

**Dr inż. Jolanta Dźwierzynska**

Politechnika Rzeszowska  
Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury  
Zakład Projektowania Architektonicznego i Grafiki Inżynierskiej  
Al. Powstańców Warszawy 12  
35-959 Rzeszów  
email: joladz@prz.edu.pl  
tel. 17 865 17 04

Załącznik nr 3

## **Autoreferat**

do Wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego w dziedzinie nauki techniczne  
dyscyplina budownictwo

Rzeszów, kwiecień 2019

## 1. Imię i nazwisko

Jolanta Dźwierzynska

## 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

**Stopień doktora nauk technicznych, dyscyplina budownictwo**

Rok uzyskania: **2005**

Miejsce: Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Rzeszowskiej

Tytuł rozprawy doktorskiej: *Zastosowanie dwurzutowych odwzorowań częściowo-złożeniowych do bezpośrednich konstrukcji rozwinięć panoram walcowych i stożkowych przestrzeni E3*

Promotor: dr hab. inż. Bogusław Januszewski, prof. PRz

Recenzenci: dr hab. inż. Anna Błach, prof. PŚI  
dr hab. inż. arch. Aleksandra Prokopska, prof. PRz

**Tytuł magistra inżyniera**

Rok uzyskania: **1989**

Miejsce: Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Rzeszowskiej

Kierunek: budownictwo

Specjalność: budownictwo ogólne

Tytuł pracy magisterskiej: *Projekt basenu*

## 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- 1988 – 1989 – **asystent stażysta** w Zakładzie Geometrii Wykreślnej  
Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska  
Politechniki Rzeszowskiej (V rok studiów)
- 1989 – 1997 – **asystent** w Zakładzie Geometrii Wykreślnej  
Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska  
Politechniki Rzeszowskiej
- 1997 – 2005 – **asystent** w Zakładzie Geometrii i Grafiki Inżynierskiej  
Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska  
Politechniki Rzeszowskiej
- 2006 – 2012 – **adiunkt** w Zakładzie Geometrii i Grafiki Inżynierskiej  
Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska  
Politechniki Rzeszowskiej

2012 – – **adiunkt** w Zakładzie Projektowania Architektonicznego i Grafiki Inżynierskiej, Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska (od 2014 Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury)  
Politechniki Rzeszowskiej i Architektury

W okresie 1991-1997 nie prowadziłam działalności naukowej z uwagi na przebywanie na urloпах macierzyńskich i wychowawczych, dlatego w tym okresie nie powstały artykuły mojego autorstwa.

**4. Wskazane osiągnięcia wynikające z art.16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. W Dz. U. z 2016r. poz. 1311)**

**a) tytuł osiągnięcia naukowego :**

Jako osiągnięcie wynikające z Ustawy przedkładam monografię zatytułowaną:  
*Algorithmic-aided shaping curvilinear steel bar structures*

tytuł w języku polskim:

*Algorytmicznie wspomagane kształtowanie krzywoliniowych, stalowych konstrukcji prętowych*

**b) autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy**

Jolanta Dźwierzyska

*Algorithmic-aided shaping curvilinear steel bar structures*

Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2019

ISBN 978-83-7934-300-3

Recenzenci wydawniczy: **dr hab. Edwin Koźniewski, prof. PB**  
**dr hab. inż. Jerzy K. Szlendak, prof. nzw.**

**c) omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania**

## Wprowadzenie

Podjęta tematyka kształtowania konstrukcji w przedłożonej do oceny monografii pt. „*Algorytmicznie wspomagane kształtowanie krzywoliniowych, stalowych konstrukcji prętowych*” została zainspirowana obszarem badań prowadzonych przez wybitnych Profesorów, pracowników Katedry Konstrukcji Budowlanych Politechniki Rzeszowskiej, którzy przez wiele lat zajmowali się zagadnieniami kształtowania konstrukcji zarówno w teorii jak i praktyce inżynierskiej.

Problematyka kształtowania obiektów budowlanych, w tym ich konstrukcji jest bardzo szeroka i obejmuje wiele aspektów. Na przestrzeni lat opracowano różne metodologie kształtowania obiektów budowlanych zgodnie z rozwojem ówczesnej myśli projektowej oraz zależnie od uwarunkowań technologicznych i materiałowych, jak również obowiązujących kanonów piękna i aktualnych trendów. Kształtowanie obiektu budowlanego można określić jako optymalizację kształtu i formy obiektu, tak aby w jak największym stopniu spełniał on założone kryteria wstępne. Z uwagi na to, że faza kształtowania, to faza poprzedzająca wszystkie kolejne etapy procesu projektowania, jest ona etapem najbardziej twórczym, a jednocześnie ma znaczący wpływ na ostateczną formę obiektu. Ze względu na odmienną specyfikę uwarunkowań architektonicznych w stosunku do uwarunkowań konstrukcyjnych w rozważaniach teoretycznych, a także niekiedy w praktyce inżynierskiej, kształtowanie architektoniczne jest oddzielone od kształtowania konstrukcyjnego. W kształtowaniu architektonicznym najwięcej uwagi poświęca się zapewnieniu jak najlepszej funkcji obiektu i jego walorów estetycznych, natomiast kształtowanie konstrukcyjne to poszukiwanie takiego systemu konstrukcyjnego, który spełnia przede wszystkim wymagania wytrzymałościowe i niezawodnościowe przy założonym racjonalnym koszcie konstrukcji. Jest jednak rzeczą oczywistą, że uwarunkowania architektoniczne i konstrukcyjne kształtowania obiektu są współzależne. Forma obiektu jest uzależniona od funkcji. Z kolei przyjęta forma wymusza rozwiązania konstrukcyjne, technologiczne i materiałowe, które wpływają na ogólną estetykę. Z tego względu współzależność formy architektonicznej obiektu i jego układu konstrukcyjnego jest głównym celem racjonalnego kształtowania prezentowanego w monografii.

Nowe trendy estetyczne implikują powstawanie coraz bardziej złożonych i wymagających form, co dyktuje potrzebę uczestnictwa konstruktora już w początkowej fazie projektowania. Dlatego jednym z celów monografii jest próba wskazanie możliwości opracowania pewnej platformy współpracy i komunikacji między architektem a konstruktorem za pomocą nowoczesnych narzędzi cyfrowych. Taką platformę może stanowić kształtowanie konstrukcji wspomagane algorytmicznie, umożliwiające swobodny przepływ informacji między modelem geometrycznym a konstrukcyjnym.

Potrzeba opracowania ram projektowych dla złożonego procesu kształtowania konstrukcji została dostrzeżona przez wielu naukowców. Profesor Waław Zalewski, uważany za prekursora racjonalnego kształtowania konstrukcji w Polsce, twórca teorii kształtowania konstrukcji zgodnie z przepływem sił, w swych opracowaniach [M137] zawarł wytyczne dotyczące kształtowania konstrukcji w celu uzyskania najkorzystniejszych efektów statycznych i estetycznych. Z kolei prof. S. Kuś, jeden z wybitnych współpracowników prof. W. Zalewskiego w swych licznych publikacjach, odwołując się do własnej działalności



projektowej, prowadzi rozważania dotyczące kształtowania konstrukcji spełniającej wymagania zarówno funkcji, mechaniki budowli, estetyki jak również minimalnego kosztu, zwracając uwagę na niejednoznaczność kształtowania konstrukcyjnego z kształtowaniem architektonicznym czy optymalizacją konstrukcji [M64]. W wytycznych dotyczących kształtowania zawartych w [M64] widzi między innymi potrzebę racjonalnego i efektywnego kształtowania przekrojów prętowych, kształtowania funikularnego i kształtowania zgodnie z minimalną energią sprężystą. Natomiast najbardziej uniwersalnym i szerokim kryterium kształtowania konstrukcji opisanym w [M125], jest kryterium minimalnego ryzyka, a podstawowym kryterium kształtowania, kryterium największej niezawodności konstrukcji.

Przedstawione w monografii podejście do kształtowania krzywoliniowych, stalowych konstrukcji prętowych uwzględnia wytyczne racjonalnego kształtowania opracowane przez wybitnych naukowców i konstruktorów i pokazuje, jak te wytyczne można zastosować przy użyciu nowoczesnych narzędzi cyfrowych tak, aby proces optymalizacji konstrukcji mógł zostać wdrożony już na wstępnym etapie kształtowania.

Z uwagi na to, iż faza koncepcyjna związana jest z wielowariantową analizą początkowych rozwiązań, wymaga zastosowania wszechstronnych narzędzi definiujących model konstrukcyjny, a także uwzględniających zespołowy charakter projektowania. Prezentowane w monografii badania koncentrują się na racjonalnym i efektywnym kształtowaniu krzywoliniowych stalowych konstrukcji prętowych, którego celem jest ukształtowanie odpowiedniej geometrii konstrukcji o zamierzonej funkcjonalności stosownie do wymagań konstrukcyjnych, tak aby nowo ukształtowana konstrukcja była zgodna z dwiema podstawowymi intencjami projektowymi: "form follows function", i "form follows forces".

