scenariusze utrzymaniowe. Pierwszy poziom analizy – analiza deterministyczna – pozwala na wyznaczenie dokładnej wartości LCC dla każdego ze scenariuszy. Analiza ta może być uzupełniona analizą wrażliwości dla wybranych parametrów: kosztów, ilości, czasu, scenariusza, itp. Drugi, bardziej zaawansowany poziom analizy to analiza probabilistyczna. Użytkownik definiuje niepewność (prawdopodobieństwo) oraz jego rozkład dla wybranych parametrów. Program, wykonując symulację Monte Carlo, wyznacza przedział wartości LCC oraz podaje wszystkie niezbędne dane statystyczne do oceny prawdopodobieństwa i ryzyka.

Koszty cyklu życia dla każdego z wariantów są sumą wszystkich kosztów inwestora, użytkowników i środowiska, jakie są generowane w 60-letnim okresie użytkowania i eksploatacji mostu. Zestawienie tych kosztów w wartościach zdyskontowanych w roku bazowym (T) oraz w rozbiciu na poszczególne poziomy i kategorie podano w tablicy 4. Natomiast w tablicy 5 podano koszty cyklu życia w przeliczeniu na 1 m² pomostu oraz 1 mb długości mostu, a także oszczędności netto w kosztach cyklu życia w porównaniu do wariantu podstawowego, tj. pomostu żelbetowego. Jak wykazała przeprowadzona analiza LCCA najmniejsze koszty w cyklu życia (niecałe 6 mln €) ma wariant modernizacji z wykorzystaniem pomostu aluminiowego. Jednakże drugi w rankingu wariant z pomostem stalowym jest jedynie 6,5 % droższy, a więc zgodnie z zasadami LCCA oba warianty można uważać za równoważne lub należy przeprowadzić dodatkową analizę wrażliwości i/lub analizę probabilistyczną. Poniżej przedstawiono bezpośrednie porównanie wyznaczonych deterministycznie kosztów w cyklu życia ocenianych wariantów modernizacji mostu.

Tablica 4. Wyniki analizy ekonomicznej LCCA dla wariantów modernizacji mostu (wartości w €)

Table 4. LCCA results for bridge modernisation variants (value in €)

Kryterium podziału kosztów	Nazwa kategorii kosztów	Wariant modernizacji mostu		
		Pomost żelbetowy	Pomost stalowy	Pomost aluminiowy
Koszty całkowite w cyklu życia (LCC)		7 283 286	6 301 168	5 917 030
Płatnik	Inwestor (KI)	3 664 501	3 672 168	3 948 490
	Użytkownik (KU)	3 616 260	2 626 887	1 967 129
	Środowisko (KS)	2 526	2 113	1 411
Okres cyklu życia	Przygotowanie i budowa (PB)	4 785 434	3 799 900	4 468 107
	Eksploatacja i utrzymanie (EU)	2 486 906	2 497 838	1 458 130
	Zagospodarowanie końcowe (ZK)	10 946	3 430	−9 207
Składnik kosztów	Elementy obiektu (E)	7 238 774	6 256 655	5 760 017
	Koszty pozaobiektywne (NE)	44 513	44 513	44 513
	Wdrożenie nowej technologii (NT)	0	0	112 500

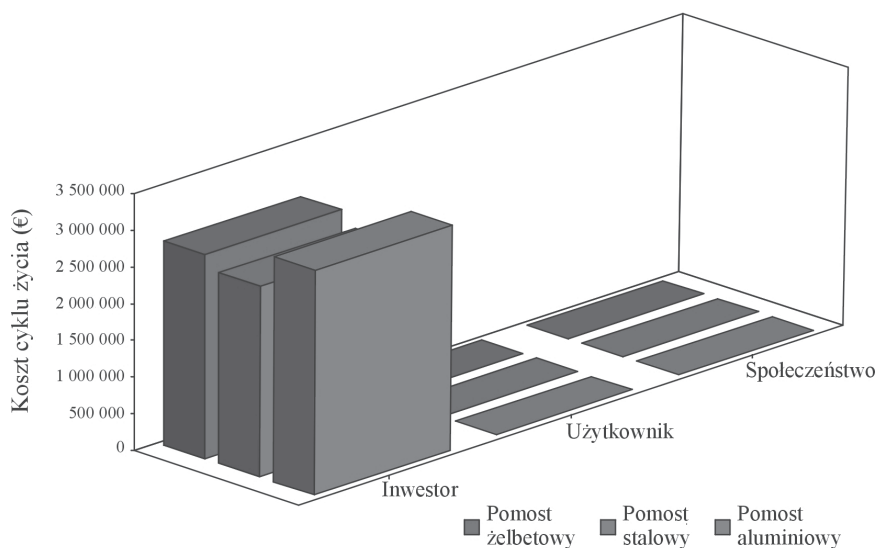
Analizę porównawczą warto rozpocząć od kryterium stosowanego obecnie (w większości przypadków jako jedyne) w systemie zamówień publicznych w Polsce przy wyborze różnych wariantów projektowych (ofert przetargowych). Na rysunku 5 pokazano koszty bezpośrednie inwestora dla porównywanych wariantów, poniesione w okresie przygotowania i budowy. Jak należało się spodziewać, wariant z pomostem aluminiowym jest najdroższy, a jego koszt przewyższa wariant żelbetowy i stalowy odpowiednio o 10 % i 18 %. Stosunkowo niewielka różnica wynika z tego, że w przypadku lekkiego pomostu aluminiowego nie zachodzi konieczność wzmacniania podpór oraz

znacznie ograniczony jest zakres wzmacniania dźwigarów głównych. Zakres wzmocnienia elementów mostu jest także powodem różnicy kosztów pomiędzy pomostem żelbetowym i stalowym, na korzyść tego drugiego. Analiza potwierdziła, że przy porównaniu tylko bezpośrednich kosztów wykonania modernizacji, wariant z pomostem aluminium nigdy nie będzie rozwiązaniem najefektywniejszym ekonomicznie.

Tablica 5. Koszty jednostkowe LCC oraz oszczędności netto dla wariantów modernizacji mostu (wartości w €)

Table 5. LCC unit costs and netto savings for bridge modernisation variants (value in €)

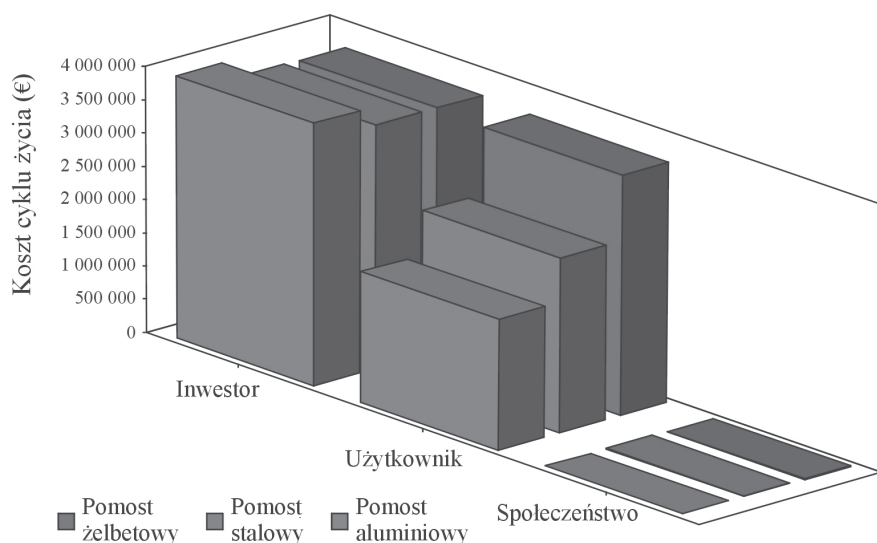
Wskaźnik	Wariant modernizacji mostu		
	Pomost żelbetowy	Pomost żelbetowy	Pomost aluminiowy
Koszt cyklu życia na 1 m ² pomostu	2 269	1 963	1 843
Koszt cyklu życia na 1 mb długości mostu	17 550	15 184	14 258
Oszczędność netto całkowita	0	982 119	1 366 257
Oszczędność netto na 1 m ² pomostu	0	306	426
Oszczędność netto na 1 mb długości mostu	0	2 367	3 292



