



**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

POLITECHNIKA RZESZOWSKA IM. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA
DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH
DYSCYPLINA INŻYNIERIA LĄDOWA, GEODEZJA I TRANSPORT

ROZPRAWA DOKTORSKA

Mgr inż. Katarzyna Chrzanowska

**PARAMETRYCZNE KSZTAŁTOWANIE
NIEKONWENCJONALNYCH FORM I KONSTRUKCJI
FAŁDOWYCH BUDYNKÓW PRZEKRYTYCH
TRANSFORMOWANYMI POWŁOKOWYMI DACHAMI**

Promotor: Dr hab. inż. Jacek Abrameczyk, Prof. PRZ

Rzeszów 2025

Zakład Projektowania Architektonicznego i Grafiki Inżynierskiej



**WYDZIAŁ
BUDOWNICTWA,
INŻYNIERII ŚRODOWISKA
I ARCHITEKTURY**
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ



**SZKOŁA
DOKTORSKA**
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

*Pragnę serdecznie podziękować mojemu Promotorowi
dr hab. inż. Jackowi Abramczykowi, prof. PRZ
za daną mi szansę w spełnianiu naukowych i zawodowych marzeń,
za opiekę naukową, za cenne uwagi merytoryczne
oraz za poświęcony czas.*

*Moją pracę doktorską szczególnie pragnę zadedykować
moim Najcudowniejszym Rodzicom
Małgorzacie i Stanisławowi Chrzanowskiem,
bez których nie byłabym na tym miejscu, za cierpliwość, wyrozumiałość,
za wsparcie każdego dnia oraz za to, że zawsze przy mnie są.
Kocham Was najbardziej na świecie i jeszcze mocniej !!!*

Spis treści

1. PROLOG.....	9
2. WYKAZ PUBLIKACJI NAUKOWYCH STANOWIĄCYCH ROZPRAWĘ DOKTORSKĄ.....	13
3. WPROWADZENIE I UZASADNIENIE PODJĘCIA TEMATU.....	15
4. CEL I ZAKRES PRACY.....	23
3.1 CEL PRACY.....	23
3.2 ZAKRES PRACY.....	23
5. KSZTAŁTOWANIE NIEKONWENCJONALNYCH FORM I KONSTRUKCJI FAŁDOWYCH BUDYNKÓW-PRZEGLĄD AKTUALNEGO STANU WIEDZY.....	25
6. METODOLOGIA, WYNIKI I WNIOSKI Z BADAŃ OPISANYCH W POSZCZEGÓLNYCH PUBLIKACJACH.....	31
6.1 METODOLOGIA-SCHEMAT BLOKOWY.....	31
6.2 PUBLIKACJA 1.....	33
6.2.1 METODOLOGIA.....	33
6.2.2 WYNIKI.....	38
6.2.3 WNIOSKI.....	44
6.3 PUBLIKACJA 2.....	45
6.3.1 METODOLOGIA.....	46
6.3.2 WYNIKI.....	50
6.3.3 WNIOSKI.....	61
6.4 PUBLIKACJA 3.....	62
6.4.1 METODOLOGIA.....	62
6.4.2 WYNIKI.....	66
6.4.3 WNIOSKI.....	69
6.5 PUBLIKACJA 4.....	69
6.5.1 METODOLOGIA.....	70
6.5.2 WYNIKI.....	73

6.5.3 WNIOSKI.....	80
6.6 PUBLIKACJA 5.....	81
6.6.1 METODOLOGIA.....	82
6.6.2 WYNIKI.....	86
6.6.3 WNIOSKI.....	90
6.7 PUBLIKACJA 6.....	91
6.7.1 METODOLOGIA.....	92
6.7.2 WYNIKI.....	103
6.7.3 WNIOSKI.....	113
7. PODSUMOWANIE I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ.....	115
7.1. PODSUMOWANIE.....	115
7.2. KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ.....	117
8. WYKAZ NORM I LITERATURY (WYBRANE POZYCJE).....	119
9. SPIS RYSUNKÓW.....	127
10. SPIS TABEL.....	133
11. SPIS ZAŁĄCZNIKÓW.....	137
12. STRESZCZENIE.....	139
13. ABSTRACT.....	141

Spis ważniejszych oznaczeń i skrótów użytych w Zał. A1- Zał. A6

Parametr	Opis	
Σ	Złożona niekonwencjonalna forma budynku	
Ω	Złożona forma dachu (powłoka dachowa)	
Γ	Wielościenna sieć referencyjna	
B_v	Wielokątna sieć połączeń	
Ω_{ij}	Poszczególne gładkie powłoki dachowe Ω	
Γ_{ij}	Pojedyncze oczka siatki Γ	
B_{vij}	Pojedyncze oczko B_v	
ω_r	Referencyjna powierzchnia odniesienia	
P_b	Pozioma płaszczyzna bazowa	
W_{ABij}, W_{ADij}	Wierzchołki Γ_{ij}	
A_{ij}, B_{ij}	Wierzchołki B_{vij}	
S_{Aij}, S_{Bij}	Punkty ω_r	
u_{ij}, v_{ij}	Osie Γ_{ij}	
a_{ij}, b_{ij}	Krawędzie boczne Γ_{ij}	
dd_{SAij}, dd_{SBij}	Współczynniki podziału związane z punktami ω_r	
dd_{Aij}, dd_{Bij}	Współczynniki podziału związane z punktami B_v	
$[x,y,z]$	Ortogonalny układ współrzędnych	
P_{s1}, P_{s2}	Słupy jedno gałęziowe	
P_g, P_d, P_k	Odpowiednio pas górny, pas dolny i krzyżulce	
K_{b0}	Rama początkowa prostokątna zoptymalizowana do K_b	
K_g, K_{ce}, K_{ci}	Ramy pochodne (od ram podstawowych) trapezowe	
q	Obciążenie rozłożone wzdłuż długości górnego pasa dźwigara	[kN/m ²]
D_p	Średnica rury	[mm]
d_p	Grubość ścianki rury	[mm]
h	Różnica między długością dwóch słupów	[m]
d	Przemieszczenie fundamentu słupa	[m]
n_g	Nachylenie dźwigara	
n_c	Nachylenie słupa	
σ_c	Naprężenia ściskające	[MPa]

σ_t	Naprężenia rozciągające	[MPa]
σ_r	Dziesięciokrotne naprężenie σ	[MPa]
φ_{cr}	Współczynnik obciążenia krytycznego	
Δx_{max}	Maksymalne przemieszczenie w kierunku osi x	[mm]
Δz_{max}	Maksymalne ugięcie w kierunku osi z	[mm]
S_{mod} (lub W_{sk})	Wskaźnik wytrzymałości poprzecznego przekroju (lub [mm ³])	[cm ³]
f_y	Granica plastyczności stali	[MPa]
E	Moduł sprężystości	[MPa]
G	Moduł odkształcalności postaciowej Kirchoffa	[MPa]
ρ	Ciężar stali	[kg/m ³]

1. PROLOG

Przedłożona rozprawa doktorska dotyczy zagadnień związanych z geometrycznym i statyczno-wytrzymałościowym kształtowaniem ramowych konstrukcji podpierających niekonwencjonalne przekrycia powłokowe wykonane z cienkościennych transformowanych blach fałdowych.

Zagadnienia związane z kształtowaniem samych powłokowych przekryć dachowych wykonanych ze sprężyste transformowanych płaskich trapezowych arkuszy omówił Promotor dr hab. inż. Jacek Abramczyk w swojej monografii habilitacyjnej [1]. Z rozwiązanych przez niego zagadnień zaczerpnęłam wybrane modele, algorytmy i metody, które przyjąłam jako dane wyjściowe w opracowanych przeze mnie zagadnieniach. Są to przede wszystkim:

- 1) specyfika geometrycznego modelowania transformowanych arkuszy fałdowych – zachowująca prostoliniowość podłużnych oraz zdeformowanych fałd
- 2) sposób modelowania obciążenia elementów konstrukcyjnych w postaci obciążenia równomiernie rozłożonego na długości pasów górnych dźwigarów kratowych lub słupów
- 3) specyfika narzucania geometrycznych ograniczeń kształtowanym konstrukcjom, wynikająca z dwuwymiarowego charakteru arkuszy i ujemnej krzywizny Gaussa powłok fałdowych uzyskiwanych w wyniku transformacji postaciowej płaskich arkuszy fałdowanych jednokierunkowo oraz z właściwości referencyjnych czworościanów i sieci. W analizowanych przeze mnie zagadnieniach wybrałam jedną z dwóch podstawowych metod opracowanych przez Promotora, to jest metodę składania sieci z pojedynczych czworokątów i czworościanów. Zbudowałam między innymi sieci i wielościany pochodne względem wielościanów podstawowych opracowanych przez Promotora.

W Publikacji 1 [Załącznik A1] prezentuję wyżej wymienione sposoby geometrycznego kształtowania zróżnicowanych form budynków za pomocą pojedynczych czworościanów składanych w sieci referencyjne wykorzystywane w opracowanych przeze mnie przykładowych nowatorskich ciągłych strukturach wielościennych. Cechą charakterystyczną tych struktur jest to, że uzyskiwana jest ujemna krzywizna Gaussa złożonej powłoki dachowej kształtowanego budynku. Dokonałam parametryzacji

geometrycznej struktur analizowanego typu. Wykorzystałam opracowaną parametryzację do zbudowania nowatorskich przykładowych struktur podając również zbiory konkretnych dyskretnych wartości przyjętych parametrów, definiujące pojedyncze dyskretne modele budynków.

W Publikacji 2 [*Załącznik A4*] rozszerzyłam opracowaną metodę kształtowania na nieciągłe parametryczne struktury modelujące złożone formy budynków. Podałam przykłady wyznaczania zróżnicowanych dyskretnych reprezentantów nieciągłych struktur, jako sum wycinków powłok o ujemnej krzywiznie Gaussa. Pierwszą zasadniczą pożądaną cechą kształtowanych struktur geometrycznych jest to, że pozwalają wyróżniać współliniowe i współpłaszczyznowe odcinki i wielokąty, które w dalszej kolejności służą, jako osie podłużne i płaszczyzny kształtowanych prętów i elementów konstrukcyjnych, ewentualnie również całych ram. Drugą zasadniczą i celowo kształtowaną cechą struktur jest to, że odcinki brzegowe każdej pojedynczej powłoki struktury są zawarte w prostych wzajemnie skośnych, co determinuje transformacje postaciowe przyszłych przekryć dachowych.

Żeby takie transformacje można było uzyskać w stosunkowo prosty sposób, kierownice dachowe przyjął w postaci prętów pasów górnych dźwigarów dachowych w taki sposób, że:

- 1) kolejne ramy są prętowymi płaskimi, nośnymi układami poprzecznymi
- 2) pasy górne dźwigarów kolejnych układów poprzecznych są różnie pochylone do poziomu, a więc wzajemnie skośne

W celu uzyskania poprzecznych nośnych układów ramowych wyżej wymienionego typu rozwiązałam zagadnienia zaprezentowane w Publikacji 3 [*Załącznik A2*]. Przeprowadzone analizy pozwoliły na opracowanie algorytmu kształtowania układów powyższego typu przeznaczonych dla wiat, charakteryzujących się zoptymalizowaną pracą statyczno-wytrzymałościową. Analogiczne zagadnienia analizowałam w Publikacjach 4 i 5 (dotyczących wiat). W przypadku Publikacji 4 [*Załącznik A3*] układy poprzeczne posiadały pochylone słupy. Natomiast w Publikacji 5 [*Załącznik A5*] analizowałam analogiczne układy posiadające pochylone zarówno słupy, jak i dźwigary. W obu publikacjach przeprowadziłam procesy optymalizacji pracy rozpatrywanych ram.