Sposób kształtowania konstrukcji uzależniony jest również od rodzaju i możliwości zastosowanych narzędzi projektowych. W dzisiejszych czasach kształtowanie odbywa się przy wsparciu nowoczesnych narzędzi cyfrowych, które w znacznym stopniu ułatwiają zarówno proces tworzenia złożonej geometrii, jak i wykonywanie zaawansowanych analiz i obliczeń konstrukcyjnych w coraz krótszym czasie obliczeniowym. Większość narzędzi cyfrowych chociaż znacznie ułatwia i przyspiesza pracę projektanta nie jest kompleksowa co oznacza, że do generowania złożonej geometrii i do obliczeń konstrukcyjnych używane są oddzielne narzędzia. Natomiast rozwój nowych technologii polegających na gładkim modelowaniu cyfrowym w oparciu o krzywe Rational B-Splines (NURBS) i ich zastosowanie pomogły wprowadzić i rozwinąć koncepcje tworzenia form nieliniowych w sposób dynamiczny i parametryczny, co spowodowało znaczną zmianę w kształtowaniu geometrycznym. Kolejną rewolucyjną zmianą było opracowanie narzędzi cyfrowych umożliwiających algorytmiczne kształtowanie form geometrycznych, jak np. narzędzia pracujące w środowisku Rhinoceros 3D firmy Robert McNeel & Associates. Z kolei synchronizacja kształtowania geometrycznego z analizą konstrukcyjną możliwa przy użyciu Rhinoceros 3D i Karamba 3D stwarza możliwości racjonalnego kształtowania od pierwszego etapu projektowania. Pojawienie się nowych narzędzi projektowych implikuje zawsze aspekty ich prawidłowego użytkowania i jak najlepszego, innowacyjnego wykorzystania.

## Cel naukowy pracy

W nawiązaniu do powyższych uwarunkowań monografia omawia algorytmiczne wspomaganie kształtowania krzywoliniowych stalowych konstrukcji prętowych za pomocą narzędzi projektowych działających w środowisku oprogramowania Rhinoceros 3D. Powodem wyboru takiego tematu było ustalenie procedur kształtowania krzywoliniowych stalowych konstrukcji prętowych, w celu zintegrowania geometrii i efektywności konstrukcyjnej jako jednego celu w początkowej fazie projektowania. Konieczność opracowania takich procedur jest spowodowana zarówno rosnącą popularnością metod parametrycznych w projektowaniu, jak i ich ogromnym potencjałem w tworzeniu nowych, niekonwencjonalnych i efektywnych form.

Cele monografii można sprecyzować w następujący sposób:

- przedstawienie skutecznych procedur generatywnego kształtowania krzywoliniowych stalowych, konstrukcji prętowych, polegającego na formowaniu siatki prętów poprzez umieszczanie jej węzłów na tzw. powierzchniach bazowych będących powierzchniami o korzystnych właściwościach geometrycznych lub mechanicznych, a mianowicie powierzchniami prostokreślnymi jak powierzchnie Catalana lub powierzchniami minimalnymi jak powierzchnie Ennepera czy formy swobodne rozpięte na czterech łukach, jak również powierzchnie powstałe w procesie dynamicznej relaksacji,
- zbadanie w jaki sposób właściwości mechaniczne powierzchni bazowych wpływają na przenoszenie obciążeń przez kształtowane na ich podstawie konstrukcje prętowe,
- przełożenie zasad kształtowania konstrukcji na logiczno-geometryczne i konstrukcyjne zależności poprzez opracowanie uniwersalnych algorytmów opisujących geometryczne i konstrukcyjne modele kształtowanych konstrukcji prętowych jednopowłokowych i wielopowłokowych przekryć budowlanych, które mogą być wykorzystane w symulacjach, umożliwiając m.in. ocenę wytrzymałości konstrukcji, a także dobór optymalnego rozwiązania projektowego w zależności od przyjętych kryteriów wstępnych, z uwzględnieniem prostoty konstrukcji, aspektów mechanicznych i technologicznych, efektywnego wykorzystania materiału, oraz możliwych oszczędności
- porównanie wyników wspomaganego algorytmicznie kształtowania krzywoliniowych, stalowych konstrukcji prętowych za pomocą narzędzi projektowych pracujących w środowisku Rhinoceros 3D z wynikami uzyskanymi za pomocą narzędzi konwencjonalnego oprogramowania, jakim jest oprogramowanie Robot Structural Analysis Professional 2019, przedstawienie zalet i wad prezentowanej metody,

- przeanalizowanie w jaki sposób przyjęte wzory siatek prętów rozważanych konstrukcji, jak również sposób podziału przestrzennych siatek czworokątnych na siatki trójkątne wpływają na wytrzymałość i zachowanie się krzywoliniowych, stalowych konstrukcji prętowych pod obciążeniem
- analiza przydatności procesu genetycznej optymalizacji jedno oraz wielokryterialnej jako narzędzia do poszukiwania racjonalnych form konstrukcyjnych poprzez zastosowanie genetycznej optymalizacji do minimalizacji masy konstrukcji oraz znalezienia jak najkorzystniejszego sposobu podparcia konstrukcji,
- opracowanie oryginalnych, swobodnych form krzywoliniowych, stalowych konstrukcji prętowych uzyskanych za pomocą metody „form-finding” charakteryzujących się korzystnymi właściwościami mechanicznymi,
- wskazanie możliwości i korzyści kształtowania algorytmicznego zarówno dla architekta, jak i konstruktora współpracujących razem we wspólnym procesie twórczym.

## Osiągnięte wyniki

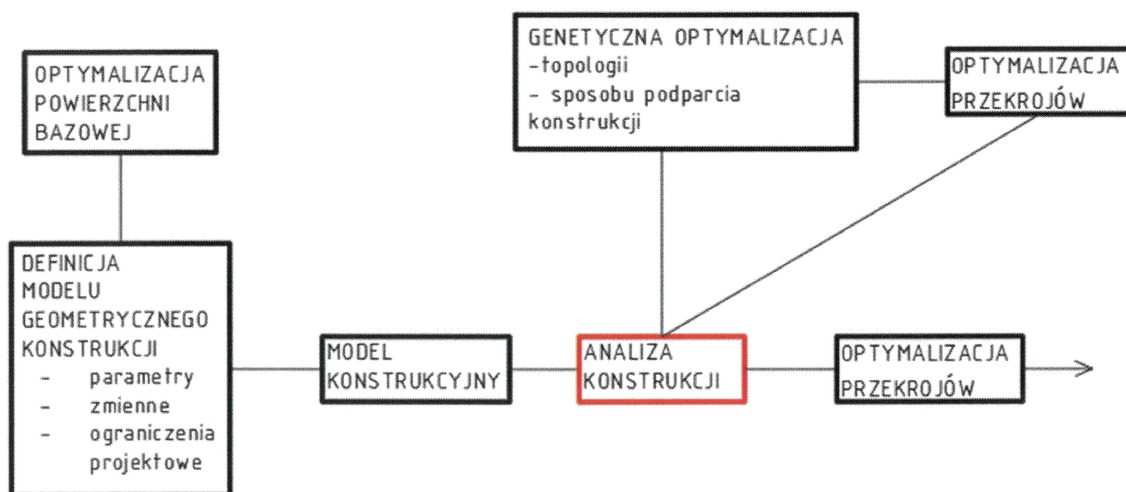
Aktywne wykorzystywanie oprogramowania Rhinoceros 3D/Grasshopper w procesie projektowania architektonicznego staje się coraz bardziej popularne na świecie głównie jako narzędzie do generowania modeli o złożonej geometrii. Natomiast algorytmiczne kształtowanie konstrukcyjne, które oznacza proces, w którym zarówno model geometryczny jak i analiza konstrukcji realizowane są za pomocą algorytmów, jest nową dziedziną badań. Dlatego prezentowane w monografii podejście do kształtowania krzywoliniowych stalowych konstrukcji prętowych wiat i zadaszeń jest innowacyjne.

W dzisiejszych czasach zastosowanie krzywoliniowych, stalowych konstrukcji prętowych jest coraz szersze. Różnorodność form i rozwiązań konstrukcyjnych świadczy o łatwej możliwości dostosowania tych konstrukcji do różnych kształtów, jak również jest przejawem różnorodnych zamysłów projektowych. Jednak zawsze kształtowaniu, projektowaniu i rozwojowi tego typu konstrukcji towarzyszy szereg zagadnień, które często wymagają niekonwencjonalnego i interdyscyplinarnego podejścia. Możliwości kompleksowego podejścia do kształtowania konstrukcji stwarza właśnie kształtowanie parametryczne polegające na optymalizacji konstrukcji poprzez identyfikację i sukcesywne uściślanie parametrów ją opisujących.

Podczas badań, w celu generowania modeli geometrycznych, używana jest wersja Rhinoceros 5.0 w połączeniu z narzędziem do parametrycznego projektowania Grasshopper. pozwalającym na tworzenie złożonych algorytmów generatywnych przy równoległej eksploracji kształtowanych modeli geometrycznych w rzutni Rhinoceros 3D.

Ogólnie sposób kształtowania konstrukcji zaprezentowany w monografii rozpoczyna się od utworzenia skryptów opisujących parametrycznie geometryczny model konstrukcji.