Rys.5. Koszty bezpośrednie inwestora

Fig.5. Direct agency costs

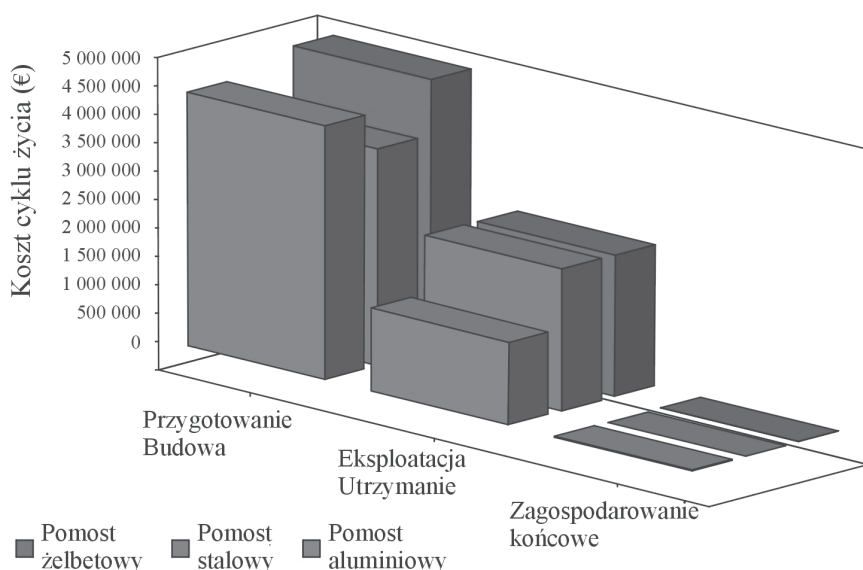
Na rysunku 6 pokazano podział całkowitych kosztów cyklu życia LCC na płatnika dla poszczególnych wariantów. Zgodnie z przewidywaniami wariant aluminiowy okazał się najdroższy dla inwestora, lecz najtańszy dla użytkowników. Inwestor musi przede wszystkim ponieść dodatkowe koszty pomostu aluminiowego związane z wyższą ceną materiału oraz kosztami wdrożenia nowej technologii. Jednakże różnica w stosunku do najtańszego dla inwestora pomostu żelbetowego wynosi jedynie 7,7 %, a odejmując koszty wdrożenia nowej technologii 6 %. Nie jest to więc duża różnica i wydaje się uzasadnione jej poniesienie w celu minimalizacji kosztów użytkowników, tym bardziej, że różnice w tej kategorii kosztów są bardzo znaczące. Wariant z pomostem aluminiowym generuje bowiem koszty użytkowników niższe o 33 % i aż o 84 % odpowiednio w stosunku do wariantów z pomostem stalowym i żelbetowym. Różnice te wynikają z dwóch głównych przyczyn: znacznie mniejszego zakresu robót utrzymaniowych i związanych z nimi ograniczeń w ruchu oraz z krótszego czasu pojedynczych ograniczeń, związanego z prefabrykacją i łatwością montażu pomostu aluminiowego. Ze względu na przyjęty sposób tymczasowej organizacji ruchu koszty środowiskowe są dla wszystkich porównywanych wariantów niewielkie, a wynikają jedynie z emisji spalin w związku z obniżeniem prędkości podróży i czasem trwania ograniczeń w ruchu.



Rys.6. Podział całkowitych kosztów cyklu życia na płatnika
Fig.6. Whole life costs breakdown by entity that incurs cost

Kolejny wykres (rys. 7) pokazuje podział całkowitych kosztów cyklu życia LCC dla poszczególnych wariantów w zależności od okresu cyklu życia, w którym te koszty zostały poniesione. Okazuje się, że jeżeli uwzględni się koszty użytkowników i koszty

środowiska to całkowity koszt wariantu z pomostem aluminiowym w okresie przygotowania i budowy nie jest wcale najwyższy, bowiem większy o 7 % jest koszt wariantu żelbetowego – najtańszego, jeżeli chodzi o koszty inwestora w tym początkowym okresie. Natomiast zdecydowanie najniższe są koszty generowane przez wariant z pomostem aluminiowym w okresie eksploatacji i utrzymania. Warto podkreślić, że w tym 60-letnim przedziale czasowym koszty utrzymania pomostu aluminiowego są o 70 % niższe od kosztów utrzymania pomostów żelbetowego lub stalowego (!). Informacja ta, zgodna wprawdzie z ogólnym odczuciem, szokuje gdy jest skwantyfikowana ilościowo. Należy jednak pamiętać o bardzo dużej wrażliwości tej wartości na przyjętą strategię utrzymaniową. Koszty związane z zagospodarowaniem końcowym nie są wysokie w żadnym z wariantów, lecz jedynie pomost aluminiowy może w tym okresie generować zysk (recykling).

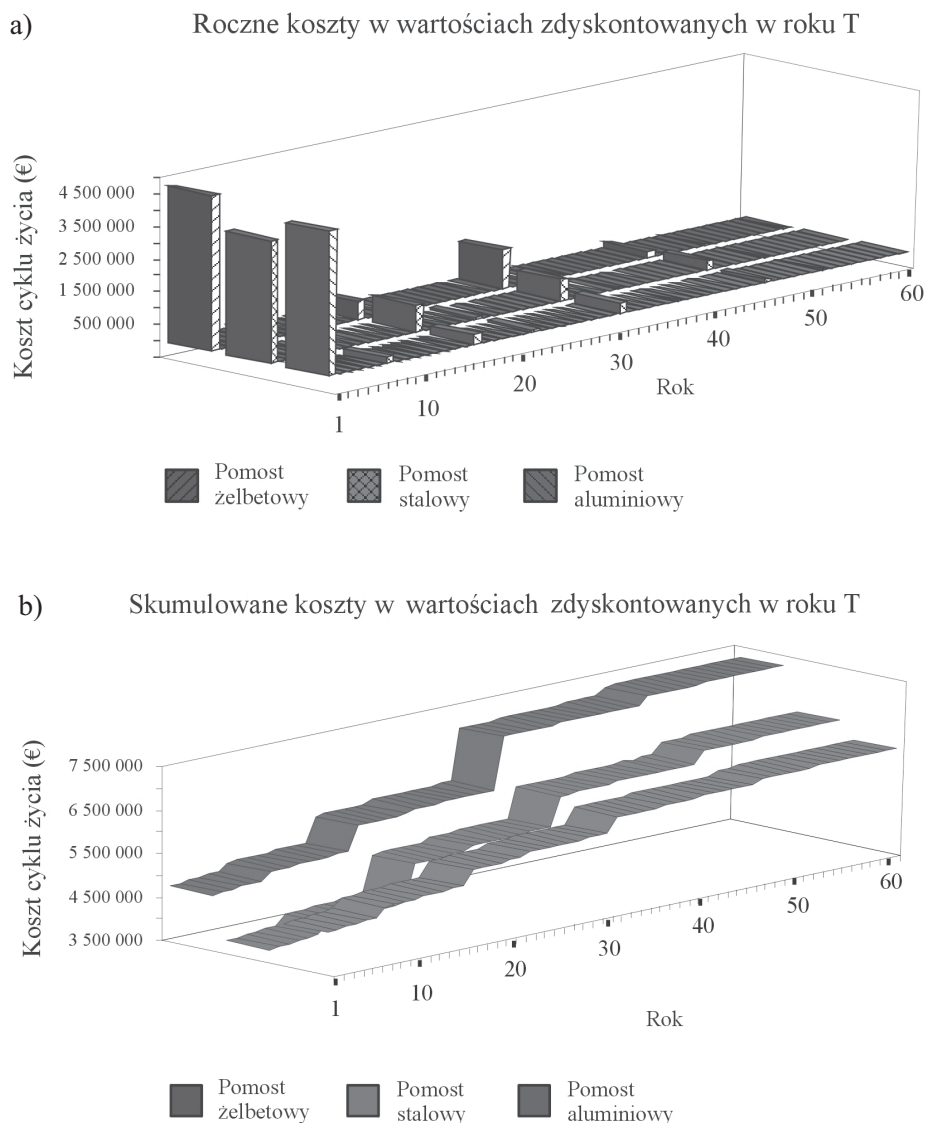


Rys.7. Podział całkowitych kosztów cyklu życia na poszczególne kategorie
Fig.7. Whole life costs breakdown by cost category

Współczynnikiem, którym dość często są charakteryzowane koszty cyklu życia jest stosunek kosztów całkowitych LCC do kosztów wstępnych (tu: przygotowania i budowy), poniesionych w roku T. W przypadku wariantu z pomostem aluminiowym ten współczynnik wynosi tylko 1,32, natomiast dla wariantów żelbetowego i stalowego odpowiednio: 1,65 i 1,52. Natomiast gdy uwzględnimy jedynie koszty przygotowania i budowy poniesione przez inwestora (czyli jego bezpośrednie koszty finansowe), to współczynnik ten dla pomostu aluminiowego wynosi 1,93, natomiast dla dwóch pozostałych odpowiednio 2,42 i 2,62. Oznacza to, że całkowite koszty 60-letniego cyklu życia dla wariantu z pomostem aluminiowym nie przekraczają nawet dwukrotnej

wartości bezpośrednich kosztów jego wbudowania (czyli wartości oferty wykonawcy). Jest to zatem koszt bardzo niski.

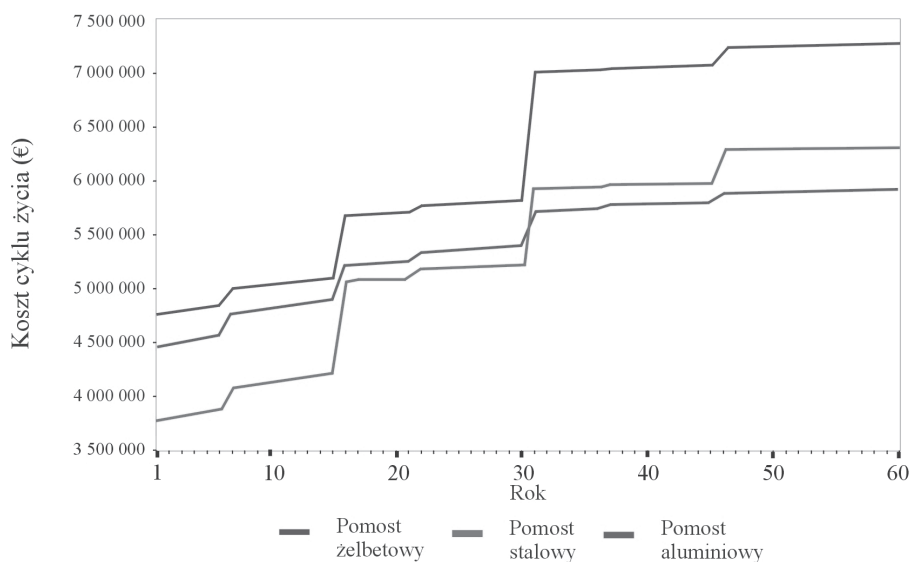
Na kolejnych wykresach pokazano rozkład kosztów cyklu życia poszczególnych wariantów w czasie. Roczne koszty cyklu życia dla poszczególnych wariantów w wartościach zdyskontowanych w roku bazowym (T) pokazano na rysunku 8.