W Publikacji 6 [Załącznik A6] przeanalizowałam pracę płaskiego ramowego nośnego układu poprzecznego budynku, a więc obiektu posiadającego wewnątrz całkowicie oddzielone od wpływów zewnętrznych, gdzie model obciążenia obejmuje obciążenie równomiernie rozłożone wywierane na obudowę podpieraną zarówno przez dźwigary dachowe jak i słupy ścienna. Założyłam więc, że obudowa ścienna i dachowa jest wykonana z fałdowych cienkościennych arkuszy. Dodatkowo dokonałam parametryzacji rozpatrywanych ram układów poprzecznych ze względu na sztywność węzłów podporowych słupów tych ram.

W rozprawie doktorskiej przedstawiam relatywnie szerokie interdyscyplinarne pole mojej działalności naukowej, obejmujące zagadnienia związane z:

- 1) parametrycznym kształtowaniem geometrycznym form i konstrukcji wiat oraz budynków,
- 2) parametryzacją statyczno-wytrzymałościową kształtowanych płaskich prętowych poprzecznych układów nośnych,
- 3) wspomaganie komputerowym w zakresie modelowania, testowania, optymalizacji oraz pracy mechanicznej ram, jak również optymalizacji opisu parametrycznego wyżej wymienionej pracy.

Omówione skrótowo powyżej, rezultaty uzyskane w mojej pracy naukowej prowadzonej w ramach studiów doktoranckich skłoniły mnie do wystąpienia do Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Rzeszowskiej z wnioskiem o wszczęcie postępowania w sprawie nadania stopnia naukowego doktora w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, w dziedzinie Nauk Inżynieryjno-Technicznych. Poniżej, szczegółowo przedstawiłam publikacje stanowiące niniejszą rozprawę doktorską oraz wskaźniki bibliometryczne, które są mierzalnym opisem mojej dotychczasowej 4-letniej działalności badawczej.

2. WYKAZ PUBLIKACJI NAUKOWYCH STANOWIĄCYCH ROZPRAWĘ DOKTORSKĄ

Wyniki przeprowadzonych badań, które stanowią podstawę tej rozprawy doktorskiej zostały opublikowane w czasopismach przynależących do dziedzin nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport. Wartość całkowita liczby punktów ministerialnych (MEiN), obowiązujących w dniu wydania publikacji to 545. Według danych zgromadzonych przez bazę danych Web of Science indeks Hirscha (h-index) aktualnie wynosi 2, indeks Egghe'a (g-index) wynosi 2. Wskaźnik Impact Factor (IF) wyliczony według roku publikacji każdego artykułu wynosi 10.2. Poniżej zestawiam publikacje, które stanowią moją rozprawę doktorską. Przedstawione są według kolejności wydania.

Tabela 1. Zestawienie publikacji naukowych stanowiących rozprawę doktorską

Lp	Autorzy	Tytuł publikacji	Czasopismo, Wydawnictwo	Liczba punktów wg MEiN	Impact Factor
1	Jacek Abramczyk, Katarzyna Chrzanowska	Complex Building Forms Roofed with Transformed Shell Units and Defined by Saddle Surfaces	<i>Materials, MDPI</i>	140	3.4
2	Jacek Abramczyk, Katarzyna Chrzanowska	An Influence of Roof Lattice Girder Inclination on the Work of Structural Systems Supporting Shed Roof Sheeting	<i>Proceedings of CEE - Springer 2023, International Conference Current Issues of Civil Engineering Lviv-Košice-Rzeszów</i>	20	-
3	Jacek Abramczyk, Katarzyna Chrzanowska, Wiesław Bielak	Impact of Inclination of Girders and Columns on the Effort and Stability of Flat Bar Frames	<i>Materials, MDPI</i>	140	3.4
4	Katarzyna Chrzanowska, Jacek Abramczyk	Unconventional building forms roofed with innovative structures arranged on regular surfaces with the negative Gaussian curvature	<i>Budownictwo i Architektura</i>	100	-

5	Katarzyna Chrzanowska	An influence of column inclination on the work of plane bar structural systems supporting shed roof sheeting	<i>Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA</i>	5	-
6	Jacek Abramczyk, Katarzyna Chrzanowska	Impact of column suport stiffness on the mechanical performance of flat frame structural systems supporting thin-walled folded roofs	<i>Materials, MDPI</i>	140	3.4
Suma				545	10.2

3. WPROWADZENIE I UZASADNIENIE PODJĘCIA TEMATU

Kształtowanie form budynków to ważny aspekt architektury, który łączy funkcjonalność, kontekst, jak również estetykę. Funkcjonalność odnosi się do zdolności budynku do zaspokajania wcześniej określonych różnorodnych potrzeb człowieka [2]. Kontekst odnosi się do uwarunkowań i czynników, które wpływają na projektowanie budynków i przestrzeni. W przypadku powstającego projektu należy brać pod uwagę elementy klimatu, geografii, jak również aspekty obejmujące kulturowe, tradycyjne i społeczne danego regionu [3]. Estetyka odnosi się do wizualnych walorów budynków i przestrzeni. Na estetykę mają wpływ: forma, kształt budynku, sposób kształtowania elementów budynku, jak również prostota wobec konstrukcji i materiałów. Użycie skomplikowanych form może nadać budynkom unikalny charakter [4].

W projektowaniu parametrycznym sposób tworzenia bazuje na myśleniu algorytmicznym i wymaga zdefiniowania kształtu obiektu, proporcji, jak również zależności między elementami obiektu. Daje to możliwość eksperymentowania z różnymi kombinacjami wartości parametrów, które definiują daną bryłę i natychmiastową ewaluację wizualną efektu. Projektowanie parametryczne daje możliwość dopasowania obiektu do odmiennych uwarunkowań lokalizacyjnych. Parametryczna procedura pozwala również przyspieszyć proces weryfikacji wprowadzanych do projektu zmian [5].

Transformowane powłokowe dachy to nowatorskie rozwiązania architektoniczne łączące lekkość konstrukcji, elastyczność formy, jak i funkcjonalność. Dachy te wykorzystują lekkie materiały, m.in. stal, tworzywa sztuczne, czy kompozyty. Pozwala to na stosowanie dużej rozpiętości bez potrzeby stosowania ciężkich podpór [6].

Konstrukcje dachów powłokowych mają swój początek w tradycyjnych metodach budowlanych, które dążyły do uzyskania jak największej efektywności materiałowej, jak również estetycznej. Od czasów starożytnych dostępne materiały budowlane determinowały oraz modyfikowały formy architektoniczne. Metody budowy i względy konstrukcyjne również przyczyniły do ewolucji form architektonicznych. Pierwsze formy powłokowych konstrukcji dachowych pojawiły się już w starożytności w postaci kopuł, żebrowych sklepień oraz arkad, stosowane w architekturze rzymskiej i bizantyjskiej. Mimo, że nie były to konstrukcje powłokowe, to ich formy, jak również zasada ich działania stanowiły wstęp do rozwoju późniejszych, bardziej nowoczesnych

rozwiązań. Wynalezienie betonu pozwoliło z powodzeniem wykorzystać konstrukcję sklepień w taki sposób, by móc pokryć rozległe przestrzenie wielkimi sklepieniami i kopułami. Przykładem jest Panteon w Rzymie (Rysunek 1). Następnie pojawiły się bardziej skomplikowane formy sklepień, takie jak sklepienia żebrowe. W tym rodzaju sklepień wykorzystywane były technologie przekładania sił w obrębie cienkich i zakrzywionych powierzchni [7].



a)

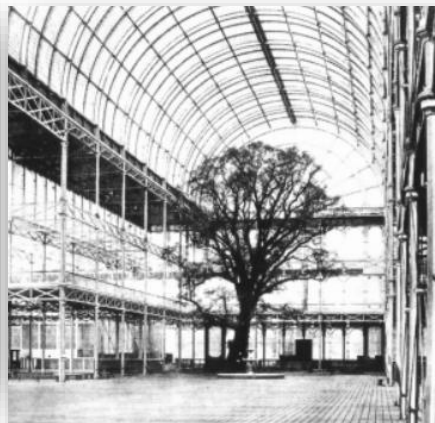
b)

Rysunek 1. Panteon w Rzymie (27 p.n.e) a) całość budynku, b) kopuła wewnątrz
[<https://pl.pinterest.com/pin/673991900470617360/>;
<https://br.pinterest.com/pin/571394271446889947/>] (dostęp 20.11.2024)

Wraz z rewolucją przemysłową, między XVIII, a XIX wiekiem i w wyniku rozwoju materiałów: stali i żelbetu powstały pierwsze nowoczesne konstrukcje dachów powłokowych. Zaczęto przyjmować stalową konstrukcję jako integralną część koncepcji architektonicznej. Umożliwiało to tworzenie konstrukcji o dużych, przeszklonych rozpiętościach, otwartym planie, elastycznością funkcjonalną i przestrzenną. Przykładem takiego budynku jest Kryształowy Pałac w Londynie (Rysunek 2), wybudowany w 1851 roku. Budynek ten po zakończeniu wystawy został rozebrany i zmontowany w Sydenham Hill, gdzie w skutek pożaru w 1936 roku został doszczętnie zniszczony [11].



a)



b)

Rysunek 2. Crystal Palace w Londynie (1851) a) całość budynku; b) wnętrze budynku [<https://www.periscopionline.it/crystal-palace-gioiello-dellarchitettura-in-vetro-e-acciaio-del-primissimo-expo-47452.html>] (dostęp 26.11.2024)

Złożone formy architektoniczne wykazujące bardziej swobodny kształt, mają swoje początki w latach 20. XX wieku. Wtedy to w ramach modernizmu betonowe powłoki zaczęły być wykorzystywane jako konstrukcje dachowe. Przykładem budynku zaprojektowanego w tamtym czasie jest pawilon niemiecki na Wystawie Światowej w Barcelonie (Rysunek 3) [8]. Budynek ten odzwierciedla prostotę konstrukcyjną, a zarazem konstrukcja ta współgra z otoczeniem. Zastosowano tu lekkie, szklane dachy wspierane na prostych metalowych ramach. Wprowadziły one koncepcję lekkich, transparentnych powierzchni w architekturze [9].



a)



b)

Rysunek 3. Pawilon wybudowany z okazji Wystawy Światowej w Barcelonie (1929)

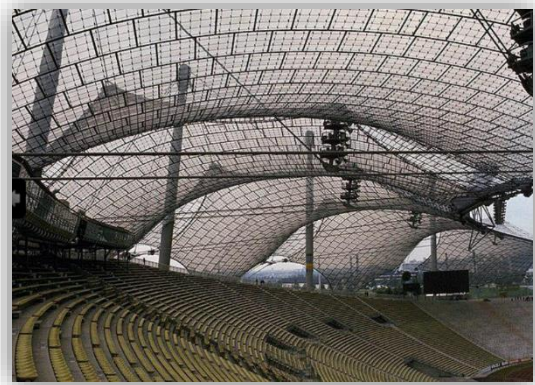
a) całość budynku; b) wnętrze pawilonu [<https://erasmusu.com/pl/erasmus-barcelona/co-zobaczyc/pawilon-barcelonski-mies-van-der-rohe-6463>]

(dostęp 20.11.2024)

W połowie XX wieku, kiedy nastąpił rozwój stali zostało zaprojektowanych wiele wspaniałych hal sportowych. Przykładem jest stadion olimpijski w Monachium (Rysunek 4), gdzie zastosowano konstrukcję opartą na sieci linowej wypełnionej panelami z materiału syntetycznego [10].



a)



b)

Rysunek 4. Stadion olimpijski w Monachium (1972) a) całość stadionu; b) wnętrze stadionu

[<https://www.morizon.pl/blog/najciekawsze-stadiony-swiata-18-architektonicznych-perelek/>; <https://www.budowle.pl/budowla/olympiapark>] (dostęp 20.11.2024)

Wkraczając w XXI wiek, kolejnym krokiem w rozwoju konstrukcji dachów powłokowych było wprowadzenie komputerowego modelowania i analizy strukturalnej. Pozwoliło to na projektowanie coraz to bardziej skomplikowanych form geometrycznych. Opracowano w tym czasie metody numeryczne, między innymi MES, czyli Metoda Elementów Skończonych, dzięki którym można w dokładny sposób analizować i modelować powłoki konstrukcyjne dachów. Każda konstrukcja o dużej rozpiętości lub o nietypowej formie staje się wyjątkowa, jak również innowacyjna [12]. Dodatkowo zaczęto patrzeć na projektowanie pod kątem ochrony zasobów i projektowania materiałów o niskim wpływie na środowisko. Coraz więcej projektantów decyduje się na produkty przyjazne dla środowiska (materiały pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego), pochodzące z recyklingu lub nawet odzyskane i ponownie wykorzystane [13].