Następnie na podstawie utworzonego modelu geometrycznego konstrukcji oraz przyjętych warunków brzegowych dotyczących sposobu podparcia, obciążenia, a także rodzaju połączeń prętów i właściwości materiałowych odbywa się integracja kształtowania geometrycznego i analizy konstrukcji poprzez nakładkę Karamba 3D. Opracowany model konstrukcyjny poddaje się analizie, która może przebiegać dwustopniowo. Pierwsza analiza dotyczy konstrukcji obciążonej ciężarem własnym, w której topologia konstrukcji, jak również sposób podparcia są optymalizowane oraz przekroje prętów wstępnie ustalone, biorąc pod uwagę minimalną masę konstrukcji, minimalne odkształcenia oraz maksymalne wyężenie prętów. Następnie wcześniej zoptymalizowany model poddaje się kolejnej analizie przy założeniu różnych kombinacji obciążeń uwzględniając obciążenia od śniegu i wiatru oraz wymiaruje. Proces wymiarowania i optymalizacji przekrojów może przebiegać albo przy zastosowaniu programu Rhinoceros 3D w połączeniu z Karamba 3D albo przy zastosowaniu tradycyjnego oprogramowania do analizy konstrukcji. Ogólny schemat postępowania przedstawiono na Rys.1, jednak dla każdej rozważanej w monografii konstrukcji droga kształtowania jest ustalana indywidualnie. W niektórych przypadkach procesu kształtowania konstrukcji przeprowadza się optymalizację geometrycznego modelu powierzchni bazowej zastosowanej do formowania siatki prętów, przyjmując jako kryterium optymalizacyjne minimalne pole powierzchni.



Rysunek 1. Schemat zintegrowanego procesu kształtowania konstrukcji

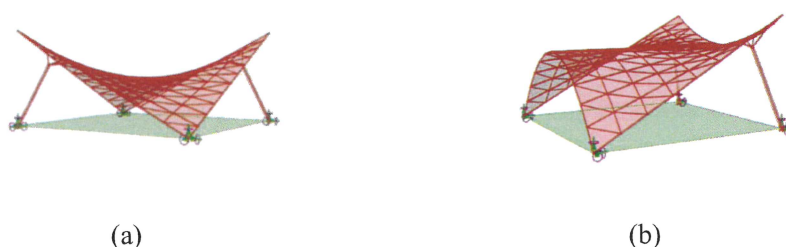
Przedstawione w monografii kształtowanie konstrukcji za pomocą opracowanych procedur polega na tworzeniu krzywoliniowych stalowych konstrukcji prętowych poprzez umieszczenie węzłów konstrukcyjnych siatki prętów na tak zwanej powierzchni bazowej. Jednakże, aby uzyskać efektywne krzywoliniowe stalowe konstrukcje prętowe, konieczne jest, jak pokazano w badaniach, wybranie jako powierzchni bazowej, powierzchni o korzystnych właściwościach geometrycznych ze względu na kształt czy możliwość podziału lub powierzchni o korzystnych właściwościach mechanicznych jak np. powierzchnia minimalna..

## *Kształtowanie krzywoliniowych stalowych konstrukcji prętowych na bazie powierzchni Catalana*

Jedną z grup powierzchni zaproponowanych jako powierzchnie bazowe do kształtowania konstrukcji prętowych są: powierzchnie prostokreślne, w szczególności powierzchnie Catalana, stanowiące grupę powierzchni skośnych, których tworzące są równoległe do zadanej płaszczyzny. W zależności od rodzaju krzywych wyznaczających powierzchnie, dzieli się je na paraboloidy hiperboliczne, cylindroidy i conoidy.

Badania rozpoczęto od analizy krzywoliniowych stalowych konstrukcji prętowych ukształtowanych na bazie paraboloidy hiperbolicznej będącej kwadryką skośną, wyznaczoną przez dwie proste skośne, jak również cylindroidy zdefiniowanej przez dwie krzywe będące parabolami. Kwadryki skośne jako powierzchnie znalazły zastosowanie w różnych rozwiązaniach przekryć budowlanych, głównie jako powłokowe przekrycia żelbetowe lub stalowe wykonane z giętych arkuszy. Dlatego większość badań dotyczących przekryć o kształcie paraboloidy hiperbolicznej dotyczy teoretycznych oraz praktycznych aspektów konstrukcyjnych powyższych powłok. Chociaż paraboloida hiperboliczna jako powierzchnia prostokreślna może stanowić dobrą powierzchnię bazową do formowania siatek prętów, brakuje badań dotyczących wpływu podziału paraboloidy hiperbolicznej oraz uzyskanych w wyniku podziału wzorów przestrzennych siatek prętów na nośność powstałej konstrukcji prętowej.

Dlatego celem przeprowadzonych badań i przedstawionych w monografii było porównanie efektywności konstrukcji wiat będących krzywoliniowymi stalowymi konstrukcjami prętowymi utworzonymi na bazie paraboloidy hiperbolicznej i cylindroidy przekrywających taką samą powierzchnię Rys.2, jak również zdefiniowanie najefektywniejszej topologii konstrukcji prętowej powstałej w oparciu o powyższe powierzchnie w drodze optymalizacji genetycznej przy zadanych warunkach brzegowych.



Rysunek 2. Analizowane wiaty o kształcie: (a) paraboloidy hiperbolicznej; (b) cylindroidy

Badania przeprowadzono przy założeniu, że obydwie konstrukcje wsparte są na czterech podporach, z których dwie mają ustaloną pozycję, natomiast pozycje pozostałych podpór stanowiących podstawy słupów prostopadłych do powierzchni dachu są zmienne. Każda z powierzchni stanowiła powierzchnię bazową do kształtowania trójkątnych siatek prętów. Siatki te tworzą na podstawie siatek czworobocznych powstałych przy jednakowym podziale każdej z linii brzegowych powierzchni na jednakową ilość części. W



zależności od sposobu podziału przestrzennych czworoboków, który może się odbywać wzdłuż krótszej lub dłuższej przekątnej uzyskano dwa różne wzory trójkątnych siatek prętów.

Punktem wyjścia do przeprowadzenia analiz i optymalizacji konstrukcji było utworzenie algorytmów opisujących model geometryczny każdej z konstrukcji a następnie algorytmów opisujących modele konstrukcyjne. Jako zmienne projektowe przyjęto wymiary placu, wysokość dachu, długości prętów siatki, długości słupów, współrzędne  $x, y$  określające położenie podstaw słupów, przekroje wszystkich rodzajów prętów wchodzących w skład konstrukcji oraz określono przedziały tych zmiennych.

Optymalizacja konstrukcji wiat o kształcie paraboloidy hiperbolicznej oraz cylindroidy przy zastosowaniu dwóch wzorów trójkątnych siatek prętów, powstałych w wyniku podziału siatek czworobocznych przebiegała kilkietapowo. Na wstępie zastosowano wielokryterialną, ewolucyjną optymalizację konstrukcji obciążonych ciężarem własnym w celu ustalenia optymalnej pozycji podpór, wstępnego ustalenia topologii siatki prętów oraz długości i przekrojów prętów. Przyjęto trzy kryteria optymalizacyjne: minimalną masę konstrukcji, jak największe wyężenie elementów oraz jak najmniejsze ugięcia konstrukcji. Ze względu na to, że zdefiniowana funkcja celu stanowiła kombinację trzech różnych kryteriów, będących kryteriami wzajemnie przeciwstawnymi, wynik przeprowadzonej optymalizacji nie dawał jednego optymalnego rozwiązania. Dlatego dla każdej z konstrukcji przeanalizowano zbiór niezdominowanych rozwiązań zwany zbiorem optymalnym w sensie Pareto, który został wyodrębniony z całej dopuszczalnej przestrzeni poszukiwań. Najlepsze rozwiązania uzyskano w przypadku konstrukcji przekrywających plac o kształcie kwadratu. Wstępnie zwymiarowano konstrukcje i dokonano ponownie optymalizacji wielokryterialnej przyjmując jednak w tym przypadku przekroje prętów jako stałe wielkości. Były to wielkości będące minimalnymi dopuszczalnymi przekrojami prętów, przyjętymi jednakowo dla obydwu konstrukcji. Następnie z frontu Pareto wybrano dla każdej z konstrukcji po cztery optymalne rozwiązania dla dwóch różnych wzorów siatek prętów, które miały podlegać dalszej ocenie.

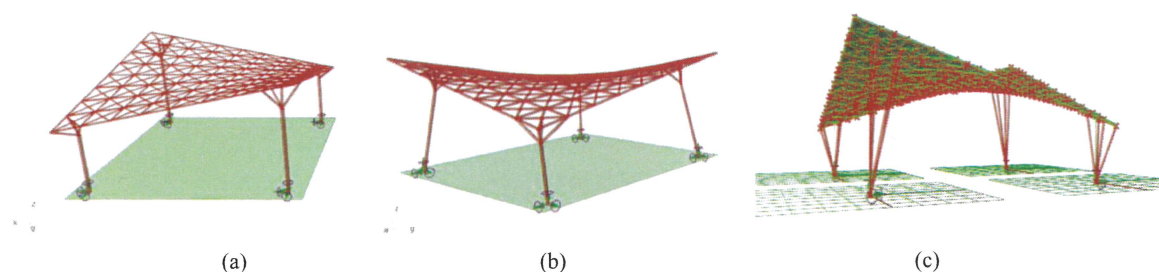
Badania wykazały, że konstrukcja wykonana na bazie cylindroidy jest znacznie cięższa od konstrukcji wykonanej na bazie paraboloidy hiperbolicznej, dlatego dalszej analizie i optymalizacji poddano wiatę o kształcie paraboloidy hiperbolicznej. Przebadano cztery różne rozwiązania (po dwa dla dwóch różnych wzorów siatek) wybrane ze zbioru optymalnych rozwiązań w sensie Pareto. Każdą z konstrukcji zwymiarowano biorąc pod uwagę obciążenia od śniegu i wiatru. Dokonano optymalizacji przekrojów prętów przyjmując jako kryterium optymalizacji minimalną masę konstrukcji. Obliczenia przeprowadzono dwutorowo za pomocą programu Autodesk Robot Structural Analysis i za pomocą nakładki Karamba 3D działającej w środowisku Rhinoceros 3D oraz porównano wyniki. Miało to na celu ocenę dokładności rezultatów obliczeń uzyskanych przy zastosowaniu nakładki Karamba 3D oraz ewaluację przydatności powyższego narzędzia do analizy konstrukcji.