Rys.8. Przepływ gotówki w czasie: a) wartości roczne i b) skumulowane zdyskontowane w roku T

Fig.8. Cash flow in time: a) annual and b) cumulative costs in year T

Rozkład kosztów cyklu życia dla wariantu z pomostem aluminiowym jest najbardziej równomierny i quasi-monotoniczny, bez wysokich i nagłych wzrostów kosztu utrzymania w cyklu życia. Dodatkowo na rysunku 9 pokazano tzw. punkt „break-even”, w którym ten wariant staje się najtańszy w wartościach kosztów zdyskontowanych. Jest to rok $T = 31$, tj. połowa założonego cyklu życia, w którym przewidziane są naprawy główne obu pomostów metalowych oraz wymiana płyty żelbetowej. Warto również zauważyć, że w konkretnym przypadku mostu w Nagnajowie pomost żelbetowy jest zawsze najdroższy w całym cyklu życia. Decydują o tym wysokie koszty wstępne w okresie przygotowania i budowy (zwłaszcza koszty użytkowników) oraz wynikająca z najniższej trwałości konieczność wykonania wymiany płyty w połowie założonego okresu eksploatacji. Drugie spostrzeżenie dotyczy długości analizowanego okresu cyklu życia. W przypadku przyjęcia do analizy okresu o połowę krótszego, tj. 30 lat, najefektywniejszy ekonomicznie jest pomost stalowy, chociaż na zakończenie tego okresu całkowite koszty cyklu życia dla wariantu z pomostem aluminiowym są tylko nieznacznie większe.

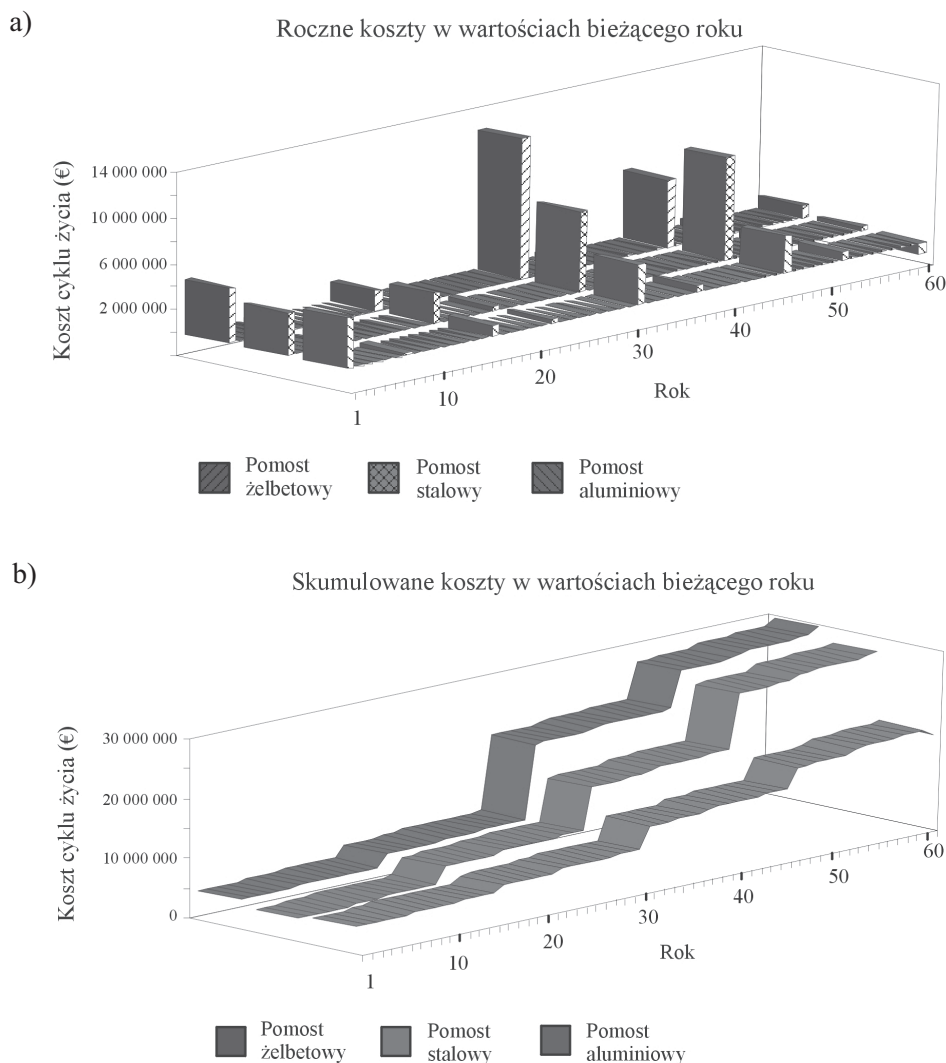


Rys.9. Skumulowane wartości LCC zdyskontowane w roku T - punkt „break-even” dla wariantu z pomostem aluminiowym

Fig.9. Fig.9. Cumulative life cycle costs in year T - “break-even” point for aluminium deck variant

Wykresy na rysunku 10 pokazują wielkości kosztów ponoszonych w poszczególnych latach, wyrażone w wartościach bieżącego roku. Wykres górny pokazuje rozkład kosztów na poszczególne lata, natomiast wykres dolny pokazuje kumulację tych kosztów z roku na rok. Oba wykresy nie pokazują kosztów cyklu życia w wartościach zdyskontowanych do roku T , lecz przepływ gotówki w czasie, ponieważ podają dokładny i dający się przewidzieć koszt generowany w poszczególnych latach. Na

podstawie tych wykresów można stwierdzić, że tylko w przypadku wariantu z pomostem aluminiowym rzeczywisty roczny koszt w okresie eksploatacji i utrzymania nie przekroczy początkowych kosztów jego budowy. Roczne nakłady utrzymaniowe w przypadku pozostałych wariantów będą znacznie większe, szczególnie w latach $T=31$ i $T=48$



Rys.10. Przepływ gotówki w czasie: a) wartości roczne i b) skumulowane w bieżącym roku
Fig.10. Cash flow in time: a) annual and b) cumulative costs in current year

Przedstawione powyżej wyniki analizy LCCA dla trzech porównywanych wariantów modernizacji mostu mają charakter deterministyczny – bazują bowiem na z góry ustalonych ilościach i kosztach. Jednakże wiele z tych wartości liczbowych jest wrażliwe na zmiany innych parametrów, a ponadto ma określone niepewności i związany z tym rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia danej wartości. Uwzględnienie niepewności i ryzyka wystąpienia niektórych parametrów zapewnia analiza probabilistyczna, której wynikiem jest pełny zakres możliwych wartości kosztów, a także rozkład prawdopodobieństwa dla wartości średniej.

5. ŚRODOWISKOWA OCENA CYKLU ŻYCIA DLA WARIANTÓW MODERNIZACJI MOSTU

Głównym celem analizy jest porównanie potencjalnego wpływu na środowisko, generowanego podczas cyklu życia wybranych wariantów modernizacji z wykorzystaniem pomostów, wykonanych z różnych materiałów konstrukcyjnych. W ramach głównego celu określono również cele szczegółowe, tj. określenie wielkości potencjalnego wpływu dla poszczególnych wariantów oraz wykazanie źródeł największego oddziaływania. Analizę przeprowadzono zgodnie z normami [5 - 8] oraz procedurą przedstawioną na rysunku 3. Metodyka przeprowadzonych badań LCA obejmuje realizację czterech faz: określenie celu i zakresu, analizę zbioru wejść i wyjść, ocenę wpływu cyklu życia i interpretację wyników, z wykorzystaniem następujących narzędzi:

- analizę LCA przeprowadzono za pomocą programu ECO-it v.1.3,
- ocenę wpływu na środowisko (LCIA) wykonano za pomocą metody ekowskaźnika 99 (ang. *eco-indicator 99*),
- dane środowiskowe zaczerpnięto z bazy programu ECO-it oraz z publikowanych baz danych przemysłu aluminiowego, stosując edytor ECO-edit,
- badanie przeprowadzono zgodnie z wytycznymi dla analiz porównawczych [18].

Program komputerowy ECO-it jest stosunkowo prostym narzędziem, wspomagającym proces projektowania z wykorzystaniem metody ekowskaźnika. Struktura programu dzieli się na cztery główne moduły:

- moduł “*Life cycle*”, służący do opisu systemu, będącego przedmiotem badań,
- moduł “*Production*”, służący do opisu hierarchicznej struktury systemu (drzewo procesów) oraz wyspecyfikowaniu wszystkich materiałów i procesów dla każdej części systemu; materiały i procesy wybierane są z bazy danych programu, która zawiera ekowskaźniki dla materiałów oraz procesów energetycznych i transportu; standardowa baza danych może zostać uzupełniona za pomocą specjalnego programu ECO-edit,
- moduł “*Use*”, służący do opisu procesów energetycznych i transportowych (wyłącznie); jedną z przydatnych funkcji tej części jest opcja “*additional life cycle*”, w której można wprowadzić produkt lub proces, mający swój osobny środowiskowy cykl życia,

- moduł „*Disposal*”, w którym przyjmuje się scenariusz postępowania z odpadami, pochodzącymi z produktu lub jego części.

Po wprowadzeniu danych otrzymuje się wynik obliczeń obciążeń środowiskowych, w postaci jednego zagregowanego ekowskaźnika (lub ekowskaźników dla poszczególnych kategorii szkód), który może być prezentowany na specjalnych wykresach dla każdej fazy cyklu życia wariantu.