Bardzo popularne stają się dachy zielone (Rysunek 5), które korzystnie wpływają na estetykę budowli, łagodząc jej ostre rysy, zwiększając również standard otoczenia miejsc zamieszkania, a zarazem są atrakcyjnym miejscem wypoczynku [14].



Rysunek 5. Dach zielony w apartamentowcu Star Tower

[<https://inzynierbudownictwa.pl/zielone-dachy-w-polsce/>] (dostęp 01.12.2024)

Systemy fotowoltaiczne również znajdują coraz większe zainteresowanie. Zaobserwowany rozwój techniki produkcji ogniw, wzrost ich wydajności, trwałości oraz ich odporności na warunki klimatyczne sprawił, że systemy te stają się atrakcyjnymi elementami architektonicznymi w budynkach. Doprowadziło to do powstania paneli fotowoltaicznych zintegrowanych z architekturą [15].

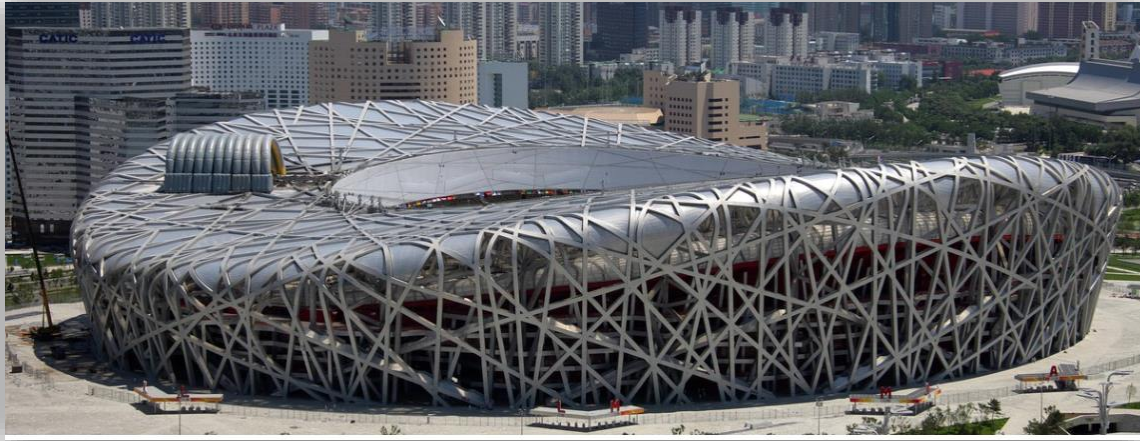
Innowacją w branży budowlanej jest technologia druku budynków mieszkalnych jak również obiektów mostowych w 3D (Rysunek 6). Technologia ta nadal jest udoskonalana. Wprowadzane są nowe rozwiązania, które mają na celu podwyższyć ekologiczność budowy oraz obniżyć jej czas wykonywania, a także koszty produkcji [16].



Rysunek 6. Największy budynek w Europie wydrukowany w 3D

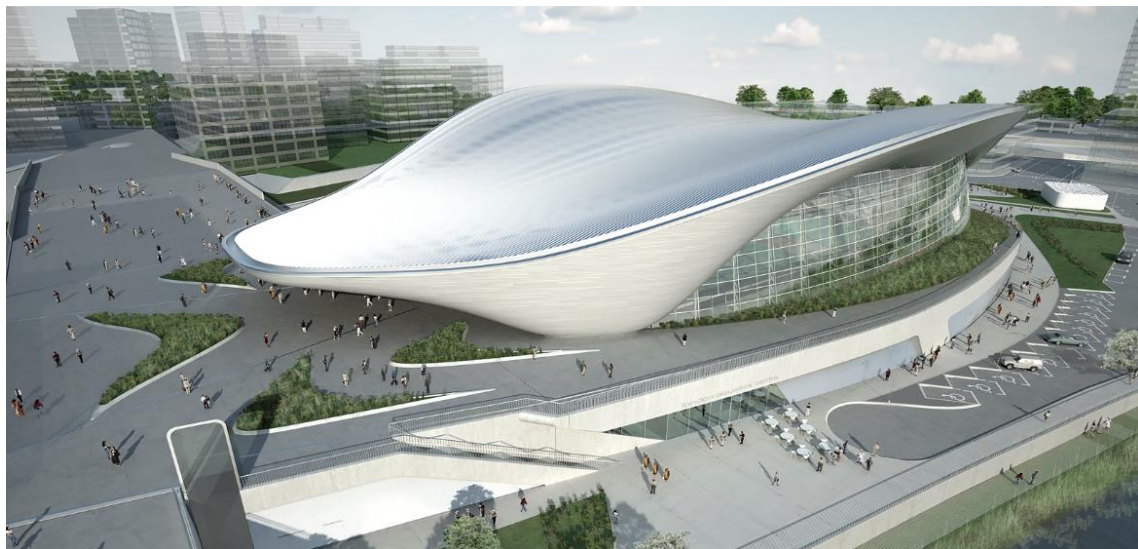
[<https://spidersweb.pl/2024/03/najwiekszy-budynek-w-europie-wydrukowany-w-3d.html>] (dostęp 01.12.2024)

Wybranymi przykładami wyjątkowych budynków XXI wieku są np. Stadion Narodowy Herzog&De Meuron w Pekinie (Rysunek 7); London Aquatics Centre w Londynie (Rysunek 8), czy Heydar Aliyev Center w Baku (Rysunek 9).



Rysunek 7. Stadion Narodowy Herzog&De Meuron w Pekinie (2008)

[https://www.clarin.com/arq/estadio-national-pekín-herzog-meuron_0_rsevDHq6v1.html] (dostęp 20.11.2024)



Rysunek 8. London Aquatics Centre w Londynie (2011/2012)

[<https://www.archdaily.com.br/br/01-36372/centro-aquatico-dos-jogos-olimpicos-de-londres-2012-zaha-hadid-architects>] (dostęp 20.11.2024)



Rysunek 9. Heydar Aliyev Center, Baku, Azerbejdżan (2012)

[<https://www.elledecor.com/it/people/g21285057/zaha-hadid-omagGIO/>] (dostęp 20.11.2024)

Biorąc pod uwagę wszystkie wymienione aspekty, przedstawiając korzyści związane z zastosowaniem i projektowaniem parametrycznych dachów można wywnioskować, że transformowane powłokowe dachy mają szerokie zastosowanie, zarówno w obiektach użyteczności publicznej, jak również w budynkach mieszkalnych. Transformowane powłokowe dachy stanowią istotny krok naprzód w budownictwie, jak i architekturze, łącząc funkcjonalność, innowacyjność, jak również estetykę. Ich zdolność do adaptacji względem zmieniających się warunków oraz różnorodnych potrzeb użytkowników sprawia, że są one niezwykle wszechstronnym rozwiązaniem. W świetle wyżej omówionych wyzwań, zasadnym jest podjęcie tematyki dotyczącej poszukiwania i kształtowania nowych niekonwencjonalnych form i konstrukcji, jako tematu rozprawy doktorskiej.

4. CEL I ZAKRES PRACY

4.1 Cel pracy

Głównym celem pracy jest opracowanie procedur parametrycznego kształtowania zróżnicowanych form i struktur budynków, pozwalających wykorzystać specyficzne geometryczne i mechaniczne właściwości cienkościennych płaskich trapezowych arkuszy fałdowych transformowanych do postaci powłokowych dachowych przekryć, oraz zapewniających efektywną pracę statyczno-wytrzymałościową konstrukcji tych budynków. Wybór odpowiednich procedur został dokonany na podstawie nowatorskich wieloparametrowych funkcji, które umożliwią przeprowadzenie odpowiednich procesów optymalizacyjnych. Relacje zaobserwowane podczas badań zostały zamodelowane za pomocą nowatorskich funkcji zdefiniowanych przez odpowiednio dobrane niezależne i zależne zmienne. W efekcie, powyższe funkcje opisują relacje pomiędzy wyjściowym, parametrycznym, projektowym modelem budynków rozpatrywanego typu, zdefiniowanym za pomocą niezależnych zmiennych, a wynikowym, parametrycznym, mechanicznym modelem tych budynków, zdefiniowanym za pomocą zależnych zmiennych. Dodatkowo przyjęte zostały warunki brzegowe ograniczające przedziały zmienności powyższych modeli oraz pozwalające kształtować budynki i wiaty charakteryzujące się efektywną a nawet optymalną pracą mechaniczną. Dzięki tym działaniom dokonano racjonalizacji projektowanych form i konstrukcji budynków, łącząc jednocześnie ich atrakcyjną, nietypową formę przestrzenną z efektywną pracą statyczno-wytrzymałościową.

4.2 Zakres pracy

Aby osiągnąć założony cel dotyczący parametryzacji i racjonalizacji formy i konstrukcji budynków rozpatrywanego typu, konieczne było zrealizowanie następujących zadań:

- wybór typu niekonwencjonalnych form budynków, przeznaczonych do analizy, a następnie parametryzacja wybranych typów form,
- wybór typów ustrojów konstrukcyjnych podpierających wyżej wymienione formy,
- wybór schematów statycznych, wykorzystanych dla przyjętych typów konstrukcji, następnie parametryzacja,

- poszukiwanie zależności pomiędzy ogólną formą budynku lub wiaty, postacią ustroju konstrukcyjnego i układem obciążeń, a pracą statyczno-wytrzymałościową i statecznościową analizowanego ustroju konstrukcyjnego,
- określenie przedziałów zmienności wartości zmiennych niezależnych, ewentualnie zmiennych zależnych prowadzących do uzyskania racjonalnej pracy konstrukcji,
- wykorzystanie techniki komputerowej w poszukiwaniu, definiowaniu i opracowywaniu zaobserwowanych zależności,
- opracowanie opisu zależności pomiędzy parametrami definiującymi formę i pracę statyczno-wytrzymałościową ustroju konstrukcyjnego, prowadzących do uzyskania efektywnej pracy tego ustroju i stosunkowo atrakcyjnej wizualnej formy budynku,
- przeprowadzenie badań, w tym symulacji komputerowych, a następnie opracowanie artykułów opisujących wyniki przeprowadzonych badań.