Uzyskano podobne wyniki analizy konstrukcji przy zastosowaniu obu narzędzi. Jednak dopuszczalne przekroje poprzeczne prętów siatek ustalone za pomocą nakładki Karamba 3D były większe. Różnica ta spowodowana była przyjęciem większych uproszczeń przy założeniu obciążeń od śniegu w przypadku analizy za pomocą nakładki Karamba 3D, polegających na mniejszym zróżnicowaniu wielkości obciążeń przyjętych dla poszczególnych części dachu. W związku z tym przyjęte obciążenie konstrukcji od oddziaływań śniegu różniło się nieznacznie przy zastosowaniu do analizy obu narzędzi Autodesk Robot Structural

Analysis oraz Karamba 3D. Jednak przyjęte uproszczenia wynikające z trudności precyzyjnej definicji obciążeń działających na powierzchnie krzywoliniowe w przypadku zastosowania nakładki Karamba 3D nie są istotne z uwagi na to, że faza kształtowania konstrukcji jest wstępnym, szacunkowym etapem procesu projektowania. Natomiast możliwość przeprowadzenia ewolucyjnej optymalizacji modelu konstrukcji przy zastosowaniu różnych kryteriów wstępnych uzasadnia celowość stosowania programu Rhinoceros 3D z nakładką Karamba 3D do analizy konstrukcji.

Jak wcześniej wspomniano, trójkątne siatki prętów tworzące krzywoliniowe, stalowe konstrukcje prętowe analizowane w opracowaniu uzyskuje się przez podzielenie przestrzennych, czworobocznych siatek, a podział może odbywać się wzdłuż dłuższych przekątnych czworoboków lub krótszych. Badania ujawniły duże różnice w masie konstrukcji i asortymencie prętów w zależności od sposobu kształtowania siatek trójkątnych w oparciu o siatki czworoboczne. Analiza konstrukcji przeprowadzona przez obydwa programy wykazała, że siatki prętów uzyskane przy podziale wzdłuż dłuższych przekątnych czworoboków są znacznie lżejsze niż siatki utworzone przy podziale wzdłuż krótszych przekątnych. Porównując jednak różnorodność asortymentu prętów stosowanych w obu typach konstrukcji, można stwierdzić, że konstrukcje o strukturze powstałej przy podziale wzdłuż krótszej przekątnej są efektywniejsze, gdyż asortyment prętów wchodzących w skład tych konstrukcji jest mniejszy. Optymalną konstrukcję przy analizowanych warunkach brzegowych otrzymano stosując podział powierzchni bazowej na pięć elementów wzdłuż tworzących brzegowych i zastosowaniu trójkątnej siatki przy podziale siatki czworobocznej wzdłuż krótszej przekątnej oraz zastosowaniu jako prętów konstrukcji rur o przekroju kwadratowym.

Analizie poddano również konstrukcje prętowe wiat o kształcie paraboloidy hiperbolicznej podparte przez cztery pojedyncze słupy będące słupami pionowymi, bądź słupami pochyłymi, ale prostopadłymi do powierzchni przekrycia, Rys. 3a, 3b.



Rys. 3. Wiaty poddane analizie podparte przez: (a) słupy pionowe; (b) słupy prostopadłe do powierzchni przekrycia; (c) pęki słupów

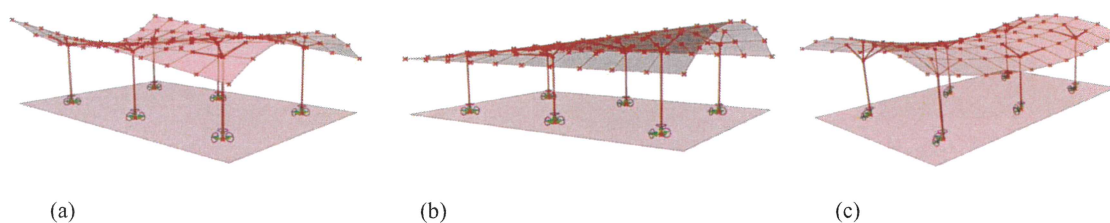
Przebadano dziesięć wiat o jednakowej wysokości całkowitej i dwóch różnych wysokościach konstrukcji przekrycia oraz dwóch różnych sposobach podparcia konstrukcji, zakładając że wiaty przekrywają powierzchnię w kształcie kwadratu o zmiennej długości boku. Dokonano analizy ciężaru powyższych konstrukcji. Badania wykazały, iż konstrukcje podparte przez słupy prostopadłe do powierzchni dachu są znacznie lżejsze niż porównywalne

konstrukcje podparte przez słupy pionowe. Procentowa różnica w masie powyższych konstrukcji maleje wraz ze wzrostem rozpiętości konstrukcji.

Alternatywą dla konstrukcji podpartych przez pojedyncze słupy mogą być podobne konstrukcje podparte przez pęk słupów, Rys 3c. Przeanalizowano efektywność powyższych konstrukcji, zakładając podparcie za pomocą czterech pęków słupów i przyjmując cztery słupy w każdym pęku. Badania wykazały dużą redukcję masy konstrukcji w przypadku zastosowania pęków słupów w porównaniu z masą konstrukcji przy zastosowaniu słupów pojedynczych, jak również zmniejszenie asortymentu prętów wchodzących w skład konstrukcji. Podobnie jak w przypadku konstrukcji wiat z zastosowaniem słupów pojedynczych, procentowa różnica w masie konstrukcji również maleje wraz ze wzrostem rozpiętości konstrukcji.

Zastosowanie BESO (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization) dwukierunkowej ewolucyjnej optymalizacji w przypadku optymalizacji konstrukcji jest działaniem nowym. Podjęto próbę przeprowadzenia BESO, umożliwiającej zarówno usuwanie nieefektywnie wykorzystywanych elementów konstrukcji, jak również dodawanie ich w miejscach, w których mogłyby być potrzebne z uwagi na pracę konstrukcji. Tego typu optymalizacja, możliwa dzięki zastosowaniu nakładki Karama 3D zwiększa prawdopodobieństwo znalezienia potencjalnie optymalnej konstrukcji. Jednak wyniki przeprowadzenia tego typu optymalizacji dla rozważanych konstrukcji prętowych nie były zadowalające. Uzyskane siatki, powstałe w wyniku optymalizacji (BESO) poprzez sukcesywną redukcję masy konstrukcji zawsze charakteryzowały się nieregularnym, i nieestetycznym wzorem, co pozwala stwierdzić, iż BESO ma małe zastosowanie w przypadku konstrukcji prętowych.

Dokonując analizy krzywoliniowych stalowych konstrukcji prętowych ukształtowanych na bazie powierzchni Catalana dokonano również porównania efektywności konstrukcji wiat o kształcie cylindroidy, konoidy oraz paraboloidy hiperbolicznej będącej powierzchnią translacyjną powstałą wskutek przemieszczenia krzywej będącej parabolą wzdłuż drugiej paraboli Rys. 4.



Rys. 4. Wiaty poddane analizie o kształcie: (a) cylindroidy; (b) konoidy; (c) paraboloidy hiperbolicznej

Założono, że każda z wiat ma stanowić przekrycie jednakowego prostokątnego placu, a jej konstrukcję tworzy siatka czworokątna podparta za pomocą sześciu pionowych słupów rozstawionych symetrycznie. Optymalną pozycję słupów konstrukcji analizowanych wiat ustalono w wyniku zastosowania ewolucyjnej optymalizacji jednokryterialnej, której



kryterium optymalizacyjne stanowiła masa konstrukcji. Przy zadanych jednakowych warunkach brzegowych dla każdej z konstrukcji dotyczących obciążenia, dopuszczalnego zakresu długości prętów siatki, wysokości słupów, wysokości dachu oraz jego pokrycia ustalono optymalny sposób podparcia. Najbardziej efektywną konstrukcją charakteryzującą się najmniejszą masą, przemieszczeniem określonym w punktach końcowych i środkowym prętów, jak również najmniejszym wyężeniem prętów, okazała się być konstrukcja dachu o kształcie paraboloidy hiperbolicznej. Co potwierdziło przypuszczenie, że mechaniczne właściwości powierzchni bazowej zastosowanej do kształtowania konstrukcji prętowej mają wpływ na właściwości ukształtowanej konstrukcji, gdyż powierzchnia siodłowa, jaką stanowi paraboloida hiperboliczna jest powierzchnią o właściwościach zbliżonych do właściwości powierzchni minimalnych.