Większość procesów realizowanych w fazach i etapach cyklu życia mostu w Nagajowie (produkcja, użytkowanie, końcowe zagospodarowanie) ma miejsce na terenie Polski. Wyjątek stanowi faza pozyskania surowców do produkcji aluminiowych kształtowników wyciskanych, które są sprowadzane zza granicy. Ponieważ niniejsze badanie LCA ma charakter porównawczy, systemy analizowanych scenariuszy zostały zbudowane w porównywalny sposób w odniesieniu do szerokości i głębokości analizy oraz jakości danych. Wszystkie systemy sięgają do tego samego poziomu dostawców, tj. poziomu surowców. Ponieważ celem badania jest wykazanie różnic w wielkości oddziaływania na środowisko wynikających głównie z różnic w procesie produkcji (materiały i technologie wykonania), zakresy geograficzne i technologiczne dla poszczególnych systemów są różne, natomiast zakresy czasowe jednakowe. Zakres geograficzny kształtuje się od lokalnego do globalnego. Wynika to z faktu, że wykonanie pomostu żelbetowego może mieć charakter całkowicie lokalny, pomostu stalowego – krajowy, a pomostu aluminiowego, ze względu na dostawę surowców oraz *know-how*, globalny. Różne są także zakresy technologiczne – pomosty żelbetowy i stalowy reprezentują technologię tradycyjną, pomost aluminiowy – technologię zaawansowaną. Z przestrzennego punktu widzenia nie ma większych różnic, gdyż miejsce produkcji (wbudowania) jest mniej więcej to samo (z pewnymi różnicami w zakresie transportu). Systemy (warianty pomostów) mają jednak całkowicie odmienny proces wytwarzania, co prowadzi do powstania produktów o odmiennych parametrach eksploatacyjnych. Zakresy czasowe są jednakowe dla wszystkich wariantów i obejmują dane z okresu 2000 - 2005 oraz 60-letni cykl życia mostu.

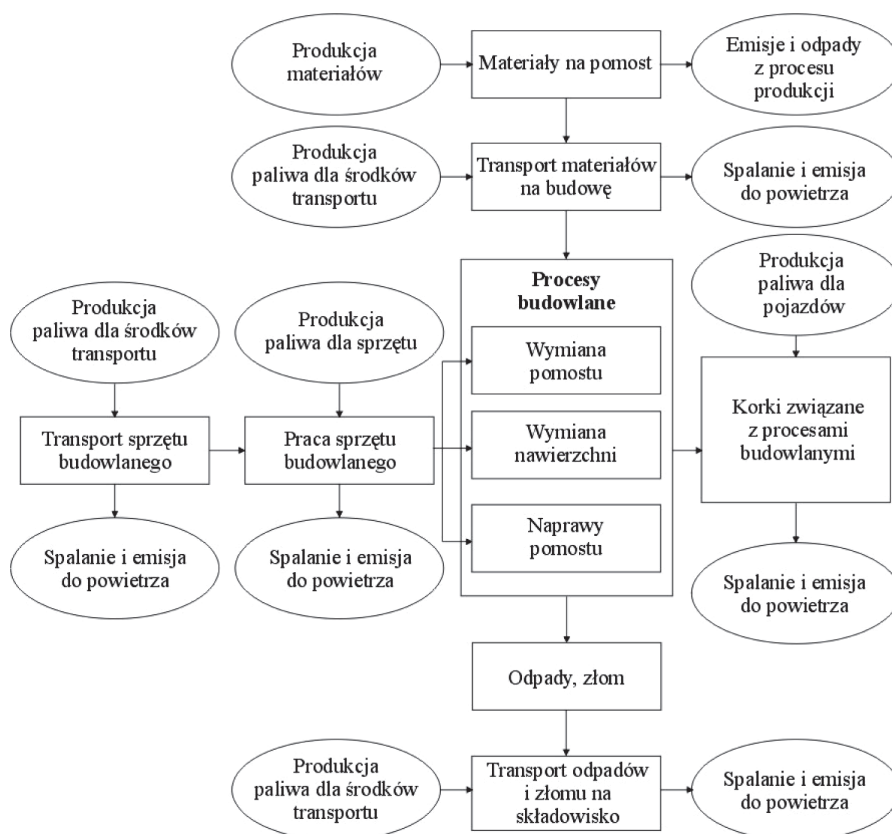
Kluczowe znaczenie dla analizy LCA ma określenie jednostki funkcjonalnej i strumienia odniesienia. Punktem wyjścia jest zawsze dokładne sprecyzowanie funkcji analizowanego wyrobu. Cooper [18] zaleca, aby w definicji funkcji i jednostki funkcjonalnej zawierać aspekty z punktu widzenia użytkownika wyrobu (jakości usługi) i odnosić do parametrów użytkowych wyrobów (np. długości życia). Ważne jest też wprowadzenie odnośnika czasowego do jednostki funkcjonalnej. Ponieważ porównywane warianty różnią się zasadniczo rodzajem pomostu, jednakże o analogicznym obszarze zastosowania, funkcję odniesiono do tego aspektu i określono jako: nie przekroczenie stanów granicznych nośności i użytkowości (np. w rozumieniu PN) pod obciążeniem normowym oraz w określonym przedziale czasowym. W takiej definicji funkcji pomostu znajdują się wszystkie wyżej zalecane elementy, dotyczące jakości (nośność, sztywność) oraz czasu trwania, wynikającego z zalecanej trwałości wyrobu. Jednostka funkcjonalna to ilościowy efekt systemu (wariantu) stosowany jako jednostka odniesienia w badaniach środowiskowej analizy cyklu życia. Opis jednostki to opis wariantu, jego cyklu życia oraz zachowania w tym cyklu. W niniejszych

badaniach przyjęto, że jednostką funkcjonalną jest masa (w kg) nowego pomostu, który został zastosowany do modernizacji mostu w Nagnajowie. Horyzont czasowy oceny dla wariantów modernizacji założono 60 lat (dwukrotny projektowany okres trwałości dla pomostu żelbetowego). W 60-letnim cyklu życia mostu założono działania związane z jego naprawą i utrzymaniem wg tablicy 2. Przyjmując tak określoną jednostkę funkcjonalną, uzyskano odpowiednie strumienie odniesienia dla każdego wariantu. Zakładając całkowitą powierzchnię pomostu $F = 414,0 \cdot 7,0 = 2898 \text{ m}^2$ oraz przyjmując masy jednostkowe wg tablicy 1, otrzymano strumienie odniesienia kolejno dla wariantów 1–3: 1521450 kg, 437598 kg oraz 240534 kg. Wartości te posłużyły do ilościowego określenia poszczególnych obciążeń środowiskowych.

Analizę LCI objęto niemal całe cykle życia poszczególnych wariantów, wyłączając etap pozyskania surowców. Na rysunku 11 przedstawiono ogólny schemat modelu LCI obejmujący analizowane etapy cyklu życia dla poszczególnych wariantów. Każdy z prostokątów oznacza proces jednostkowy, mający swoje wejścia (surowce, materiały, energia) oraz wyjścia (emisje, odpady). Procesy jednostkowe znajdują się na podobnym, dość szczegółowym, poziomie analizy, chociaż w niektórych przypadkach można wyróżnić procesy bardziej zagregowane (np. utrzymanie i naprawy). W przypadku, gdy pomiędzy procesami ma miejsce transport w analizie LCIA uwzględniono wpływ elementów wejściowych (zużycie paliwa) oraz wyjściowych (emisje spalin), związanych z transportem. Analizę rozpoczęto od produkcji podstawowych materiałów, uwzględniając kolejno produkcję półfabrykatów, wytworzenie i wbudowanie konstrukcji, okres użytkowania oraz końcowego zagospodarowania. Uwzględniono efekty wejść i wyjść związane z etapami dystrybucji (transportu) pomiędzy poszczególnymi fazami oraz stosowne przepływy energetyczne. W ocenie wzięto również pod uwagę zakłócenia w normalnym ruchu pojazdów, związane z tymczasową organizacją ruchu oraz naprawy i modernizacje. W przypadku mostów modelowanie cyklu życia jest nieco utrudnione z uwagi na długość cyklu (60 lat). Wpływ środowiskowy zdarzeń budowlanych w dalekiej przyszłości może być jedynie szacowany. Również parametry opisujące ruch drogowy i jego zakłócenia także są obarczone dużym stopniem niepewności. Dodatkową niepewność stanowi w modelu zastosowanie nowych materiałów (stopy aluminium), gdzie empiryczna wiedza na temat ich zachowania się w przyszłości nie jest jeszcze dostatecznie zweryfikowana. Podstawowe fazy i etapy cyklu życia, uwzględnione w analizie każdego wariantu przedstawiono w tablicy 6.

W modelu LCI dokonano także pewnych wyłączeń. Wyłączono np. szczegółową analizę fazy wydobywania surowców, posługując się zagregowanymi wskaźnikami, ujętymi w etapie produkcji materiałów. Wyłączeniu uległ także proces rozbiórki, ze względu na brak danych, dotyczących konstrukcji aluminiowej. Takie wyłączenie z analizy LCA nie jest korzystne dla wariantu z pomostem aluminiowym, gdyż proces rozbiórki lekkiej konstrukcji aluminiowej jest na pewno mniej energochłonny (maszyny, transport) od rozbiórki ciężkiego pomostu żelbetowego lub pomostu stalowego. Ostatnim istotnym wyłączeniem było wykluczenie z analizy procesu wymiany nawierzchni i izolacji, ze względu na przyjętą zasadę analizy różnic. W myśl tej zasady analizą LCA obejmuje się tylko te procesy i elementy, które różnią się pomiędzy

wariantami. Ponieważ proces wymiany nawierzchni i izolacji jest niemal identyczny na poszczególnych pomostach, nie włączono go do analizy. Także ze względu na porównawczy charakter analizy LCA nie przeprowadzano szczegółowej analizy zbioru wejść i wyjść (etap LCI) dla każdego z badanych wariantów, tj. systemów pomostów.