5. KSZTAŁTOWANIE NIEKONWENCJONALNYCH FORM I KONSTRUKCJI FAŁDOWYCH BUDYNKÓW - PRZEGLĄD AKTUALNEGO STANU WIEDZY

Realizując założone cele badawcze, na początek przeprowadzono przegląd literatury, który umożliwił zebranie informacji na temat dotychczasowych badań nad materiałami w zakresie kształtowania niestandardowych form i struktur fałdowych budynków.

Wiele zróżnicowanych niekonwencjonalnych form budowlanych i przeznaczonych dla tych form konstrukcyjnych zostało przedstawionych przez Abdela i Mungana [17]. Kompleksowa klasyfikacja różnych typów dużej liczby niekonwencjonalnych układów konstrukcyjnych została opublikowana przez Saitoh [18]. Większość z tych systemów może być stosowana w układach konstrukcyjnych podtrzymujących złożone formy budowlane charakteryzujące się zagiętymi ścianami elewacyjnymi i wielosegmentowymi konstrukcjami powłokowymi [19] [Załącznik A1].

Duże możliwości teoretyczne w zakresie kształtowania różnych form liniowych złożonych z przekształconych blach giętych o otwartych profilach zaowocowały szeroko zakrojonym rozwojem badań w zakresie przekształceń blach jednopowłokowych oraz tworzenia wielosegmentowych struktur powłokowych [20] [Załącznik A1].

Jednak opracowana nowatorska metoda Reichharta pozwoliła na zwiększenie różnorodności kształtowania niekonwencjonalnych powłok dachowych i ich konstrukcji złożonych z nominalnie płaskiej jednowarstwowej blachy przekształconej w pozycję sztywnych kierunków skośnych generujących zagięte kształty powłok [21] [Załącznik A1].

Wyniki badań przeprowadzonych przez Abramczyka [22] wskazują na istotną rolę, jaką odgrywa kurczenie się każdej przekształconej blachy powłokowej w kształtowaniu niekonwencjonalnych form budynków pokrytych cienkościenną blachą giętą, przekształcającą się elastycznie w różne powierzchnie liniowe [23]. Abramczyk dodał do algorytmu Reichharta warunek związany z centralnym położeniem skurczu we wszystkich efektywnie przekształconych złożonych skorupach [Załącznik A1].

Skurcz powłoki dachowej można modelować za pomocą linii ograniczenia powierzchni prostopadłej. W ten sposób metoda Reichharta została rozszerzona o warunek brzegowy związany z linią zwarcia. Efektem tego działania powinno być racjonalne ukształtowanie form dachu w stanie surowym, tak aby charakteryzowały się

one relatywnie wysoką atrakcyjnością wizualną przy minimalnym nakładzie pracy [24]. Jeśli centralne położenie skurczu, w połowie długości każdej fałdy powłoki, zostanie osiągnięte za pomocą dowolnych kierunków dachu, wówczas wytrzymałość statyczna przekształconej blachy jest stabilizowana i racjonalizowana [23]. W ten sposób należy uzyskać swobodę projektowania konstrukcji dachowych i elewacyjnych o dowolnym kształcie [20] [Załącznik A1].

Prokopska i Abramczyk przeprowadzili kilka prostych układów czworoscianów odniesienia do modelowania kompletnych form swobodnych o wzniesieniach w płaszczyźnie skośnej i zagiętej oraz pokrytych dachem z wieloma przekształconymi pełnymi sektorami powłoki [25,26]. Prezentowane konstrukcje budowlane często składają się z ćwiartek paraboloid hiperbolicznych ułożonych symetrycznie w różnych konfiguracjach. Proponowane zróżnicowane konstrukcje budowlane o swobodnym kształcie, pokryte skomplikowanymi powłokami falistymi, charakteryzują się średnimi rozpiętościami [Załącznik A1, A4]. W obecnym stanie wiedzy istnieje jednak luka, ponieważ nie istnieje analogiczna kompleksowa metoda kształtowania ciągłych i nieciągłych konstrukcji dachowych powłokowych, których kompletne jednostki powłokowe są rozmieszczone na powierzchniach referencyjnych charakteryzujących się ujemną krzywizną Gaussa. Potrzebny jest szczegółowy opis procedury kształtowania tak skomplikowanych form budowlanych [Załącznik A4]. Zagadnienie to zostało przeanalizowane w Załączniku A4.

Pottman zaproponował kilka kompleksowych metod kształtowania układów płaszczyzn oddzielających kolejne sektory płaskie i gładkie powłokowe ułożone na różnych powierzchniach regularnych [27]. Jeśli chcemy za pomocą tych metod ukształtować przekształcone składane blachy skorupowe, należy dokonać ich istotnych modyfikacji z uwzględnieniem ograniczeń geometrycznych i materiałowych składanych arkuszy. Kilka metod przeprowadzonych przez Attarda [28], Vlasowa [29] lub Vasiriego [30] można również zastosować do projektowania cienkościennych blach narażonych na duże przemieszczenia. Samyn opisał metodę tworzenia przekształconych składanych skorup wykonanych z aluminium lub PVC [31] [Załącznik A1].

Winter [61], Parker [62], Gergely i wsp. [63], Egger i wsp. [64] oraz wielu innych badaczy wykazało duże możliwości teoretyczne w poszukiwaniu różnych form przekształconej blachy fałdowej, a także ich prostych struktur złożonych z otwartej cienkościennej blachy falistej pokrytej płaskimi gładkimi arkuszami zarówno od góry, jak i od dołu [Załącznik A4].

Dość dokładny sposób postępowania w zakresie kształtowania złożonych konstrukcji budowlanych pokrytych przekształconymi konstrukcjami dachowymi powłokowymi, których ogólna postać charakteryzuje się dodatnią krzywizną Gaussa, został opisany przez Abramczyka [32] w dość dokładny sposób. Procedura ta została również zaimplementowana w procedurach komputerowych [33]. Nie ma jednak analogicznej procedury i realizacji, w której ogólna forma konstrukcji dachu w stanie surowym jest zgodna z ujemną krzywizną Gaussa [Załącznik A1]. Zagadnienie to zostało szczegółowo przeanalizowane w artykule 1, w Załączniku A1.

Szereg racjonalnych układów konstrukcyjnych przeznaczonych dla różnych niekonwencjonalnych form budynków jest omawiany przez Eekhouta [34] i Motro [35] w ramach morfologii strukturalnej [36]. Kształtowanie przestrzennych form budowlanych i ich racjonalnych struktur zależy od materiału, z którego wykonane są konstrukcje i ich powłoki. Powszechnie znana geometria i właściwości mechaniczne nominalnie płaskościennych blach składanych o cienkich ściankach znacznie ograniczają swobodę kształtowania swobodnych form z dachów i dachów z zagiętą blachą i ramami podtrzymującymi poszycie [37]. Aby urozmaicić ogólne formy budynków, poszycie zbudowane ze złożonych arkuszy przekształca się w przestrzenne formy powłokowe, które są płytkami paraboliczno-hiperbolicznymi pofałdowanymi powłokami dachowymi zwanymi hyparami [38,39]. Kierunki podtrzymujące te powłoki są najczęściej prostoliniowe i skośne, a ich krawędzie są zamkniętymi czworokątami przestrzennymi [Załącznik A2,A3].

Istotne ograniczenia dotyczące tworzenia tylko płytkich i mało zróżnicowanych powłok hypar zostały przekroczone przez Reichharta [21]. W metodzie Reichharta stosuje się odpowiednią technikę układania nominalnie płaskich blach giętych wzdłuż odpowiednio zaprojektowanych kierunków, tak aby arkusze kolejno wbudowywane w pokrycie dachowe lub elewacyjne miały swobodę swoich odkształceń poprzecznych i podłużnych, zapewniając ich efektywną pracę mechaniczną pod charakterystycznym obciążeniem. Metoda Reichharta pozwala na nałożenie wielu pożądanых form dla poszycia elewacyjnego za pomocą odpowiednio opracowanego kształtu, długości i wzajemnego położenia kolejnych kierunków wchodzących w skład projektowanego układu konstrukcyjnego budynku. Zmiany kształtu i względnego położenia kolejnych kierunków powodują odpowiednie zmiany w formie powłoki i przekształceniu fałdu każdej blachy. Ponadto obserwuje się istotne zmiany w długościach prawie wszystkich

linii nośnych każdego przekształconego poszycia skorupowego w tym samym czasie. W związku z tym racjonalne projektowanie form jest trudne [40] [Załącznik A2].

Istotną modyfikację metody Reichharta wprowadził Abramczyk, wykorzystując linie zwężenia powierzchni liniowych do modelowania skurczu występującego w każdym złożonym arkuszu poddanym transformacji skrętnej lub zginająco-skrętnej [41]. Takie podejście wymaga zaprojektowania kilku odpowiednio skorelowanych kierunków w celu wymuszenia wymaganych przekształceń kształtu całego złożonego arkusza [Załącznik A2,A3].

W monografii Abramczyka i Chrzanowskiej [41] przedstawiono kilka zróżnicowanych metod geometrycznego kształtowania niekonwencjonalnych form ogólnych budynków pokrytych przekształconą blachą giętą [40]. Metody te opierają się na zróżnicowanym kształcie, długości i wzajemnym położeniu (nachyleniu i odległości) kilku kierunków podtrzymujących przekształcone powłoki. Wyniki badań wstępnych związanych z symulacjami komputerowymi pracy statyczno-wytrzymałościowej kilku wybranych typów układów konstrukcyjnych oraz transformowanych powłok fałdowych podpartych przez te układy przedstawia także Abramczyk [42] [Załącznik A2].

W Załączniku A2 przedstawiono zagadnienia związane z kształtowaniem płaskich ram układów konstrukcyjnych [43], gdzie kolejne ramy usytuowane na całej długości projektowanego budynku mają różne formy [44,45]. Główną uwagę zwrócono na niektóre właściwości geometryczne, wytrzymałościowe i stateczności systemów podtrzymujących przekształcone zagięte dachy powłokowe [46]. Kilka metod kształtowania kratownic metalowych przedstawili Ram i Gupta [47] oraz Somma i Vit [48]. Wardenier i wsp. [49] zwracają szczególną uwagę na statyczno-wytrzymałościowe kształtowanie i stabilność połączeń kratownicowych. Metody kształtowania układów strukturalnych w płaszczyźnie stabilnej przedstawili Qu i wsp. [50] oraz Ziemian i wsp. [51].

Ramy metalowe są chętnie wykorzystywane w konstrukcjach budowlanych ze względu na ich stosunkowo niską wagę i swobodę kształtowania skomplikowanych form dachów i elewacji. Wiele nowatorskich metod projektowania zróżnicowanych niekonwencjonalnych form budowlanych i ich układów konstrukcyjnych przedstawiono w monografii Abdela i wsp. [17]. Efektywnymi, innowacyjnymi formami budowlanymi wynikającymi z racjonalnej pracy ich konstrukcji zajmuje się morfologia struktur

[34,36]. Prekursorami tej dziedziny wiedzy są Motro [35] i Webster [52]. Inteligentne materiały stosowane w elementach układów konstrukcyjnych są bardzo ważne dla uzyskania ich efektywnej wydajności [53].