Warto zauważyć, iż zastosowana na paraboloidzie hiperbolicznej czworokątna siatka prętów jest siatką, w której utworzone przez pręty czworoboki są płaskie. Wynika to z faktu, że w przypadku paraboloidy hiperbolicznej, która jest powierzchnią translacyjną, zawsze dwa boki wspomnianych czworoboków w powstałej w wyniku podziału powierzchni siatce są do siebie równoległe. To daje możliwość zastosowania płaskich paneli dachowych, co jest bardzo korzystne ze względu na możliwość redukcji kosztów produkcji. Pozostałe powierzchnie cylindroidalne i konoidalne nie posiadają takiej właściwości, więc są mniej efektywne z ekonomicznego punktu widzenia.

Podobnie jak w przypadku konstrukcji o kształcie paraboloidy hiperbolicznej, określonej przez dwie proste skośne, dokonano porównania efektywności konstrukcji przy zastosowaniu pojedynczych słupów i pęków słupów. W tym przypadku również konstrukcja wsparta za pomocą pęków słupów okazała się znacznie lżejsza.

#### *Kształtowanie krzywoliniowych stalowych konstrukcji prętowych na bazie powierzchni minimalnych*

Ze względu na szczególne właściwości powierzchni minimalnych oraz możliwości wspomagania komputerowego przy ich wyznaczaniu, obserwuje się wzrost badań nad wykorzystaniem tych powierzchni w realizacji innowacyjnych obiektów architektonicznych. Jednak projektowanie inżynierskie struktur o kształcie powierzchni minimalnych ma głównie zastosowanie przy konstruowaniu lekkich membranowych konstrukcji dachowych.

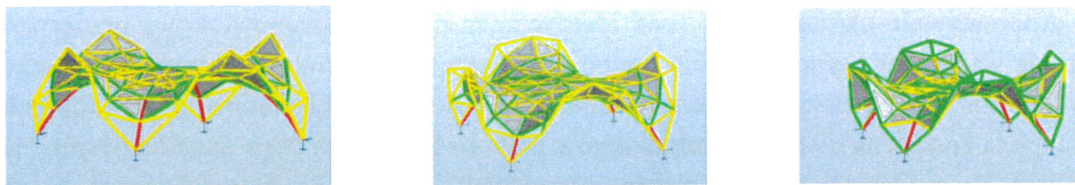
Powierzchnia minimalna jest powierzchnią o najmniejszej możliwej powierzchni spośród wszystkich powierzchni rozciągniętych na danych liniach. Jest to istotne z architektonicznego i ekonomicznego punktu widzenia, ponieważ zastosowanie minimalnych powierzchni oznacza wykorzystanie minimalnej powierzchni okładzin, co za tym idzie minimalizację kosztów. Ponadto zastosowanie minimalnych powierzchni przynosi wymierne korzyści w kształtowaniu konstrukcji, ponieważ minimalne powierzchnie wykazują optymalny układ sił i naprężeń. Ten aspekt uzasadniał celowość wyboru minimalnych powierzchni jako powierzchni bazowych do kształtowania krzywoliniowych, stalowych konstrukcji prętowych. Natomiast badania miały na celu sprawdzenie, jak właściwości mechaniczne powierzchni bazowych wpływają na właściwości konstrukcji prętowych ukształtowanych na ich podstawie.

Analizie poddano konstrukcje ukształtowane zarówno na bazie znanych i zdefiniowanych powierzchni minimalnych jak powierzchnie Ennepera, jak również na bazie swobodnych form minimalnych uzyskanych w drodze optymalizacji. Powierzchnia Ennepera jako forma do realizacji przekryć budowlanych ma małe zastosowanie w budownictwie. Jednak jest to powierzchnia o ciekawym kształcie, który może przybierać różne formy w zależności od doboru parametrów ją definiujących. Dlatego przedmiotem dalszej analizy były krzywoliniowe stalowe konstrukcje prętowe uformowane na bazie powierzchni Ennepera przekrywające okrągły plac. Proces kształtowania rozpoczęto od utworzenia algorytmów opisującego siatki prętów, których wierzchołki umieszczone są na powierzchni Ennepera dostosowanej poprzez parametry powierzchni tak, aby jej rzut poziomy był kołem. Ponadto zmienne definiujące powierzchnię dobrano w taki sposób, aby uzyskać trzy różne formy powierzchni będące bazą do utworzenia trzech różnych krzywoliniowych form prętowych z trzema, czterema lub pięcioma punktami podparcia.

Z uwagi na to, że topologia przyjętej siatki prętów wpływa na nośność konstrukcji zastosowano siatki trójkątne, które łatwiej można dostosować do kształtu rozważanej powierzchni oraz, które charakteryzują się większą sztywnością niż siatki czworoboczne. Na wstępie poddano analizie krzywoliniowe, stalowe konstrukcje prętowe o trzech różnych wzorach siatek trójkątnych i dwóch różnych wysokościach konstrukcyjnych równych 2m i 4.5m, jak również trzech różnych sposobach podparcia. Dla każdej konstrukcji założono identyczny podział siatek wzdłuż promienia i obwodu przekrywanego placu, a jako elementy konstrukcyjne zastosowano rury okrągłe o wstępnie przyjętych jednakowych przekrojach dla wszystkich prętów. Za pomocą nakładki Karamba 3D przeprowadzono analizę zachowania się konstrukcji obciążonych ciężarem własnym oraz panelami szklanymi. Badania wykazały, że w przypadku konstrukcji o wysokości równej 2.0 m wzrost masy konstrukcji powodował wzrost ugięć elementów, natomiast w przypadku konstrukcji o wys. 4.5 m takiej regularności nie zaobserwowano. Niezależnie od przyjętej topologii siatki prętów konstrukcje podparte w czterech miejscach charakteryzują się najmniejszymi odkształceniami. Dlatego te konstrukcje poddano dalszej analizie przyjmując wzór siatki, który zapewniał najmniejszą masę konstrukcji. Natomiast w celu uzyskania efektywnej prętowej konstrukcji dachowej zastosowano dodatkowe dalsze modyfikacje polegające na:

- ujednoczeniu długości prętów konstrukcji poprzez podział powierzchni bazowej na parzystą liczbę części wzdłuż obwodu,
- usunięciu części prętów w górnej części konstrukcji w celu zunifikowania rozmiaru paneli, zapewnienia większego dostępu światła i zmniejszenia masy konstrukcji,
- podniesieniu górnej części konstrukcji, w celu zapewnienia 5% spadku w celu łatwiejszego odprowadzania wód opadowych,
- usunięciu najwyższych, zewnętrznych elementów konstrukcji, pełniących głównie dekoracyjną rolę oraz nieznacznej modyfikacji konstrukcji w celu zminimalizowania przeszkód spowodowanych obciążeniem śniegiem.

Z kilku możliwych wariantów rozwiązań wybrano trzy konstrukcje, Rys 5, które zoptymalizowano, przyjmując jako kryterium optymalizacji najmniejszą masę konstrukcji, co wiązało się również z najmniejszą liczbą zastosowanych prętów i węzłów.

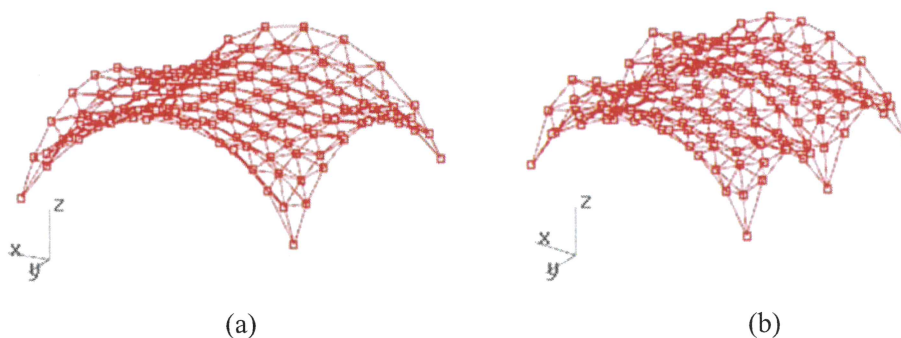


Rys. 5. Analizowane konstrukcje prętowe z czterema punktami podparcia

Opracowane algorytmy do kształtowania krzywoliniowych stalowych konstrukcji prętowych na bazie powierzchni Ennepera po pewnych modyfikacjach parametrów opisujących model konstrukcyjny pozwalają na uzyskanie oraz analizę konstrukcji o wielu różnych ciekawych formach, które mogą stanowić propozycje różnego rodzaju przekryć budowlanych.

Odmianą grupę kształtowanych i analizowanych w monografii konstrukcji stanowiły krzywoliniowe stalowe konstrukcje prętowe ukształtowane na bazie powierzchni minimalnych będącymi powierzchniami swobodnymi. Powierzchnie bazowe kształtowano jako powierzchnie minimalne rozpięte na czterech łukach. Kształt łuków dostosowywano do wymagań projektowych i przyjętych warunków brzegowych lub wynikał on z przeprowadzonego procesu genetycznej optymalizacji powierzchni bazowej.