Rys.11. Uprozczone drzewo procesów dla modernizacji mostu
Fig.11. Simplified process tree for bridge modernisation works

Informacje dotyczące wszystkich procesów i materiałów zostały pobrane z baz danych zawartych w programie ECO-it, uzupełnionych o wskaźniki z baz danych przemysłu aluminiowego. Dane dotyczące strumieni odniesienia zaczerpnięto z dokumentacji technicznej oraz z publikacji autora, opisujących różne warianty modernizacji mostu [19 - 21]. Dane energetyczne w fazie wykonania robót modernizacyjnych uzyskano od wykonawcy. Odległości transportu przyjęto przy założeniu następujących miejsc pozyskania materiałów i realizacji procesów: stal zbrojeniowa – Ostrowiec Św., cement – Ożarów, kruszywo – Dolny Śląsk, ruda żelaza – Ukraina,

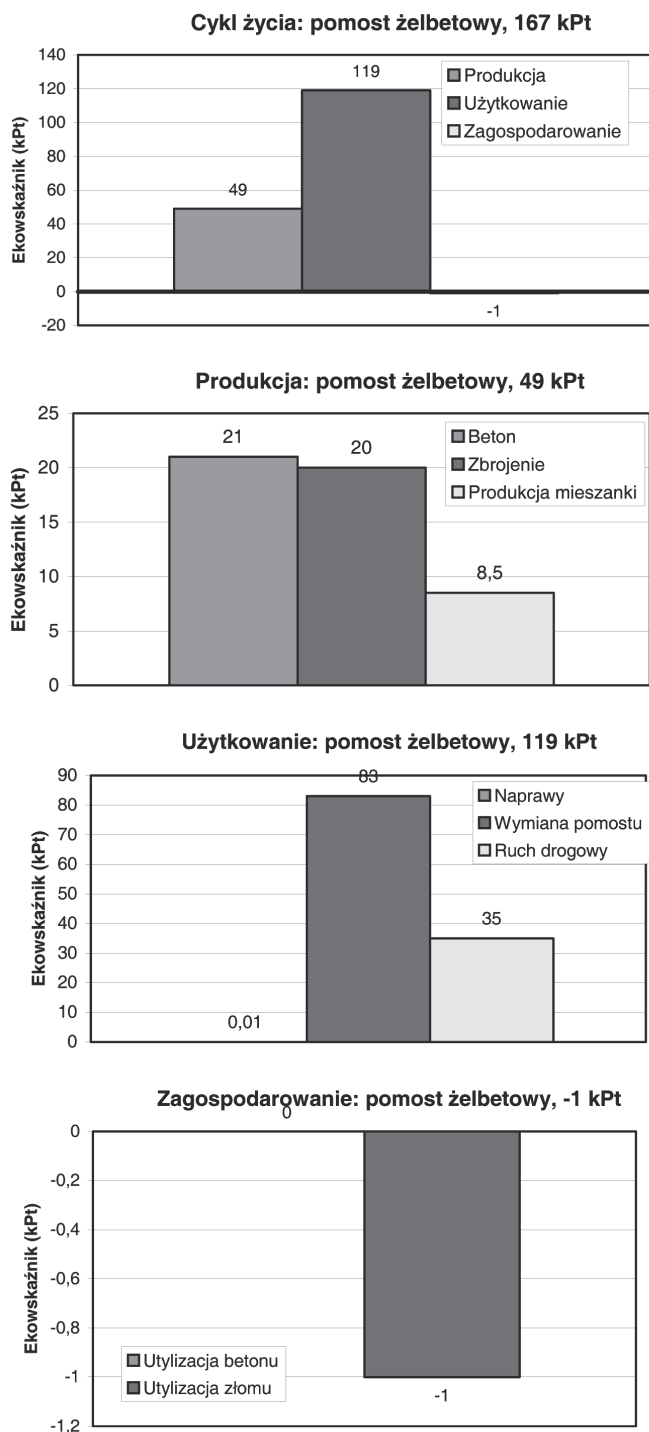
Tablica 6. Procesy uwzględnione w analizie środowiskowej cyklu życia dla wariantów modernizacji mostu
 Table 6. Processes considered in environmental life cycle analysis for bridge modernisation variants

Faza cyklu życia	Analizowane procesy dla wariantów modernizacji		
	Pomost żelbetowy	Pomost stalowy	Pomost aluminiowy
Produkcja	• Produkcja składników betonu • Produkcja stali zbrojeniowej • Transport składników do betoniarń • Wytwarzanie betonu w betoniarń • Praca sprzętu przy układaniu i pielęgnacji betonu (energia) • Transport na budowę (mieszanka, stal)	• Transport surowców do huty • Produkcja stali konstrukcyjnej • Walcowanie blach • Transport blach do wytwórni • Wytwarzanie konstrukcji pomostu • Metalizacja konstrukcji pomostu • Transport na budowę (elementy montażowe) • Wbudowanie konstrukcji stalowej pomostu	• Transport surowców do huty • Produkcja aluminium pierwotnego • Wyciskanie profili • Transport profili do wytwórni • Wytwarzanie konstrukcji pomostu • Transport na budowę (panele pomostu) • Wbudowanie konstrukcji aluminiowej pomostu
Użytkowanie	• Utrzymanie i naprawy (energia, transport) • Wymiana pomostu (powtórzony cały cykl życia) • Zakłócenia ruchu (spalania dodatkowego paliwa)	• Utrzymanie i naprawy (energia, transport) • Odnowa zabezpieczenia antykorozyjnego stali	• Utrzymanie i naprawy (energia, transport)
Zagospodarowanie końcowe	• Transport odpadów i elementów z rozbiórki • Utylizacja i składowanie gruzu z betonu • Składowanie złomu stali zbrojeniowej	• Transport elementów z rozbiórki • Przeróbka złomu stalowego (70 %) • Składowanie złomu stali konstrukcyjnej (30 %)	• Transport elementów z rozbiórki • Recykling złomu aluminiowego (90 %) • Składowanie złomu aluminium (10 %)

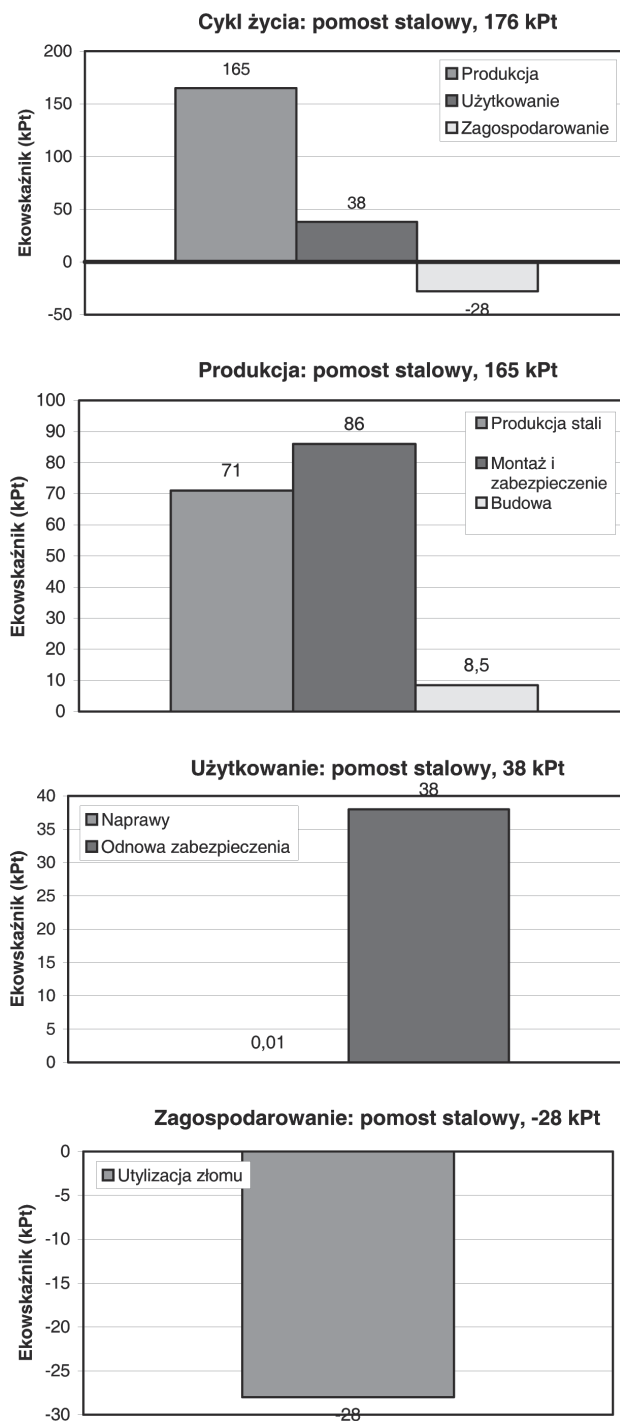
węgiel – Śląsk, boksyty – Rosja, produkcja betonu – Tarnobrzeg, produkcja stali – Kraków, produkcja wlewków aluminium – Konin, walcowanie stali – Śląsk, wyciskanie kształtowników aluminiowych – Kęty, wytworzenie konstrukcji metalowej – Grybów, loco budowa – Nagnajów, utylizacja betonu z rozbiórki – Tarnobrzeg, złom stalowy – Śląsk, recykling aluminium – Konin, składowanie odpadów – Tarnobrzeg. Wielkości obciążeń środowiskowych związanych z tymczasową organizacją ruchu (korki – zwiększone zużycie paliwa, zwiększona emisja do powietrza) obliczono na podstawie SDR drogi krajowej nr 9 oraz pomiarów własnych na objeździe tymczasowym modernizowanego mostu w Nagnajowie.