Parametry konstrukcyjne rurowych konstrukcji prętowych są również prezentowane przez Marszałka [54]. Ilościowe i jakościowe przyimki kształtowania prętowych konstrukcji rurowych podali również Bródka i Broniewicz [65]. Istotne czynniki wykorzystywane do kształtowania racjonalnych układów konstrukcyjnych, tj. praca wytrzymałościowa i stabilność poszczególnych elementów, ich połączeń i całej konstrukcji, zostały zdefiniowane przez Ziemiana i wsp. [51] oraz Jarmaia i Farkasa [55]. Stabilność lokalna prętów jest szczegółowo rozważana przez Hillebranda i wsp. [56].

Wszystkie dopuszczalne obciążenia i ich kombinacje muszą być brane pod uwagę w każdym procesie projektowania budynków i ich układów konstrukcyjnych. Różne kierunki obciążeń, w tym pionowe, poziome i normalne do powierzchni ścian lub dachu, wpływają na złożone warunki równowagi połączeń i prętów Kurobane i wsp. [57] oraz Packer i Henderson [58].

Zmieniając kształt kolejnych poprzecznych ram płaskich w układzie konstrukcyjnym można uzyskać niekonwencjonalną, a zarazem ciekawą formę powłokową przegrody dachowej lub elewacji [59,60] [Załącznik A3].

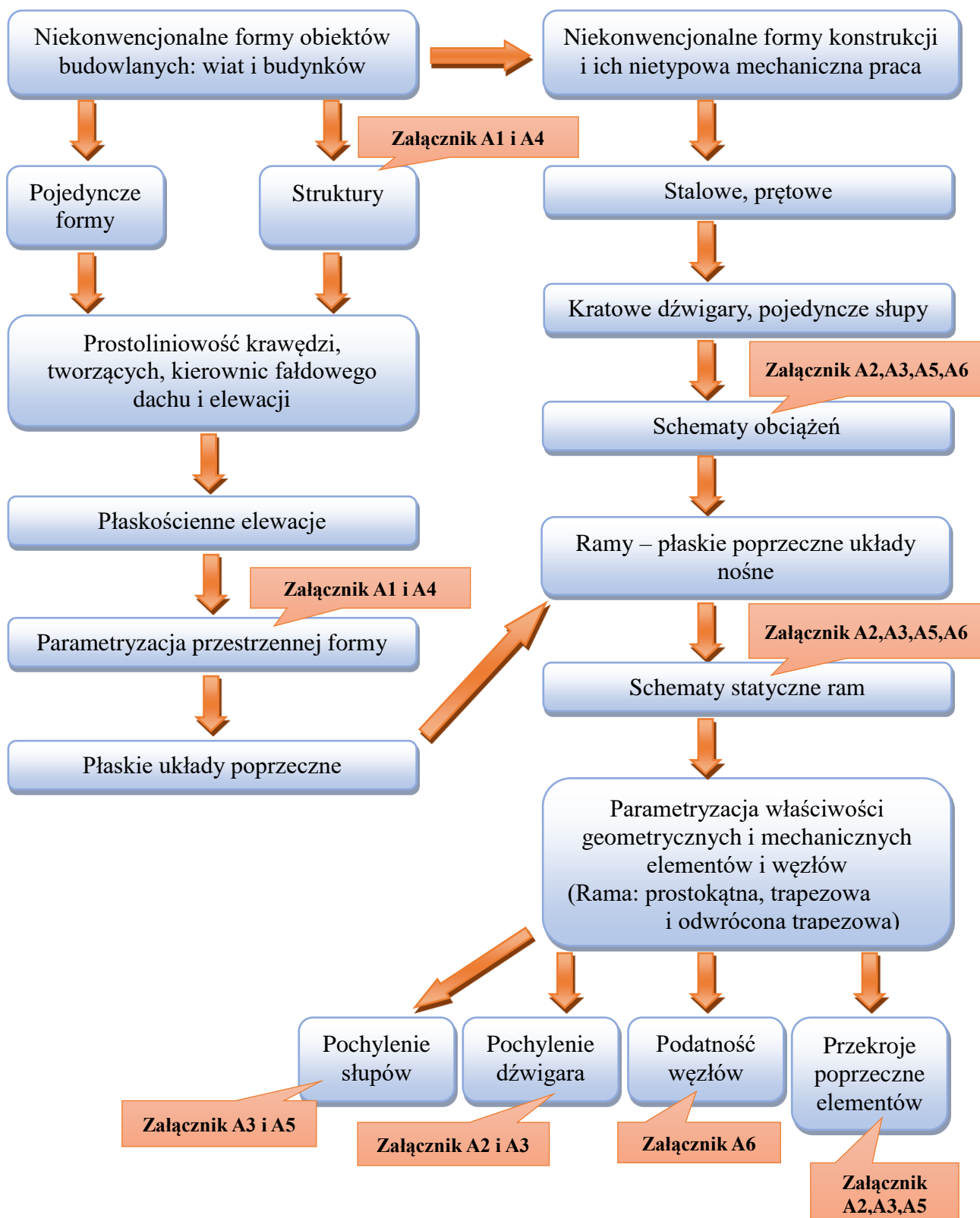
Opracowywane są coraz bardziej uniwersalne i dokładne metody obliczania takich konstrukcji, wykorzystujące modele parametryczne [66]. Metody te oferują obliczenia związane z wysiłkiem i statecznością konstrukcji [67] oraz wyboczeniem i wypaczeniem ich elementów [28]. Metody te opierają się na badaniach laboratoryjnych [48] i symulacjach komputerowych [68,69]. Metody przewidywania i optymalizacji konstrukcji kratowych prętów i ram stalowych przedstawili Deng i wsp. [70] oraz Kaveh i Gerami [71]. W definiowaniu modeli wykorzystywanych w obliczeniach coraz większą rolę odgrywają algorytmy sztucznej inteligencji [72]. Sztuczne, płytkie i głębokie sieci neuronowe [73,74] pozwalają na symulację modeli wieloparametrowych pomocnych w uzyskaniu odpowiedniej dokładności i krótkiego czasu obliczeń. Głęboką rolę w kontroli wizualnej odgrywają również głębokie sieci neuronowe, w których mierzone są różne preparaty przemysłowe mierzące poprawność działania konstrukcji i ich elementów [75].

6. METODOLOGIA, WYNIKI I WNIOSKI Z BADAŃ OPISANYCH W POSZCZEGÓLNYCH PUBLIKACJACH

Poszczególne przeprowadzone badania opisane w kolejnych sześciu artykułach przedstawiono poniżej wraz z wynikami i wnioskami. Na wstępie przedstawiono metodologię tych badań w postaci schematu blokowego, gdzie przedstawiono poszczególne kroki do uzyskania postawionego celu realizowanego za pomocą powyższych publikacji i całej rozprawy doktorskiej. Następnie w każdej poszczególnej publikacji ukazano cel, przedstawiono wyniki w postaci tabel i rysunków, jak również wnioski, podsumowujące po krótko każdą publikację z osobna. Po dokonaniu wszystkich kroków przedstawionych w schemacie blokowym utworzono parametryczny obliczeniowy model ramy przeznaczony do symulacji. Symulacje komputerowe zostały przeprowadzone w programie Robot Structural Analysis Professional. Metody, które zostały przeprowadzone to: metoda obliczeniowa geometrii, obliczeniowa statyczno-wytrzymałościowa i ustalenia relacji pomiędzy modelami obliczeniowym i mechanicznym. Po przeprowadzeniu symulacji dokonano metody opisu i optymalizacji form (wiat i budynków) i ich konstrukcji (ram płaskich).

6.1 Metodologia – schemat blokowy

Cała metodologia rozpoczęła się od ustalenia zakresu prac. Ustalono, jakich niekonwencjonalnych form obiektów budowlanych będzie dotyczyła rozprawa doktorska. Skupiono się na 2 aspektach: kształtowaniu form i konstrukcji, jak również określeniu właściwości mechanicznych. Dokonano parametryzacji formy przestrzennej oraz właściwości geometrycznych i mechanicznych elementów oraz węzłów. Dobrano elementy ram płaskich poprzecznych, takie jak słupy, czy dźwigary kratowe, jak również schematy obciążeń. Przedstawiono schematy statyczne ram płaskich poprzecznych, poprzez zmianę różnych parametrów – pochylenie słupów, pochylenie dźwigara, podatność węzłów oraz przekroje poprzeczne elementów.



Rysunek 10. Schemat blokowy [Opracowanie własne].

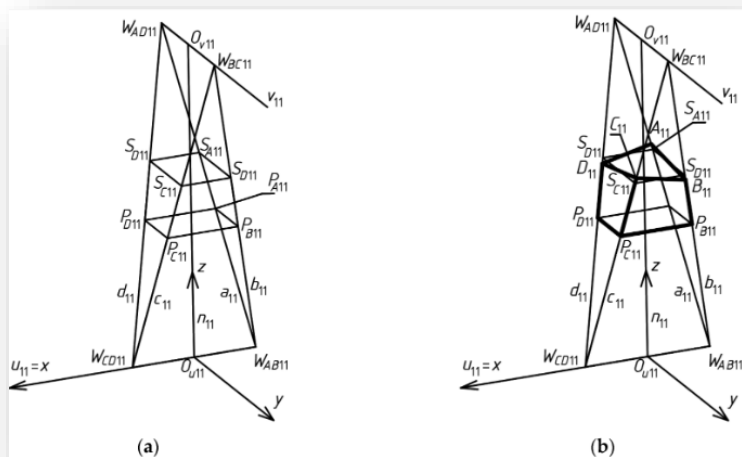
6.2 Publikacja 1

„Complex Building Forms Roofed with Transformed Shell Units and Defined by Saddle Surfaces” – Załącznik A1 [17-94].

Celem tej publikacji jest przedstawienie innowacyjnej procedury, która prowadzi do powstania niektórych modeli budynków. Kształtowane budynki charakteryzują się niekonwencjonalnymi formami fasad i dachów, gdzie ściany elewacji są nachylone wewnątrz, jak i na zewnątrz, a pojedynczy dach, składający się z sektorów powłok, które ułożone są w przestrzeni trójwymiarowej zgodnie z właściwościami powierzchni o ujemnej krzywiznie Gaussa. Zastosowano tu nowatorski algorytm zaimplementowany do nowej procedury kształtowania skomplikowanych form, aby tworzone modele znajdowały się pomiędzy wierzchołkami sieci referencyjnej. Przedstawiona procedura pozwala na ułożenie elementów elewacji i dachu względem wierzchołków sieci referencyjnej z wykorzystaniem odpowiednich współczynników wyrażających pewne proporcje pomiędzy odległościami par sąsiadujących ze sobą wierzchołków, a odległościami punktów charakterystycznych tworzonych modeli od odpowiednich wierzchołków sieci referencyjnej. Zróznicowano te wartości współczynników, przez co uzyskano zróżnicowane formy budowlane. Przedstawione zostały tu tylko zależności rządzące położeniem każdej siatki B_{vij} w sieci okapowej B_v oraz trzy zestawy wartości współczynników podziału do wierzchołków tej samej podstawowej sieci wielościennej referencyjnej w celu dokonania analizy trzech określonych form budowlanych, różniących się od siebie [Załącznik A1].