Ukształtowano kilka efektywnych i reprezentatywnych, krzywoliniowych stalowych konstrukcji prętowych na bazie swobodnych powierzchni minimalnych, których kształt i pole powierzchni uzyskano w wyniku ewolucyjnej optymalizacji. Jedną z konstrukcji stanowiła konstrukcja przekrycia nad kwadratowym placem o wymiarach 24m x 24m. Powierzchnię bazową do formowania powyższej konstrukcji wstępnie ukształtowano jako powierzchnię minimalną rozpiętą na czterech łukach okręgów, a następnie dwa z przeciwległych łuków obniżono tak, że pole uzyskanej nowej powierzchni minimalnej rozpiętej na dwóch łukach okręgów i dwóch łukach elips zostało zminimalizowane, a kształt powierzchni bardziej dostosowany do możliwości odprowadzenia wód opadowych z dachu. Powyższą powierzchnię uformowano w drodze ewolucyjnej optymalizacji przyjmując jako kryterium optymalizacji minimalne pole powierzchni nowo powstałej optymalnej formy. Utworzona forma powierzchniowa stanowiła bazę wyjściową do kształtowania jednopowłokowego przekrycia strukturalnego dwuwarstwowego podpartego w narożach placu, Rys. 6a.



Rys. 6. Przekrycie strukturalne ukształtowane na bazie powierzchni minimalnej: a) jednopowłokowe, b) dwupowłokowe

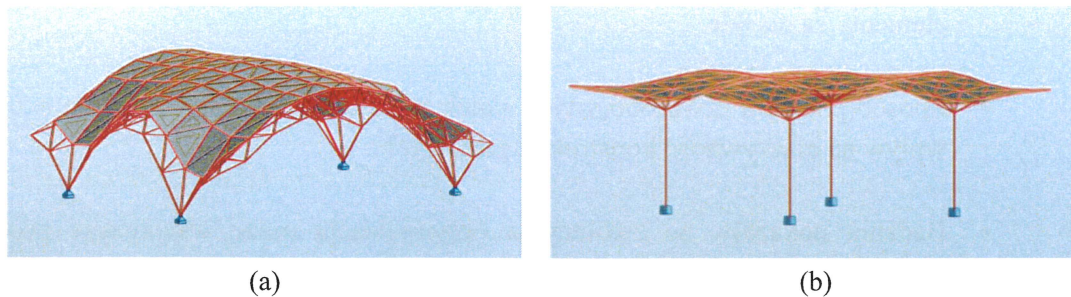
Alternatywnie ukształtowano (nad identycznym placem) dwupowłokowe przekrycie strukturalne wsparte za pomocą sześciu podpór. Powierzchnię bazową do kształtowania tego przekrycia stanowiła powierzchnia będąca sumą dwóch powierzchni minimalnych, z których każda rozpięta została na dwóch łukach okręgów oraz dwóch łukach elips o zredukowanej do połowy średnicy w porównaniu do uzyskanej wcześniej konstrukcji jednopowłokowej, Rys.6 b. Obydwie ukształtowane konstrukcje są efektywnymi konstrukcjami, przenoszącymi obciążenia głównie przez siły osiowe w prętach, natomiast analiza porównawcza ukształtowanych przekryć strukturalnych wykazała większą efektywność przekrycia jednopowłokowego.

Następną kwestią analizowaną w monografii jest możliwość optymalnego kształtowania krzywoliniowych, stalowych konstrukcji prętowych będących konstrukcjami zadaszeń o formach swobodnych, przyległych do istniejących budynków.

W tym przypadku kształt powierzchni bazowej będącej minimalną powierzchnią nie jest z góry określony, chociaż wynika z warunków brzegowych określonych przez funkcję kształtowanego obiektu. Swoboda kształtowania w tym przypadku polega na zadaniu nie tylko warunków brzegowych do kształtowania, ale również dopuszczalnych przedziałów ich zmienności związanych między innymi z kształtem krzywych definiujących powierzchnię bazową, z wysokością przekrycia, sposobem oraz umiejscowieniem podparcia czy zamocowania zadaszenia do przyległych budynków. Formę powierzchni bazowej uzyskuje się w drodze ewolucyjnej optymalizacji, jako powierzchnię minimalną o najmniejszym polu powierzchni, spośród wszystkich możliwych powierzchni wygenerowanych dla warunków brzegowych przyjętych z dopuszczalnych przedziałów. Zastosowanie siatki prętów na powierzchni o najmniejszym polu powierzchni daje możliwość uzyskania minimalnej masy konstrukcji. Analizę przeprowadzono przy zastosowaniu przekryć strukturalnych jedno oraz dwuwarstwowych oraz porównano ich efektywność.

Kolejnym zagadnieniem przedstawionym w monografii jest analiza efektywności krzywoliniowych stalowych konstrukcji prętowych utworzonych za pomocą metody zwanej „form-finding”. W wyniku tej metody znajduje się struktury funikularne, których forma jest dostosowana do wielkości i pozycji obciążeń na nią działających. Geometrię równowagi dla analizowanych konstrukcji prętowych, przedstawionych w monografii określa się w interaktywnej analizie konstrukcyjnej, którą stanowi proces dynamicznej relaksacji. Przeanalizowano trzy reprezentatywne konstrukcje przekrywające kwadratowy plac, powstałe w wyniku symulacji polegającej na przekształceniu płaskich siatek prętów lub przestrzennych struktur prętowych z poziomymi górnymi i dolnymi warstwami prętów w formy krzywoliniowe. W celu przeprowadzenia symulacji założono, że masa konstrukcji jest skupiona w węzłach i określono sztywność poszczególnych węzłów. Ponadto założono, że poszczególne konstrukcje są obciążone ciężarem własnym przy ustalonym przeciwnym zwrocie siły grawitacji. Forma każdej z konstrukcji została wygenerowana w procesie iteracyjnym przy założeniu jednakowej liczby iteracji, po których geometria każdej formy była aktualizowana. Zaproponowano dwa rozwiązania konstrukcyjne do przekrycia danego placu, dwuwarstwową konstrukcję kratową podpartą przez pęki słupów, oraz jednowarstwową konstrukcję kratową podpartą słupami pojedynczymi Rys.7.





Rys. 7. Przekrycie strukturalne ukształtowane za pomocą metody „form-finding”: a) podparte przez pęk słupów, b) podparte przez słupy pojedyncze

Konstrukcje zostały zoptymalizowane przy założeniu najmniej korzystnej kombinacji obciążeń a następnie dokonano analizy porównawczej powyższych rozwiązań konstrukcyjnych zarówno pod względem fizycznym jak i mechanicznym. Mimo różnic w masie, jak również stopniu złożoności węzłów konstrukcyjnych obydwie konstrukcje okazały się być efektywne pod względem sposobu przenoszenia obciążeń.

Przeprowadzone badania zaprezentowane w monografii pozwoliły na sformułowanie kilku istotnych wniosków końcowych.

- Przeprowadzone analizy pokazały, że chociaż tylko węzły kształtowanych konstrukcji zawarte są w powierzchni bazowej, to właściwości mechaniczne tej powierzchni wpływają na właściwości ukształtowanych konstrukcji. W konstrukcjach kształtowych na bazie powierzchni minimalnych obciążenia przenoszone są głównie przez siły osiowe, natomiast udział momentów zginających jest minimalny, więc tego rodzaju powierzchnie mogą stanowić doskonałą bazę do kształtowania krzywoliniowych, stalowych konstrukcji prętowych.
- Minimalizacja pola powierzchni bazowej w wyniku ewolucyjnej optymalizacji prowadzi do minimalizacji masy krzywoliniowej stalowej konstrukcji prętowej powstałej w oparciu o tą powierzchnię.
- Zastosowanie słupów prostopadłych do powierzchni przekrycia o kształcie paraboloidy hiperbolicznej daje znaczne korzyści w postaci redukcji masy konstrukcji w porównaniu do konstrukcji z zastosowanymi słupami pionowymi.
- Podobnie wprowadzenie pęków słupów w miejsce słupów pojedynczych może spowodować znaczną redukcję masy konstrukcji.
- Spośród powierzchni Catalana paraboloida hiperboliczna jest jedyną powierzchnią, która daje możliwość formowania efektywnych konstrukcji

prętowych będących siatkami czworobocznymi, których czworoboczne elementy są płaskie.

- Sposób podziału czworobocznych siatek prętów na siatki trójkątne ma istotny wpływ na efektywność konstrukcji prętowych.
- Badania pokazały, że ewolucyjna optymalizacja może wspomagać proces kształtowania krzywoliniowych, stalowych konstrukcji prętowych będąc skutecznym narzędziem do poszukiwania racjonalnych form konstrukcyjnych ze względu na prostotę konstrukcji, aspekty mechaniczne i technologiczne, jak również efektywne wykorzystanie materiału, oraz możliwe oszczędności.

### **Możliwość wykorzystania badań w praktyce**

Prezentowane w monografii podejście do kształtowania krzywoliniowych, stalowych konstrukcji prętowych wiat i zadaszeń, w którym zarówno model geometryczny, jak również analiza konstrukcji realizowane są przy wspomaganie algorytmicznym jest innowacyjne. Dlatego za istotne i zasadnicze osiągnięcie mojej pracy uważam nowatorskie, umiejętne wykorzystanie i połączenie możliwości najnowszych narzędzi projektowych w celu zaproponowania efektywnych rozwiązań konstrukcyjnych oraz ich analizy.