Uzyskane wartości ekowskaźników (kPt) dla wszystkich trzech porównywanych wariantów modernizacji przedstawiono na rysunkach 12 - 14. Dla każdego z wariantów wyniki badań zaprezentowano w postaci 4 wykresów: pierwszy porównuje trzy główne fazy całego cyklu życia (produkcja, użytkowanie, końcowe zagospodarowanie) i podaje całkowity ekowskaźnik dla danego wariantu, trzy następne podają ekowskaźniki dla poszczególnych faz, z rozbiciem na główne materiały (w fazie produkcji) i procesy (w fazie użytkowania).

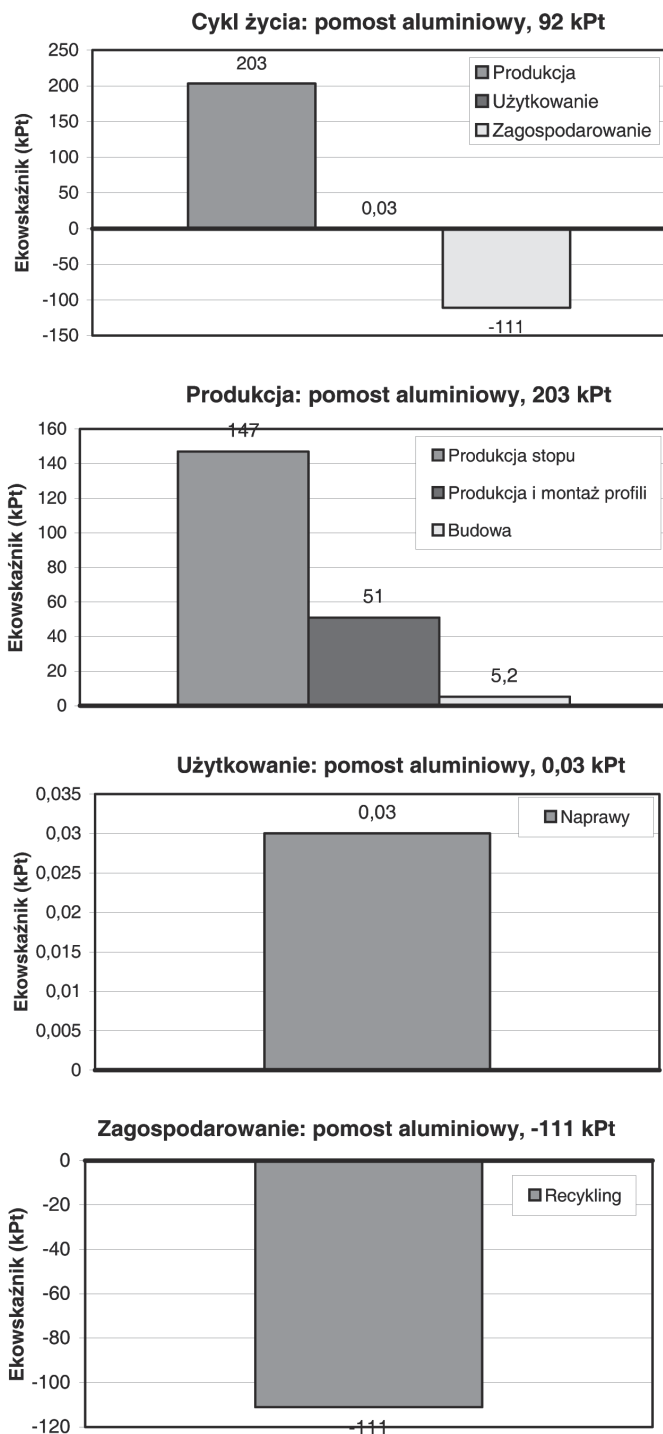
Całkowity ekowskaźnik dla wariantu z pomostem żelbetowym wynosi 167 kPt. Największy negatywny wpływ na środowisko jest generowany przez ten wariant w fazie użytkowania (71 %). Jest to związane z koniecznością napraw i wymiany pomostu po 30 latach użytkowania. Proces wymiany powoduje podwojenie obciążenia środowiskowego z fazy produkcji, a ponadto dochodzą obciążenia związane z zakłóceniami ruchu pojazdów. Obojętna środowiskowo jest faza zagospodarowania końcowego materiałów z rozbiórki żelbetu. Ekowskaźnik dla wariantu z pomostem stalowym wynosi 176 kPt. W tym przypadku prawie 93 % obciążenia środowiskowego generuje faza produkcji, a głównie produkcja stali, wytworzenie i montaż konstrukcji oraz jej zabezpieczenie antykorozyjne. Konieczność odnowy tego zabezpieczenia jest w zasadzie jedynym poważnym obciążeniem środowiskowym dla tego wariantu w fazie użytkowania. Należy zwrócić także uwagę na ujemny (tzn. korzystny) wpływ złomowania i powtórnej przeróbki stali w fazie zagospodarowania końcowego. Całkowity ekowskaźnik dla wariantu z pomostem aluminiowym wynosi 92 kPt. W tym przypadku również faza produkcji najbardziej obciąża środowisko (ponad 200 kPt). Jednakże jej negatywny wpływ prawie w połowie „łagodzi” faza zagospodarowania końcowego, tj. recykling oraz użycie aluminium wtórnego w produkcji nowych wyrobów aluminiowych. Należy także zwrócić uwagę na prawie nie obciążającą środowiska fazę użytkowania pomostów aluminiowych. Powyższą interpretację wyników analizy LCA przeprowadzono jedynie na poziomie globalnego ekowskaźnika ocenianego wariantu modernizacji (a w zasadzie rodzaju pomostu). Na tym etapie analizy stosunkowo niewiele wiadomo o strukturze wpływu na środowisko. Aby uzyskać takie informacje należy uzyskane wyniki poddać stopniowej dezagregacji, schodząc na coraz niższe poziomy ich modyfikacji (kategorie szkód, kategorie wpływu).



Rys.12. Wyniki analizy LCA dla wariantu z pomostem żelbetowym
 Fig.12. LCA results for RC deck variant



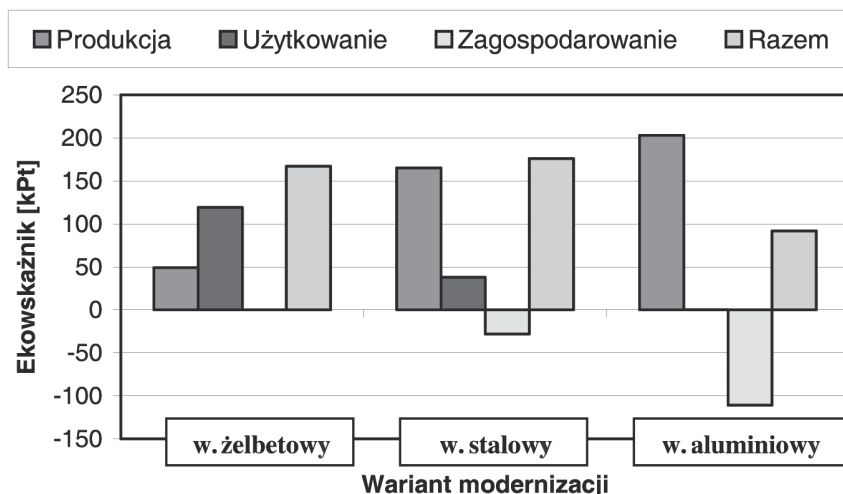
Rys.13. Wyniki analizy LCA dla wariantu z pomostem stalowym
Fig.13. LCA results for steel deck variant



Rys.14. Wyniki analizy LCA dla wariantu z pomostem aluminiowym

Fig.14. LCA results for aluminium deck variant

Środowiskowa analiza LCA wykazała, że wariant modernizacji z pomostem aluminiowym generuje najmniejszy szkodliwy wpływ na środowisko w całym cyklu życia mostu, w porównaniu z pomostami tradycyjnymi: żelbetowym i stalowym. Na rysunku 15 porównano badane warianty pod względem ich wpływu na środowisko, mierzonego ekowskaźnikiem.