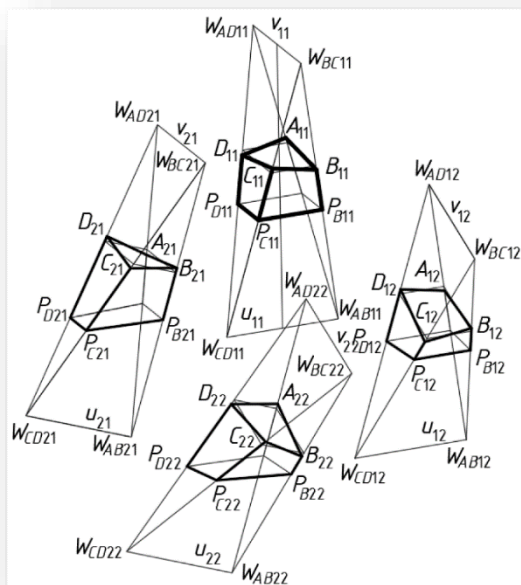
6.2.1 Metodologia

Konstrukcja sieci rozpoczyna się od wyznaczenia pierwszego centralnego czworobocznego oczka – czworoboku referencyjnego, który został wyznaczony na podstawie dwóch dowolnie dobranych skośnych linii prostych u_{11} i v_{11} prostopadłych do siebie. Przyjęto dowolną odległość d_{uv11} między u_{11} i v_{11} . Jest ona mierzona wzdłuż prostej n_{11} prostopadłej do u_{11} i v_{11} między punktami O_{u11} i O_{v11} przecięcia n_{11} z u_{11} i v_{11} [Załącznik A1].



Rysunek 11. Elementy geometryczne i oznaczenia użyte do kształtowania pierwszej siatki wielościennej a) zasadnicze elementy sieci, b) pierwsza siatka modelu [Załącznik A1].

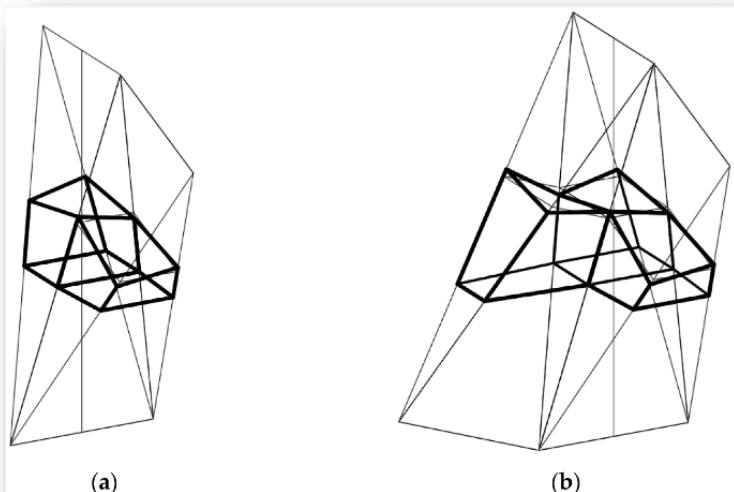
W celu określenia czterech wierzchołków W_{AB11} , W_{CD11} , W_{AD11} i W_{BC11} należy przyjąć odległość d_{uv11} między powyższymi osiami skośnymi, odległość d_{u11} między W_{BC11} i W_{AD11} oraz odległość d_{v11} między W_{AB11} i W_{CD11} . Na podstawie tych założeń można obliczyć współrzędne tych wierzchołków w ortogonalnym układzie współrzędnych $[x,y,z]$ (Rysunek 11a). Dla siatki Γ_{12} wierzchołki W_{AB12} , W_{CD12} i W_{AD12} są przyjęte jako identyczne z wierzchołkami W_{AB11} , W_{CD11} i W_{BC11} z siatki Γ_{11} . Oś u_{12} z siatki Γ_{12} przyjęłam, że jest identyczna z u_{11} [Załącznik A1].



Rysunek 12. Cztery kolejne siatki zaprojektowanej sieci referencyjnej [Załącznik A1].

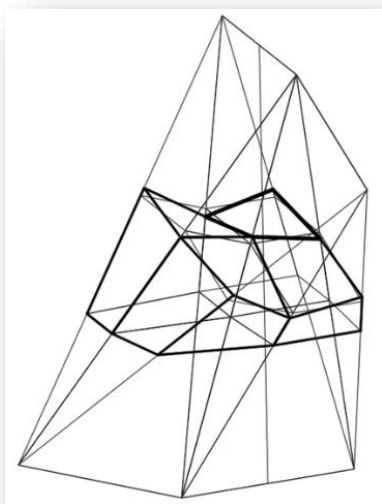
Położenie wierzchołka W_{BC12} zawiera się w płaszczyźnie (y, z) , oddalonej od W_{BC11} przez przyjętą wartość d_{v12} i oddalone od osi u_{11} na wysokość d_{BC12} trójkąta $W_{BC12}W_{CD12}W_{AB12}$ mierzone od W_{BC12} , gdzie $W_{BC12}W_{CD12}W_{AB12}$ są zgodne z $W_{BC11}W_{CD11}W_{AB11}$. Powyższe działania prowadzą do powstania formy, którą przedstawiłam na Rysunku 13a [Załącznik A1].

Czwarty wierzchołek W_{CD21} z siatki Γ_{21} zbudowany jest w płaszczyźnie (x, z) w dwóch dowolnie przyjętych odległościach d_{u21} z W_{CD11} oraz d_{CD21} z v_{11} . Metoda zastosowana do parametryzacji Γ polega na zdefiniowaniu określonej liczby współczynników, które wyrażają proporcje pomiędzy odległościami wierzchołków utworzonych osi Γ_{ij} . W przypadku czworościanu Γ_{21} proporcje przedstawiłam następująco: $dd_{u21} = d_{u21}/d_{u11}$ oraz $dd_{CD21} = d_{CD21}/d_{CD11}$. Powyższe działania prowadzą do konstrukcji formy, którą przedstawiłam na rysunku 13b, dla której $dd_{u21} = dd_{CD21} = 1$ [Załącznik A1].



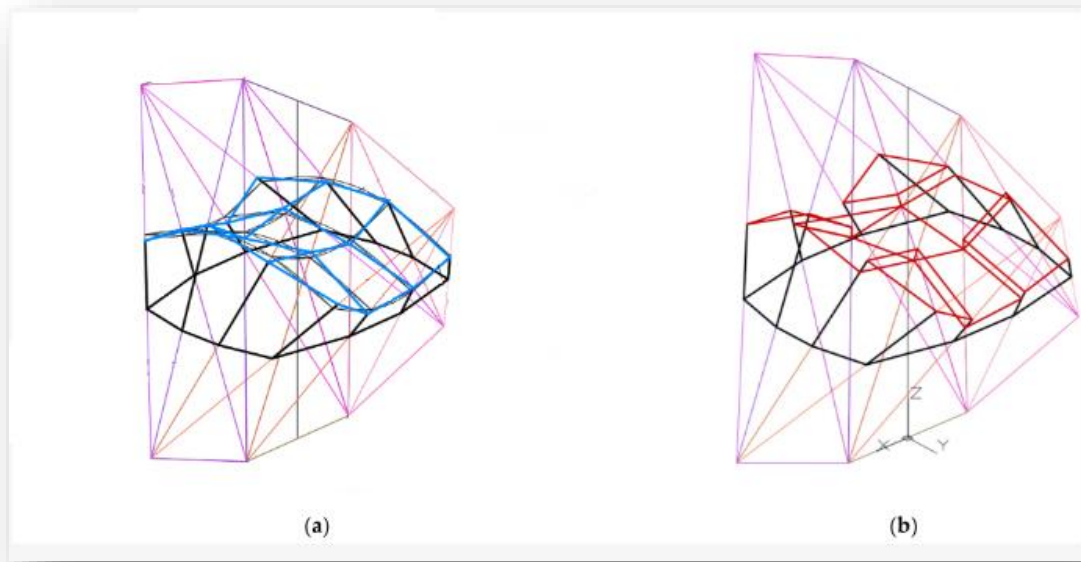
Rysunek 13. Dwie kolejne siatki ustawione w dwóch prostopadłych kierunkach: a) pierwszy kierunek, b) dwa kolejne kierunki [Załącznik A1].

W przedstawionym algorytmie nie ma dowolności w wyznaczaniu wierzchołków czworościanu Γ_{22} i innych czworościanów Γ_{ij} ułożonych w ukośne pasy (dla $i \neq 1$ lub $j \neq 1$). Dla czworościanu Γ_{22} przyjęłam, że $W_{AD22}=W_{BC11}$, $W_{BC22}=W_{AD12}$, $W_{CD22}=W_{CD21}$, $W_{AB22}=W_{CD11}$. Powyższe działania prowadzą do utworzenia formy przedstawionej na rysunku 14 [Załącznik A1].



Rysunek 14. Cztery kolejne siatki zaprojektowanej sieci referencyjnej [Załącznik A1].

Ogólnie, dla czworościanów diagonalnych, $W_{ADij}=W_{BCi-1j-1}$, $W_{BCij}=W_{ADi-1j}$, $W_{CDij}=W_{CDij-1}$, $W_{ABij}=W_{CDi-1j-1}$. Niewielka modyfikacja opisanej procedury pozwala na ustawienie W_{ADij} , W_{BCij} , W_{CDij} i W_{ABij} w dowolnych punktach odpowiednich krawędzi bocznych sieci, a nie tylko w wierzchołkach wcześniej utworzonych czworościanów. Każda sieć Γ_1 (Rysunek 14) utworzona zgodnie z proponowanym algorytmem składa się z czterech czworościanów Γ_{ij} ($i, j = 1, 2$) i może być rozszerzona do symetrycznych form Γ (Rysunek 15a, b), dla których (x, z) i (y, z) są płaszczyznami symetrii. Zatem Γ składa się z czterech symetrycznych części Γ_i ($i = 1$ do 4). Na podstawie symetrycznej sieci referencyjnej Γ tworzona jest wielokątna sieć B_v w celu zdefiniowania wielopowłokowej konstrukcji dachu [Załącznik A1].



Rysunek 15. Zaprojektowana sieć referencyjna a) konstrukcja pokryta ciągłą konstrukcją powłokową, b) konstrukcja pokryta dachem o nieciągłej konstrukcji powłokowej [Załącznik A1].

6.2.2 Wyniki

Przedstawiłam trzy przykłady pokazujące wykorzystanie opracowanej procedury w procesie kształtowania różnych niekonwencjonalnych złożonych form budynków [Załącznik A1].

Do utworzenia pierwszego czworościanu Γ_{11} sieci wielościanów Γ przyjąłam wartości następujących parametrów: (1) odległości d_{v11} dwóch wierzchołków W_{BC11} i W_{AD11} należących do pierwszej osi v_{11} (Rysunek 12), (2) stosunek Dd_{uv11} powyższej odległości d_{uv11} do odległości d_{v11} pomiędzy osiami ukośnymi u_{11} i v_{11} , (3) stosunek Dd_{u11} odległości d_{u11} dwóch wierzchołków W_{AB12} i W_{CD12} należących do drugiej osi u_{11} do d_{v11} . Zastosowane wartości przedstawiłam w Tabeli 2 [Załącznik A1].

Tabela 2. Wartości parametrów początkowych Γ_1 [Załącznik A1].

Parametr początkowy	d_{v11} [mm]	Dd_{uv11}	Dd_{u11}
	20,000	5	1

Identyczne wartości są przyjęte dla pozostałych przystających czworościanów znajdujących się w ortogonalnych kierunkach opracowanej sieci referencyjnej Γ_1 . W wyniku odpowiedniego złożenia Γ_{11} , Γ_{21} i Γ_{12} można utworzyć sieć Γ_1 . Wierzchołki Γ_{22} leżą w czterech wierzchołkach powyższych czworościanów uzyskanych wcześniej. Współrzędne tych wierzchołków podałam poniżej w Tabeli 3 [Załącznik A1].