Ponadto opracowane i przedstawione w monografii autorskie przykłady krzywoliniowych stalowych konstrukcji prętowych po dalszej analizie lub modyfikacji mogą stanowić propozycje pewnych rozwiązań konstrukcyjnych. Natomiast opracowane skrypty do kształtowania krzywoliniowych stalowych konstrukcji prętowych przy zmianie parametrów opisujących model konstrukcyjny pozwalają na uzyskanie wielu różnorodnych, ciekawych form konstrukcyjnych, które mogą stanowić propozycje różnego rodzaju przekryć budowlanych. Algorytmiczny zapis modeli analizowanych konstrukcji daje możliwość łatwych zmian oraz optymalizacji w celu dostosowania konstrukcji do założonych warunków wstępnych. Opracowane procedury kształtowania krzywoliniowych, stalowych konstrukcji prętowych mogą być dalej kreatywnie rozwijane w zależności od potrzeb. Natomiast uzyskane wyniki przeprowadzonych analiz i optymalizacji, zamieszczone w monografii mogą stanowić pewne wskazówki w projektowaniu podobnych krzywoliniowych, stalowych konstrukcji prętowych.

Przedstawione w monografii nowe podejście do kształtowania konstrukcji wykorzystujące genetyczną optymalizację konstrukcji tak, aby nie blokując procesu twórczego uzyskać efektywne formy konstrukcyjne spełniające zarówno wymagania architektoniczne jak i wytrzymałościowe, dzięki swym zaletom może zasługiwać na uwagę i zastosowanie w działalności projektowej w celu jej usprawnienia.

Niemniej jednak, oprócz możliwych zastosowań praktycznych, istnieje również potrzeba kontynuacji zapoczątkowanych badań. Podjęte w monografii rozważania dotyczące optymalizacji konstrukcji przy przyjętym kryterium minimalizacji jej masy, zresztą bardzo istotnym ze względu na koszt konstrukcji, powinny zostać poszerzone o zagadnienia analizy i optymalizacji sposobu połączeń prętów. Poza tym rozważane w monografii zagadnienia dotyczące ujednoczenia długości prętów kształtowanych konstrukcji wymagają szerszej

analizy. Natomiast, przeprowadzone badania i uzyskane rezultaty nakreśliły wiele możliwości i kierunków ich kontynuacji zarówno w celu racjonalizacji procesu kształtowania, jak również zoptymalizowania i ulepszenia kształtowanych konstrukcji.

## **5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo badawczych**

Moje zainteresowania naukowo badawcze przebiegają dwutorowo i są sprecyzowane w poniższych punktach. Obejmują kształtowanie konstrukcji przy wspomaganiu algorytmicznym, jak również kontynuację zagadnień dotyczących inżynierskich odwzorowań panoramicznych podjętych w mojej pracy doktorskiej.

### **a) Współzależność formy architektonicznej i układu konstrukcyjnego jako cel efektywnego kształtowania w twórczym i dynamicznym procesie**

Opisane w monografii zagadnienie kształtowania krzywoliniowych, stalowych konstrukcji prętowych na bazie paraboloidy hiperbolicznej rozszerzam kształtując konstrukcje dachów wielopowłokowych złożonych z elementów powtarzalnych. Analizę porównawczą dachowych konstrukcji prętowych złożonych z czterech modułów kratowych przedstawiłam w publikacji [IIE11]. Zaprezentowane wyniki badań dotyczą porównania efektywności konstrukcji w zależności od przyjętego wzoru siatki prętów, jak również sposobu ułożenia modułów kratowych w konstrukcji.

Powyższa tematyka została dalej rozszerzona na czteremodułowe, powłokowe, cienkościenne konstrukcje dachowe zaprojektowane z betonu zbrojonego i uformowane nie tylko z modułów będącymi wycinkami paraboloidy hiperbolicznej, ale również cylindroidy i kołoidy [IIA2].

Ponadto, zagadnienia dotyczące algorytmicznego kształtowania konstrukcji przedstawione w monografii porozszerzam starając się uwzględnić na etapie kształtowania jak najwięcej aspektów środowiskowych, wpływających na powstanie efektywnej konstrukcji. Z jednej strony istotna jest minimalizacja masy konstrukcji, co ma istotny wpływ na środowisko, z drugiej strony uwarunkowania środowiskowe mogą stać się istotnym czynnikiem w poszukiwaniu optymalnej, efektywnej formy konstrukcji. Rezultaty badań analizujących takie zagadnienia zostały zawarte w jednej z najnowszych moich publikacji [IIE1], gdzie pokazany jest sposób kształtowania zadaszona w procesie optymalizacyjnym. Natomiast na ostateczny wybór kształtu dachu wpływa dodatkowo analiza cienia rzuconego przez kształtowany dach i zespół przyległych budynków w przyjętym okresie obliczeniowym. W tym celu oprócz nakładki Karamba 3D zastosowanej do analizy konstrukcji wykorzystuję dodatkowo inne narzędzia pracujące w środowisku Rhinoceros 3D/Grasshopper, takie jak Ladybug i Honeybee.

### **b) Analiza sposobu konstrukcji i rekonstrukcji zapisu perspektywicznych odwzorowań szerokokątnych na powierzchniach rozwijalnych**

Perspektywiczne odwzorowania szerokokątne, w tym odwzorowania panoramiczne uznaje się za jedną z pierwszych form przedstawień oraz komunikacji graficznej. Obecnie, w związku z olbrzymim rozwojem cyfrowej techniki panoramicznej tj. rozpowszechnieniem prostych

programów do tworzenia panoram, czy wysokiej jakości skanerów panoramicznych, następuje duży rozwój różnych metod odwzorowań panoramicznych. Jednocześnie powraca się również do tworzenia panoram w tradycyjny sposób.

### **Działalność naukowa przed doktoratem**

Przed doktoratem moja działalność naukowa, jako asystenta w Zakładzie Geometrii i Grafiki Inżynierskiej dotyczyła zagadnień geometrii inżynierskiej, związanych ze sposobem konstrukcji i zapisu perspektywicznych odwzorowań szerokokątnych (panoram) na powierzchniach rozwijalnych.

Każda panorama klasyczna, jak również powstała przy użyciu nowoczesnych technik musi być podporządkowana zasadom geometrycznym, istotnym i charakterystycznym dla tego rodzaju przedstawień. Analiza tych zasad, jak również zastosowanie wspomaganie komputerowego do bezpośredniego zapisu panoram były głównym tematem moich zainteresowań badawczych. Rezultatem mojej pracy w tym zakresie jest opracowanie bezpośredniej, geometrycznej metody konstrukcji panoramy cylindrycznej oraz stożkowej na rozwiniętym tle. W powyższej metodzie panoramę można tworzyć w dwojaki sposób; jako jednostanowiskową perspektywę nieliniarną lub jako wielostanowiskową perspektywę nieliniarną. Zastosowanie rzutowania środkowego ze środków rozproszonych w przypadku panoramy wielostanowiskowej pozwoliło na uzyskanie obrazów panoramicznych bardzo bliskich obrazom odbieranym przez obserwatora panoramy. Natomiast, wyprowadzenie geometrycznych zależności rzutowych między obrazami figur uzyskanymi na nierozwiniętym tle panoramy, a obrazami uzyskanymi na rozwiniętym tle, pozwoliły na wyprowadzenie analitycznych algorytmów i zastosowanie ich przy komputerowym wspomaganie zapisu panoram. Prawidłowość działania algorytmów przetestowano w programie Mathcad, natomiast efektywnie użyto ich do konstrukcji panoram w programie AutoCAD. Jednak mogą one również być zastosowane w dowolnym programie graficznym. Rezultaty powyższych badań zostały przedstawione w publikacjach, wystąpieniach konferencyjnych oraz w mojej dysertacji doktorskiej.

### **Działalność naukowa po doktoracie**

Podjęta w dysertacji tematyka badań była przeze mnie kontynuowana i przedstawiana w licznych publikacjach [IIE4, IIE5]. Rezultatem mojej pracy w tym zakresie jest rozszerzenie opracowanej wcześniej przeze mnie metody bezpośredniej konstrukcji panoramy cylindrycznej i stożkowej oraz wykorzystanie tej metody do bezpośredniej konstrukcji tzw. panoramy odwrotnej. Geometryczne zależności rzutowe między obrazami figur uzyskanymi na nierozwiniętym tle panoramy, a obrazami uzyskanymi na rozwiniętym tle, pozwoliły na wyprowadzenie analitycznych algorytmów i zastosowanie ich przy komputerowym wspomaganie zapisu panoramy odwrotnej, zarówno na cylindrycznym jak i stożkowym tle [IIA1]. Podobnie jak w przypadku klasycznej panoramy cylindrycznej, udało się opracować bezpośrednią i efektywną metodę kreślenia przy użyciu komputera panoramy odwrotnej na rozwiniętym tle cylindrycznym i stożkowym, zarówno przy zastosowaniu stałego jak i zmiennego punktu obserwacji. Pozwoliło to na powiększenie zakresu możliwości



zastosowania opracowanej metody w różnych przedstawieniach dokumentacyjnych, gdy obiekty przedstawiane są na cylindrycznie lub stożkowo zakrzywionych powierzchniach. Rezultaty powyższych badań zostały przedstawione w licznych wystąpieniach konferencyjnych i publikacjach wyszczególnionych w [IIE9, IIE12, IIE13, IIE 19, IIE20] .