Rys.15. Porównanie wariantów modernizacji mostu na podstawie ekowskaźnika
Fig.15. Comparison of bridge modernisation variants by eco-indicator

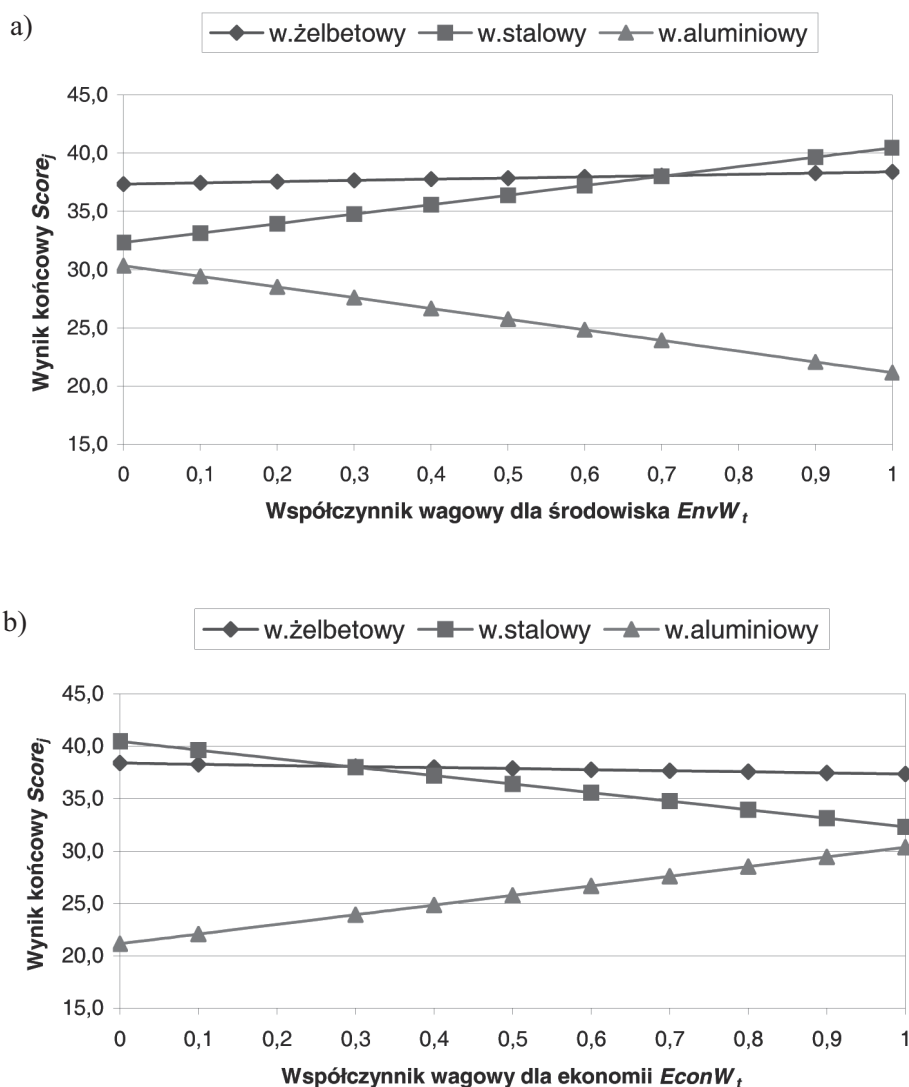
Całkowity szkodliwy wpływ wariantu z pomostem aluminiowym w 60-letnim cyklu życia mostu stanowi jedynie 52 % wpływu wariantu z pomostem stalowym i 55 % wpływu wariantu z pomostem żelbetowym. Wynik taki uzyskano pomimo ponad 4-krotnie większej szkodliwości pomostu aluminiowego od pomostu żelbetowego w fazie produkcji. Szkodliwość środowiskowa pomostu aluminiowego w fazie produkcji wynika głównie z procesu produkcji aluminium pierwotnego (134 kPt). Jest ona jednak w 90 % rekompensowana przez recykling aluminium, czyli korzystne działanie na środowisko spowodowane ograniczeniem produkcji aluminium pierwotnego o masą aluminium wtórnego, pochodzącego z recyklingu. Stosunkowo duży wpływ środowiskowy ma także proces wytwarzania konstrukcji aluminiowej (51 kPt), co związane jest z dużą objętością konstrukcji oraz dużą ilością spawania. W tym elemencie pomost aluminiowy jest także nieznacznie bardziej szkodliwy dla środowiska niż pomost stalowy (48 kPt). Natomiast jak należało się spodziewać zdecydowanie najlepszy pod względem środowiskowym jest pomost aluminiowy w fazach użytkowania i zagospodarowania końcowego. Korzyści środowiskowe w fazie użytkowania wynikają głównie z trwałości aluminium oraz braku konieczności wykonywania zabezpieczenia antykorozyjnego. W związku z tym obciążenie środowiskowe generowane przez wariant z pomostem aluminiowym w tej fazie jest znikome, w przeciwieństwie do wariantów z pomostem żelbetowym (120 % większe obciążenie) i stalowym (blisko 40 % większe obciążenie). Jednakże główne „oszczędności” dla

środowiska generuje wariant z pomostem aluminiowym w fazie zagospodarowania końcowego, dzięki ponad 90 % recyklingowi aluminium i odzyskowi pełnowartościowego metalu. Dzięki temu końcowy wynik analizy LCA dla wariantu z pomostem aluminiowym jest najkorzystniejszy.

6. HOLISTYCZNA OCENA CYKLU ŻYCIA DLA WARIANTÓW MODERNIZACJI MOSTU

Do holistycznej (całościowej, kompleksowej) oceny cyklu życia dla wariantów modernizacji mostu zastosowano wzór (1). Wyniki analizy ekonomicznej LCC_j przyjęto w € na podstawie tablicy 4, natomiast wyniki środowiskowej $EnvS_j$ w punktach ekowskaźnika kPt na podstawie rysunku 15. Ponieważ w obu analizach im mniejsza wartość wyniku (kosztu, ekowskaźnika) tym lepszy jest oceniany wariant, ta sama zasada stosuje się do wyniku końcowego $Score_j$. Wagi ważności dla środowiska i ekonomii $EnvW_i$ i $EconW_i$ zmieniano w przedziale od 0 do 1, co pozwoliło na ustalenie zależności wyniku końcowego analizy cyklu życia $Score_j$ od parytetu przyjętego dla poszczególnych aspektów zrównoważonego rozwoju. Wyniki obliczeń pokazano na rysunku 16.

Holistyczna ocena cyklu życia sporządzona wg metodyki opisanej w p.2 oraz zakładająca przyjęte wg tablicy 2 scenariusze utrzymaniowe dla poszczególnych wariantów modernizacji wykazała, że wariantem najlepiej spełniającym zasady zrównoważonego rozwoju jest wariant z pomostem aluminiowym. Co więcej, „zwycięstwo” tego wariantu jest niezależne od przyjętej wagi obu aspektów zrównoważonego rozwoju: środowiska i ekonomii. Natomiast sam wynik końcowy $Score_j$ wariantu z pomostem aluminiowym jest wprost proporcjonalny do wagi środowiska i odwrotnie proporcjonalny do wagi ekonomii. Czym ważniejsze w analizie cyklu życia mostu będą aspekty środowiskowe, tym rozwiązanie z pomostem aluminiowym będzie lepsze. Natomiast odwrotnie jest w przypadku wariantu z pomostem stalowym, gdzie większa waga środowiska obniża końcowy ranking tego rozwiązania. Jeżeli w analizie nie uwzględnimy ogółem wpływów środowiskowych to końcowe oceny dla obu wariantów metalowych są bardzo zbliżone, jednakże z nieznaczną przewagą wariantu z pomostem aluminiowym. Rozwiązaniem najgorzej spełniającym zasady zrównoważonego rozwoju jest wariant z pomostem żelbetowym. Końcowy wynik analizy cyklu życia dla tego wariantu jest prawie stały, tj. niezależny od wagi środowiska i ekonomii. Natomiast punkt „break-even” przy porównaniu wariantu żelbetowego ze stalowym występuje przy stosunku wag $EnvW_i : EconW_i$ równym 70 % : 30 %. Oznacza to, że dopiero gdy przyjmiemy współczynnik wagowy dla środowiska większy od 0,7 (lub współczynnik dla ekonomii mniejszy niż 0,3), to wariant z pomostem żelbetowym będzie rozwiązaniem lepszym z punktu widzenia zasad zrównoważonego rozwoju.



Rys.16. Końcowy wynik analizy cyklu życia w zależności od wagi środowiska (a) i ekonomii (b)

Fig.16. Final score of life cycle analysis versus environmental (a) and economical (b) weight

Przeprowadzona analiza 60-letniego cyklu życia dla trzech wariantów modernizacji mostu wykazała, że biorąc pod uwagę zasady zrównoważonego rozwoju ranking ocenianych rozwiązań wygląda następująco: (1) wariant z pomostem aluminiowym, (2) wariant z pomostem stalowym, (3) wariant z pomostem żelbetowym. Kolejność ta jest dokładnie odwrotna niż w rankingu, sporządzonym na podstawie kosztów bezpośredniego wbudowania, który dzisiaj decyduje o wyborze wariantu. Należy zaznaczyć

jednak, że wynik przedstawionej analizy w znaczącym stopniu zależy od scenariusza działań w cyklu życia mostu (tabl. 2). Przyjęcie innego scenariusza lub zmiany w kolejności i częstotliwości przewidzianych działań mogą zmienić ocenę poszczególnych wariantów. Tym bardziej jednak wydaje się uzasadnione korzystanie z przedstawionej metodyki oceny przy planowaniu działań w zakresie utrzymania mostów w zgodzie z zasadami zrównoważonego rozwoju. Jest to o tyle istotne, że w przyjętej w lutym 2005 r. przez rząd „Strategii wdrażania w Polsce zintegrowanej polityki produktywnej” zaleca się dążenie do minimalizowania oddziaływania produktów (materiałów, konstrukcji, technologii) na środowisko we wszystkich fazach cyklu ich życia. Działanie to powinno opierać się na wiedzy, jakiej dostarczyć może szeroko i systematycznie stosowana analiza cyklu życia produktu. Dotyczy to również wyrobów i technologii stosowanych w budownictwie mostowym.