Tabela 3. Współrzędne wierzchołków W_{ABij} , W_{CDij} , W_{ADij} , W_{BCij} (dla $i, j = 1, 2$) podstawowej wielościennej sieci referencyjnej Γ_1 . [Załącznik A1].

Punkt	Współrzędna x [mm]	Współrzędna y [mm]	Współrzędna z [mm]
W_{AB11}	-10,000	0	0
W_{CD11}	10,000	0	0
W_{AD11}	0	10,000	50,000
W_{BC11}	0	-10,000	50,000
W_{AB12}	-10,000	0	0
W_{CD12}	28,793	0	6840
W_{AD12}	0	10,000	50,000
W_{BC12}	0	-10,000	50,000
W_{AB21}	0	-28,793	43,160
W_{CD21}	0	-10,000	50,000
W_{AD21}	-10,000	0	0
W_{BC21}	10,000	0	0
W_{AB22}	28,793	0	6840
W_{CD22}	10,000	0	0
W_{AD22}	0	-28,793	43,160
W_{BC21}	0	-10,000	50,000

Aby określić położenie wierzchołków S_{A11} , S_{B11} , S_{C11} i S_{D11} pierwszej siatki powierzchni odniesienia ω_r leżących na bocznych krawędziach Γ_{11} , przyjęto współczynniki dd_{SA11} , dd_{SB11} , dd_{SC11} i dd_{SD11} stanowiące współczynniki podziału wierzchołków czworościanu Γ_{11} . Wartości tych współczynników przedstawiłam poniżej w Tabeli 4. Obliczone wartości współrzędnych tych wierzchołków przedstawiłam w Tabeli 5 [Załącznik A1].

Tabela 4. Początkowe współczynniki podziału określające pozycje punktów S_{Aij} , S_{Bij} , S_{Cij} , S_{Dij} i wierzchołków B_v pierwszej struktury Σ_1 dla $i, j = 1, 2$. [Załącznik A1].

Stosunek	Wartość
dd_{SA11}	0.465
dd_{SB11}	0.478
dd_{SC11}	0.489
dd_{SD11}	0.489
dd_{SA12}	0.478
dd_{SB12}	0.600
dd_{SC12}	0.617
dd_{SD12}	0.489
dd_{SA22}	0.327
dd_{SB22}	0.450
dd_{SC22}	0.600
dd_{SD22}	0.478
dd_{A11}	0.480
dd_{B11}	0.462
dd_{C11}	0.500
dd_{D11}	0.474
dd_{A12}	0.462
dd_{B12}	0.600
dd_{C12}	0.600
dd_{D12}	0.500
dd_{A22}	0.343
dd_{B22}	0.435
dd_{C22}	0.600
dd_{D22}	0.462

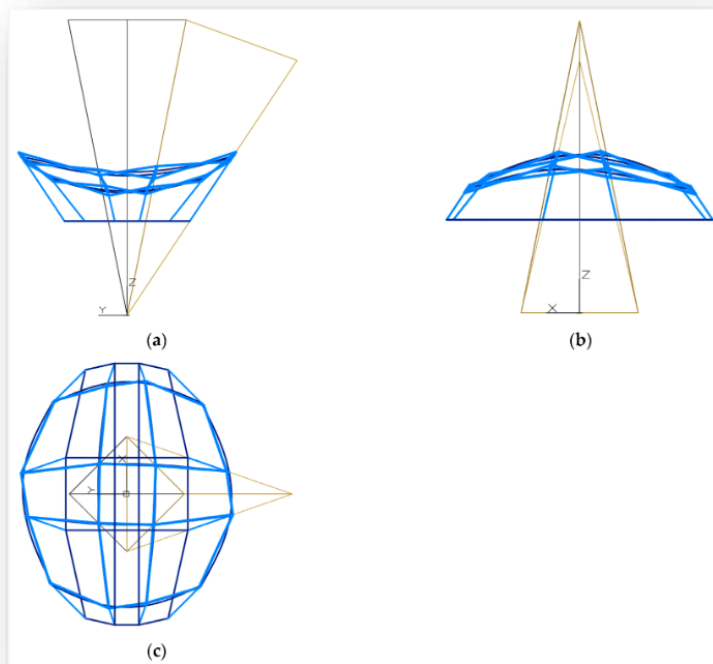
Tabela 5. Współrzędne punktów definiujących powierzchnię odniesienia ω_1 pierwszej struktury Σ_1 [Załącznik A1].

Punkt	Współrzędna x [mm]	Współrzędna y [mm]	Współrzędna z [mm]
S_{A11}	5354.1	4645.9	23,228.7
S_{B11}	-5221.6	-4778.5	23,892.5
S_{C11}	5107.3	-4892.7	24,463.6
S_{D11}	5107.3	4892.7	24,463.6
S_{A12}	-5221.6	-4778.5	23,892.5
S_{B12}	-3748.6	-18,000.2	26,980.8
S_{C12}	3826.3	-17,776.5	26,645.6
S_{D12}	5107.3	-4892.7	24,463.6
S_{A21}	-19,413.7	3257.6	20,899.9
S_{B21}	-19,366.8	-3273.9	20,970.3
S_{C21}	-5221.6	-4778.5	23,892.5
S_{D21}	-5354.1	4645.9	23,228.7
S_{A22}	-19,366.8	-3273.9	20,970.3
S_{B22}	-15,836.3	-12,957.2	23,184.0
S_{C22}	-3748.6	-18,000.2	26,980.8
S_{D22}	-5221.6	-4778.5	23,892

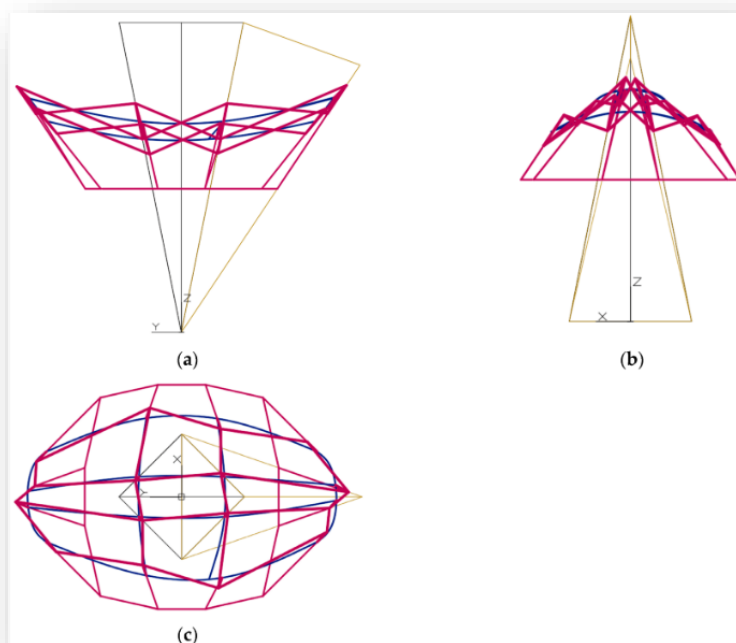
Kolejnym krokiem w algorytmie procedury jest określenie położenia wierzchołków A_{11} , B_{11} , C_{11} i D_{11} pierwszego oczka B_{v11} siatki wielokątów B_{v1} . Dla ukształtowanej formy (Rysunek 16) przyjęłam odpowiednie wartości współczynników dd_{A11} , dd_{B11} , dd_{C11} i dd_{D11} wierzchołków siatki Γ_{11} o A_{11} , B_{11} , C_{11} i D_{11} . Wartości te podałam poniżej w Tabeli 6 [Załącznik A1].

Tabela 6. Współrzędne wierzchołków A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} , D_{ij} (dla $i, j = 1, 2$) siatki krawędzi okapu B_{v1} (i pierwszej struktury Σ_1). [Załącznik A1].

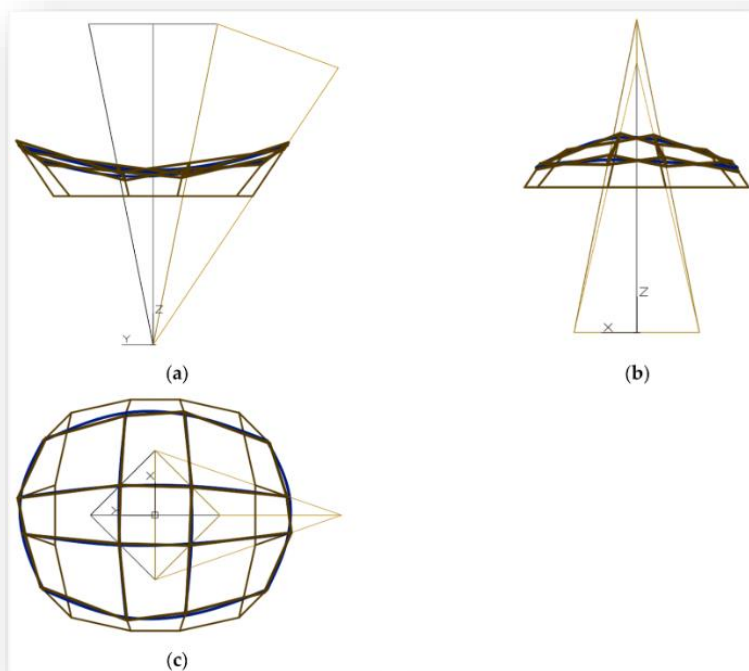
Punkt	Współrzędna x [mm]	Współrzędna y [mm]	Współrzędna z [mm]
A_{11}	-5200,3	4799,7	23,998.5
B_{11}	-5375.4	-4624,6	23,122.8
C_{11}	5000	-5000	25,000
D_{11}	5261.2	4738.8	23,693.8
A_{12}	Xb_{11}	Yb_{11}	Zb_{11}
B_{12}	-3748,6	-18 000,2	26,980.8
C_{12}	4002.5	-17,2693	25,885.2
D_{12}	Xc_{11}	yc_{11}	zc_{11}
A_{21}	-19 849,7	3106.2	20,246.4
B_{21}	-18 930,8	-3425,3	21,623.8
C_{21}	Xb_{11}	Yb_{11}	Zb_{11}
D_{21}	Xa_{11}	Ya_{11}	zA_{11}
A_{22}	Xb_{21}	Yb_{21}	Zb_{21}
B_{22}	-16 258,5	-12 535,1	22,651.6
C_{22}	Xb_{12}	Yb_{12}	Zb_{12}
D_{22}	Xb_{11}	Yb_{11}	Zb_{11}



Rysunek 16. Zaprojektowana sieć referencyjna, pierwsza sieć okapowa wraz z pierwszą złożoną strukturą budynku: a) widok z przodu, b) widok z tyłu, c) widok z góry [Załącznik A1].



Rysunek 17. Zaprojektowana sieć referencyjna, druga sieć okapowa wraz z drugą złożoną strukturą budynku: a) widok z przodu, b) widok z tyłu, c) widok z góry [Załącznik A1].



Rysunek 18. Zaprojektowana sieć referencyjna, trzecia sieć okapowa wraz z trzecią złożoną strukturą budynku: a) widok z przodu, b) widok z tyłu, c) widok z góry [Załącznik A1].