Opracowana metoda bezpośredniej konstrukcji panoram po pewnych modyfikacjach pozwala na zapis obrazów perspektywicznych na rozwiniętych tłach wielościennych zarówno graniastosłupowych, jak również ostrosłupowych [IIE6]. Z kolei aproksymacja cylindrycznego tła panoramy za pomocą tła wielościennego pozwoliła na opracowanie metody konstrukcji cienia rzuconego obiektów budowlanych przedstawionych na obrazie panoramicznym oraz ich zapis przy wspomaganii komputerowym [IA3].

Opracowane analityczne algorytmy do konstrukcji panoramy, po pewnych przekształceniach zastosowano do rekonstrukcji 3D obiektów przedstawionych na obrazie panoramicznym, jak również do odtworzenia 2D pewnych brakujących elementów panoramy, co może mieć zastosowanie przy renowacji tradycyjnych obrazów panoramicznych [IIE10, IIE15].

Natomiast, po pewnych uproszczeniach opracowana metoda rekonstrukcji może być zastosowana przy rekonstrukcji obiektów budowlanych przedstawionych za pomocą perspektywy na płaskim tle [II8]. W związku z tym może znaleźć zastosowanie przy odtwarzaniu historycznych obiektów na podstawie fotografii. Rezultaty takich badań przedstawiono w publikacjach [IIE5, IIE7]. Opracowana metoda może być szczególnie pomocna w przypadku, gdy odtwarzany obiekt nie istnieje a fotografia jest jedynym źródłem informacji o obiekcie.

### **c) Zestawienie ilościowe i punktowe osiągnięć naukowo-badawczych**

Mój dorobek publikacyjny obejmuje **43** publikacje, w tym **36** po osiągnięciu stopnia doktora.

Wszystkie publikacje po osiągnięciu przeze mnie stopnia doktora zostały wydane w języku angielskim i obejmują:

- **1** monografię naukową,
- **3** publikacje z listy A MNiSW znajdujące się w bazie Journal Citation Reports (JCR),
- **12** publikacji znajdujących się w bazie Web of Science, (dodatkowo 1 publikacja zaakceptowana do druku),
- **10** publikacji z listy B MNiSW, (dodatkowo jedna publikacja zaakceptowana do druku),
- **11** publikacji znajdujących się w materiałach konferencyjnych.

Sumaryczny impact factor zgodnie z rokiem 2017 moich wszystkich publikacji wynosi **3,637**.

- Liczba cytowań publikacji według bazy **Web of Science (WoS): 27**.
- Liczba cytowań publikacji według bazy **Scopus : 33**.
- Indeks Hirscha według bazy **Web of Science (WoS): 3**.

- Indeks Hirscha według bazy **Scopus: 3.**

Szczegółowy wykaz moich osiągnięć naukowo - badawczych został zamieszczony w Załączniku nr 5, natomiast w poniższej tabeli przedstawiono zestawienie ilościowe i punktowe mojego dorobku naukowego po doktoracie.

Dla artykułów, które zostały opublikowane w roku 2019 zastosowano obowiązującą punktację z roku 2018.

Rodzaj publikacji	Liczba publikacji		Razem	Ilość punktów wg MNiSW	Ilość punktów wg MNiSW (po podziale na współautorów)
	Samodzielnych	Współautorskich			
Monografia naukowa	1	-	1	25	25
Artykuły z bazy JCR	2	1	3	85	76
Pozostałe artykuły	19	2	21	207	197
Materiały konferencyjne	6	5	11	9	5.83
<b>Ogółem</b>	<b>28</b>	<b>8</b>	<b>36</b>	<b>326</b>	<b>303.83</b>

Ponadto po uzyskaniu stopnia doktora rezultaty moich badań prezentowałam na 23 konferencjach, w tym 22 międzynarodowych.

#### **d) Udział w komitetach organizacyjnych międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych**

Uczestniczyłam w pracach **Międzynarodowego Komitetu Programowego** poniższych konferencji [IIC] :

1. The 2018 International Conference on Construction, Aviation and Environmental Engineering, ICCAE 2018, Vanung University, Taoyuan City, Taiwan, 23-25. 11. 2018
2. International Conference on Engineering Graphics BALTGRAF-14, Tallin University of Technology, Centre of Engineering Graphics, June 1-2, 2017, Tallin. Estonia

3. 12-th International Conference Engineering Graphics BALTRAF 2013, Riga Technical University and International Association BALTRAF-12, June 5-7, 2013, Riga Latvia,
4. International Conference on Engineering Graphics BALTRAF-11, Tallin University of Technology, Centre of Engineering Graphics, , June 9-10, 2011, Tallin, Estonia

#### **d) Nagrody za działalność naukową**

Moja działalność naukowo-badawcza została uhonorowana poniższymi nagrodami:

- **2018** Nagroda Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza, indywidualna III stopnia za osiągnięcia naukowe
- **2017** Nagroda Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza, indywidualna III stopnia za osiągnięcia naukowe
- **2006** Nagroda Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza, indywidualna III stopnia za uzyskanie stopnia naukowego doktora

#### **f) Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych**

Dokonuję recenzji w poniższych czasopismach [IIP]:

**Czasopisma z listy A wykazu czasopism MNiSW**

1. *Sustainability*
2. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*

Pozostałe

3. *Buildings*
4. *Mathematics*
5. *The Journal Biuletyn of Polish Society for Geometry and Engineering Graphics*

Ponadto dokonywałam recenzji artykułów zgłoszonych na międzynarodowe konferencje naukowe wyszczególnione w [IIP].

#### **6. Działalność dydaktyczna**

##### **a) Charakterystyka prowadzonych zajęć dydaktycznych**

Jestem zaliczana do minimum kadrowego kierunku **budownictwo** I i II stopnia oraz kierunku **architektura** I stopnia prowadzonego na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej.

Prowadzę zajęcia dla studentów trzech kierunków: budownictwo, architektura, inżynieria środowiska.

- **budownictwo** - geometria i grafika inżynierska: ćwiczenia, projekty, laboratoria
- **architektura** - geometria wykreślna: wykłady, ćwiczenia, projekty, laboratoria
- **inżynieria środowiska** - informatyczne podstawy projektowania: wykłady, laboratoria

Aktualnie jestem koordynatorem dwóch modułów: geometria wykreślna oraz informatyczne podstawy projektowania.

W roku akademickim 2015/2016 prowadziłam zajęcia ćwiczeniowe i projektowe w języku angielskim z przedmiotu *Geometry and engineering graphics* na kierunku budownictwo.

#### **b) Uczestnictwo w programach i projektach**

Uczestniczyłam w projektach i programach wyszczególnionych poniżej, a charakter uczestnictwa jest przedstawiony w [ IIIA].

- **2015** projekt „*Kształcenie innowacyjnych kadr GOW w Politechnice Rzeszowskiej*” (UDA-POKL. 04.03.00-00-036/12-00)
- **2011** projekt „*Zwiększenie liczby absolwentów na kierunku budownictwo, inżynieria środowiska oraz ochrona środowiska*” (UDA-POKL.04.01.02-00-055/09-00)
- **2010** projekt „*Rozszerzenie i wzmocnienie oferty edukacyjnej oraz poprawa jakości kształcenia na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska w Politechnice Rzeszowskiej*” (UDA-POKL.04.01.01-00-103/09-00)
- Jestem uczestniczką programu ERASMUS oraz ERASMUS+. W ramach tych programów wyjeżdżałam trzykrotnie za granicę do uczelni partnerskich w celu przeprowadzenia zajęć dydaktycznych [ IIIA].

Corocznie prowadzę również indywidualne zajęcia edukacyjne ze studentami programu Erasmus+ studiującymi w Politechnice Rzeszowskiej.

#### **c) Autorstwo lub współautorstwo opracowań dydaktycznych**

Jestem współautorem dwóch skryptów dla studentów kierunku architektura oraz materiałów pomocniczych dla studentów tego kierunku. Poza tym jestem współautorem materiałów pomocniczych dla studentów kierunku budownictwo i architektura opracowanych w języku angielskim [IIIA].

Brałam udział w opracowywaniu oryginalnych, elektronicznych testów służących do nauki geometrii i grafiki inżynierskiej oraz weryfikacji osiągniętych przez studentów efektów kształcenia, co opisano w publikacji [III E17].

## 7. Dorobek popularyzatorski i organizacyjny

Od wielu lat czynnie działam pracując na rzecz Uczelni w ramach powierzonych mi obowiązków i funkcji.

- W roku akademickim 2006/2007 pełniłam obowiązki Kierownika Zakładu Geometrii i Grafiki Inżynierskiej w okresie 15.02.2007- 15.08.2007 .
- Od 16.11.2011 pełnię funkcję administratora wydziałowego systemu edycji efektów kształcenia dla kierunku **budownictwo**.
- W roku 2012 brałam udział w opracowywaniu kierunkowych efektów kształcenia dla kierunku **budownictwo** zgodnie z nowymi Krajowymi Ramami Kwalifikacji.
- Od 15. 05. 2013 jako członek Komisji ds. Zapewnienia Jakości Kształcenia Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury uczestniczę w pracach Komisji.

*Dziwierzyszka*