Bazując na przeprowadzonej własnej analizie cyklu życia obiektu mostowego oraz przedstawionych w piśmiennictwie doświadczeniach ze stosowania podobnych analiz można sformułować kilka wytycznych, stanowiących swoiste przykazania dla projektantów, chcących stosować zasady zrównoważonego rozwoju. Oto one:

- nie należy projektować wyrobów, ale ich cykle życia; należy zwracać uwagę na produkt od jego fazy koncepcyjnej aż do ostatecznego zagospodarowania materiałów z jego rozbiórki (tzw. podejście „od kołyski do grobu”),
- należy uwzględniać aspekt zużycia energii; ocena energochłonności materiału lub technologii powinna mieć miejsce na każdym etapie cyklu życia produktu, zarówno w fazie jego powstawania, jak i użytkowania oraz utylizacji,
- należy minimalizować zużycie materiałów, dbając tym samym o racjonalne wykorzystywanie surowców naturalnych,
- należy przedłużać cykl życia produktów, zwiększając ich trwałość,
- należy używać materiałów z recyklingu, co ogranicza zużycie nowych surowców, a tym samym zmniejsza ilości powstających odpadów.

7. PODSUMOWANIE

Przedstawiona w pracy metodyka analizy cyklu życia mostu, bazująca na propozycjach amerykańskich w zakresie *LCCA* oraz normach europejskich w zakresie *LCA*, jest jednym z możliwych sposobów oceny stopnia wdrożenia zasad zrównoważonego rozwoju w mostownictwie. Użyte oprogramowanie (BridgeLCC 2.0, ECO-it) jest ogólnie dostępne i stosunkowo proste w zastosowaniu, aczkolwiek mające kilka ograniczeń, mogących mieć wpływ na wyniki analizy. Jednym z takich ograniczeń jest deterministyczny charakter analizy, ograniczający skuteczność bazującego na jej wynikach procesu decyzyjnego. Na rynku istnieją jednak znacznie bardziej złożone programy posiadające zintegrowane bazy danych środowiskowych (np. SimaPro, Umberto, BEES, itp.), które pozwalają przeprowadzać analizy cyklu życia ze znacznie większym prawdopodobieństwem otrzymanego wyniku. Konieczność wdrażania

zasad zrównoważonego rozwoju spowoduje, że programy te staną się już wkrótce integralnym składnikiem nowoczesnego warsztatu biur projektów, także mostowych. Dlatego warto wiedzę o nich i ich zastosowaniach upowszechniać i popularyzować.

Wdrażanie zasad zrównoważonego rozwoju przez zastosowanie w procesie podejmowania decyzji analiz cyklu życia pozwala także na upowszechnienie zaawansowanych technologicznie materiałów, dla których barierą jest ich wysoki koszt bezpośredni. Tylko analiza kosztów w całym cyklu życia produktu, pozwalająca na uwzględnienie takich zalet zaawansowanych technologicznie materiałów jak trwałość, lekkość, łatwość kształtowania elementów, itp., może wykazać zasadność ich wykorzystania, także w budownictwie mostowym. Przedstawione w pracy wyniki analizy cyklu życia dla wariantu modernizacji mostu z pomostem aluminiowym jednoznacznie wykazały, że stop aluminium w opisanym przypadku i przyjętych założeniach jest materiałem bardzo dobrze spełniającym zasady zrównoważonego rozwoju. Zarówno koszty generowane przez budowę i eksploatację mostu z pomostem aluminiowym, jak również związane z tym obciążenie środowiskowe były niższe w porównaniu z materiałami konwencjonalnymi (żelbetem, stalą). Podobny wynik można uzyskać rozpatrując zastosowanie innych zaawansowanych technologicznie materiałów, jak kompozyty *FRP*, niekonwencjonalne betony (np. betony lekkie), czy konstrukcje hybrydowe (kompozyt – stal, kompozyt – beton) [21].

W związku z koniecznością wdrażania w budownictwie zasad zrównoważonego rozwoju, coraz większą wagę przykładą się do modelowania cyklu życia produktu (obiektu). Coraz powszechniej dostępne programy komputerowe do analizy cyklu życia oraz wskaźniki środowiskowe, ekonomiczne i socjalne związane z cyklem życia produktów (materiałów, technologii) zmieniają współczesne projektowanie w kierunku optymalizacji wdrażania zasad zrównoważonego rozwoju. Proces ten jest już widoczny także w budownictwie mostowym. Dlatego kwestią czasu jest upowszechnienie się w Polsce analizy cyklu życia jako metody wspomagania podejmowania decyzji, co wpłynie na skuteczną realizację zasad zrównoważonego rozwoju oraz znacznie przyspieszy wdrożenie w naszym mostownictwie zaawansowanych technologicznie materiałów, produktów lub procesów.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Ozbay K., Parker N.A., Jawad D., Hussain S.*: Guidelines for life-cycle cost analysis. Final Report No. FHWA-NJ-2003-012, New Jersey Department of Transportation, Trenton, NJ, USA, 2003
- [2] *Ehlen M.A., Marshal H.E.*: The economics of new-technology materials: a case study of FRP bridge decking. Report No. NISTIR 5864. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA, 1996

- [3] ASTM Standard E 917-2. Standard practise for measuring life cycle cost of buildings and building system. American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2002
- [4] *Ehlen M.A.*: BridgeLCC 2.0 users manual. Life-cycle costing software for preliminary design of bridges. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA, 2003
- [5] PN-EN ISO 14040:2000. Zarządzanie środowiskowe. Ocena cyklu życia. Zasady i struktura
- [6] PN-EN ISO 14041:2002. Zarządzanie środowiskowe. Ocena cyklu życia. Określenie celu i zakresu oraz analiza zbioru
- [7] PN ISO 14042:2002. Zarządzanie środowiskowe. Ocena cyklu życia. Ocena wpływu cyklu życia
- [8] PN ISO 14043:2002. Zarządzanie środowiskowe. Ocena cyklu życia. Interpretacja cyklu życia
- [9] Zarządzanie środowiskowe. Komentarz do norm serii ISO 14000. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2005
- [10] *Jönbrik A.K., Wolf-Wats C., Erixon M., Olsson P., Wallen E.*: LCA software survey - IVL. Swedish Environmental Research Institute Ltd., Stockholm 2000
- [11] *Lippiatt B.*: BEES 3.0. Building for Environmental and Economic Sustainability. Technical manual and user guide. Report No. NISTIR 6916. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA, 2002
- [12] 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 (Dz. U. z 2000 r., Nr 63, poz. 735)
- [13] *Siwowski T.*: Modernizacja mostu przez Wisłę w Nagnajowie. Inżynieria i Budownictwo, nr 1-2/2009 (w druku)
- [14] *Siwowski T.*: Badania pomostu aluminiowego pod obciążeniem statycznym. Materiały z XLIX Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZiTb, Tom V, 125 - 132, Warszawa - Krynica, 2003
- [15] *Siwowski T.*: Badania panelu pomostu aluminiowego pod obciążeniem dynamicznym. Materiały z L Jubileuszowej Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZiTb, Tom V, 87 - 94, Warszawa - Krynica, 2004
- [16] *Szrajber J.*: Instrukcja oceny efektywności ekonomicznej przedsięwzięć drogowych i mostowych - weryfikacja metody badań zgodnie z zaleceniami UE oraz aktualizacja cen jednostkowych na poziomie 2005 r. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa 2006
- [17] Prognozy wskaźnika wzrostu PKB na okres 2007 - 2037 do celów planistyczno projektowych dla dróg krajowych. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa 2007

- [18] *Cooper J.S.*: Specyfying functional units and reference flows for comparable alternatives. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **8**, 6, 337-349, 2003
- [19] *Siwowski T., Kusek T.*: Sposoby modernizacji kratowych przęseł mostów drogowych. Materiały z Konferencji Naukowo - Technicznej: Mosty w drodze do XXI wieku, Politechnika Gdańska, 731 - 741, Gdańsk - Jurata, 1997
- [20] *Siwowski T., Piekielek M.*: Studium modernizacji mostu przez Wisłę w Nagnajowie z wykorzystaniem pomostu aluminiowego. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, seria: Budownictwo i Inżynieria Środowiska, zeszyt 36 (208), 135-150, 2004
- [21] *Siwowski T.*: Pomosty drogowe. Część I - *Magazyn Autostrady*, nr 10/2006, wydanie specjalne - jesień 2006, pt.: „Mosty - konstrukcja, wyposażenie, utrzymanie”, 30-38, część II - *Magazyn Autostrady*, nr 11/2006, 67-72

THE APPLICATION PROPOSAL OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT RULES FOR BRIDGE MODERNISATION

Abstract

Sustainable development is a philosophy of social-economic development with a pattern of resource use that aims to meet human needs while preserving the environment so that these needs can be met not only in the present, but in the indefinite future. It requires the minimization of the environmental impacts of a given product or service caused or necessitated by its existence in whole life cycle, ie. *from-cradle-to-grave*. The investigation and valuation of the environmental impacts are based on life cycle analysis with the use of the special assessment methods for product/material/technology comparison in respect of sustainable development. The whole life costs and environmental impacts assessment are the subject of two types of analysis: *LCCA – life cycle costs analysis* and *LCA – life cycle (environmental) analysis*. The integrated results of both analysis are commonly used for an evaluation, how a compared products/materials/technologies fulfil the sustainable development requirements.

The application of *LCCA* and *LCA* analysis for the bridge modernisation case study is the subject of the paper. The comparative analysis of costs and environmental impacts in the whole life of a bridge for three variants of its modernisation has been carried out. The bridge modernisation with the use of the RC deck, steel deck and aluminium deck has been considered in the study. The final results have enabled the holistic view on the bridge redecking problem being very common in contemporary bridge maintenance policy. The analysis clearly reveals, that both life cycle costs and environmental impacts are the least in the case of aluminium deck. Only the whole life cycle analysis could prove, that the application of advanced materials/products/technologies in bridge construction leads up towards the sustainable development.