Na podstawie tej samej sieci referencyjnej Γ utworzyłam trzy przykładowe formy Σ (Rysunek 16, 17, 18). Wykonałam dokładny opis tworzenia tych trzech form. Opis ten, jak również przyjęte współrzędne oraz współczynniki podziału zawarłam w Załączniku A1.

6.2.3 Wnioski

Wspólnie z promotorem opracowałam innowacyjną procedurę pozwalającą na parametryczne modelowanie niekonwencjonalnych form budowlanych o skomplikowanych giętych elewacjach, jak również o wielosegmentowej przekształconej konstrukcji dachu powłokowego. Oryginalnymi cechami opracowanej procedury są:

- ułożenie wielu przekształconych powłok konstrukcji dachu w przestrzeni trójwymiarowej zgodnie z właściwościami regularnej powierzchni siodłowej o ujemnej krzywiznie Gaussa,

- uzyskanie różnych nachyleń ścian elewacji względem pionu, w tym na zewnątrz i wewnątrz tego samego budynku [Załącznik A1].

Algorytm przedstawiłam na trzech konkretnych przykładach z zachowaniem odpowiednich proporcji pomiędzy odległościami wszystkich charakterystycznych wierzchołków elewacji, ścian i dachów. Procedura ta daje projektantowi możliwość uwzględnienia pewnych zależności, wyznaczających wzajemne zależności między odległościami kolejnych wierzchołków projektowanej sieci referencyjnej. Następnie na podstawie utworzonych sieci referencyjnej za pomocą współczynników podziału zdefiniowałam wierzchołki sieci okapowej, wyznaczając układ i formę wszystkich wielosegmentowych powłok. Zakresy zmienności zostały zdefiniowane po to, by można było stworzyć kilka konkretnych typów rozważanych form budowlanych [Załącznik A1].

6.3 Publikacja 2

„Unconventional building forms roofed with innovative structures arranged on regular surfaces with the negative Gaussian curvature” – Załącznik A4 [17-94].

Celem tej publikacji jest analiza możliwości kształtowania niekonwencjonalnych form budynków składanych, a w szczególności ich złożonych wielopłaszczyznowych fasad i wielopowłokowych dachów. Segmenty pojedynczych powłok rozmieszczone są w przestrzeni trójwymiarowej, względem regularnych powierzchni z ujemną krzywizną Gaussa. Dzięki tej analizie przedstawiono innowacyjną metodę, która polega na poszukiwaniu modeli obliczeniowych typów pomocniczych wielościennych sieci referencyjnych i wielościennych sieci okapowych [Załącznik A4].

Algorytm, opracowany przez promotora, różni się od innych dotąd stosowanych algorytmów, ponieważ charakterystyczne wierzchołki opracowanych modeli są umieszczone pomiędzy wierzchołkami referencyjnej sieci wielościennej. W wyniku dokonanej przeze mnie modyfikacji w sposobie definiowania współczynników podziału krawędzi referencyjnej wielościennej sieci, algorytm pozwala na rozmieszczenie wielu ścian elewacji i wielu jednostek powłoki dachu w stosunku do wierzchołków wielościennej sieci referencyjnej przy użyciu odpowiednich dyskretnych wartości współczynników podziału. Współczynniki te określają przyjęte proporcje między odległościami odpowiednich wierzchołków wielobocznej sieci okapów, a odległościami

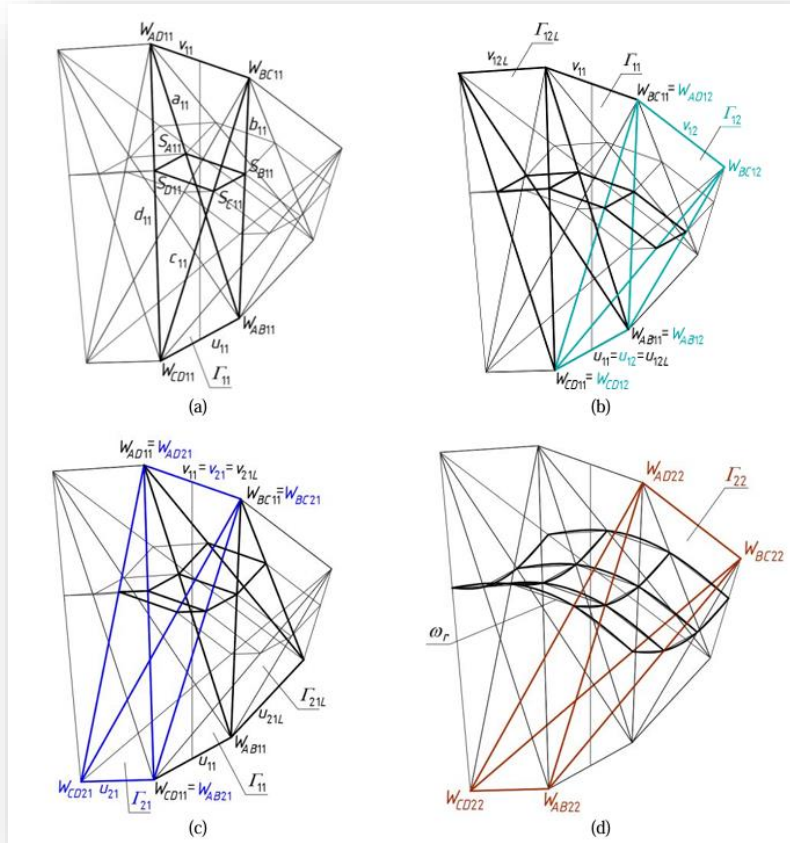
wybranych par wierzchołków sieci wielościanów referencyjnej. Proponowana metoda została przeze mnie szczegółowo opisana na kilku konkretnych opracowanych przeze mnie przykładach. Wraz z promotorem przedstawiłam kilka różnych form, które można uzyskać za pomocą tej procedury, aby zademonstrować szeroki zakres możliwości oferowanych przez tę metodę [Załącznik A4].

Algorytm prezentowanej metody jest wspierany przez autorski program komputerowy napisany w języku programowania AutoLISP, specjalnie zaprojektowany dla edytora graficznego AutoCAD. Każdy obiekt CAD zbudowany za pomocą tego program może być wykorzystany jako geometryczny model budynku, który jest pomocny w kształtowaniu jego układu konstrukcyjnego [Załącznik A4].

6.3.1 Metodologia

Tworzenie każdej sieci wielościanów składającej się z szeregu odpowiednio ułożonych czworościanów rozpoczęłam od utworzenia pierwszego centralnego czworościanu Γ_{11} , zdefiniowanego przez cztery dowolne punkty W_{AB11} , W_{CD11} , W_{AD11} i W_{BC11} , które służą jako wierzchołki (Rysunek 19a). Położenie wierzchołków określiłam za pomocą dwóch dowolnych ukośnych prostych u_{11} i v_{11} , które są do siebie prostopadłe. Określiłam dowolną odległość d_{uv11} między u_{11} i v_{11} mierzoną wzdłuż linii prostej prostopadłej do u_{11} i v_{11} . Aby zdefiniować pozycje czterech wierzchołków W_{AB11} , W_{CD11} , W_{AD11} i W_{BC11} na u_{11} i v_{11} , odległość d_{u11} między W_{BC11} , a W_{AD11} określiłam odległość d_{v11} między W_{AB11} , a W_{CD11} . Kolejne czworościenne siatki Γ_{ij} z Γ umieściłam w dwóch ortogonalnych kierunkach Γ_{11} , zgodnie z kierunkami osi v_{11} , v_{12} i v_{12L} (Rysunek 19b) oraz osi u_{11} , u_{21} i u_{21L} (Rysunek 19c) w następujący sposób: dla czworościanu Γ_{12} , jego trzy wierzchołki są identyczne z wierzchołkami W_{AB11} , W_{CD11} i W_{BC11} czworościanu Γ_{12} . Oś u_{12} siatki Γ_{12} jest również identyczna z u_{11} . Położenie czwartego wierzchołka W_{BC12} siatki Γ_{12} (który nie należy do Γ_{11} i definiuje oś v_{12}) określiłam tak, aby znajdował się on w pierwszej płaszczyźnie symetrii Γ_{11} , oddalony od W_{BC11} przez przyjętą wartość d_{v12} i oddalony od osi u_{11} o wysokość d_{BC11} trójkąta $W_{BC11}W_{CD11}W_{AB11}$. Trzeci czworościan Γ_{12L} jest symetryczny do Γ_{12} względem drugiej płaszczyzny symetrii Γ_{11} . Druga płaszczyzna symetrii Γ_{11} określiłam przez punkty W_{AD11} , W_{BC11} i punkt środkowy odcinka

$W_{AB11}W_{CD11}$. Pierwsza płaszczyzna symetrii Γ_{11} jest określona przez punkty W_{AB11} , W_{CD11} i punkt środkowy odcinka $W_{AD11}W_{BC11}$ [Załącznik A4].

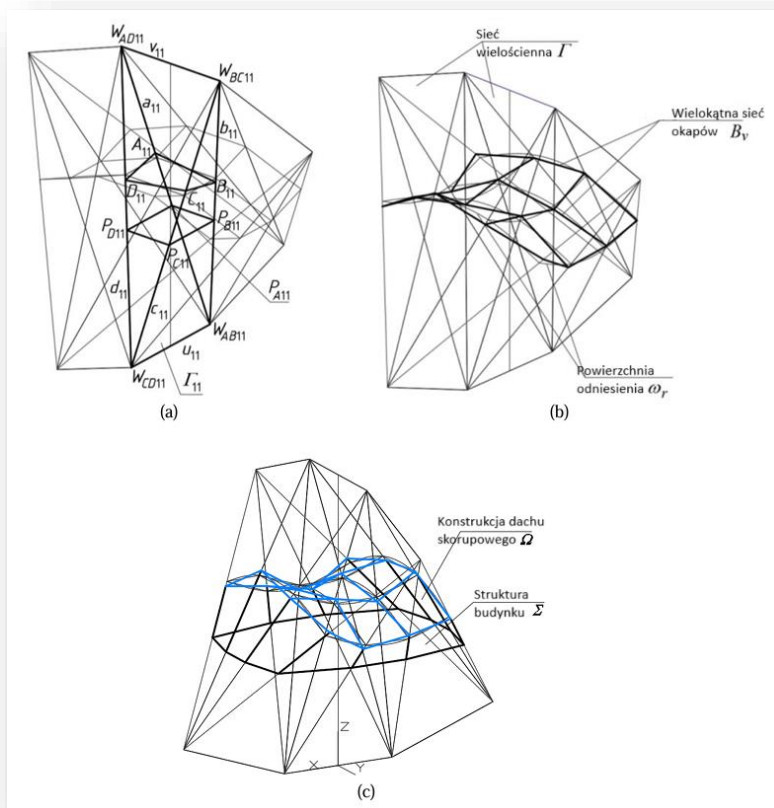


Rysunek 19. Główne kroki w kształtowaniu wielościennej sieci referencyjnej i powierzchni Γ i powierzchni odniesienia ω są następujące: a) pierwszy czworościan Γ_{11} z Γ , b) pierwszy ortogonalny pasek Γ_{ij} zawierający drugi czworościan Γ_{12} z Γ , c) drugi ortogonalny pasek Γ_{i1} zawierający kolejny czworościan Γ_{21} z Γ , d) powierzchnia odniesienia ω_r i czworościan ukośny Γ_{22} z Γ [Załącznik A4].

Sieć wielościenne Γ przedstawiona na Rysunkach 19-20 składa się z czterech symetrycznych części Γ_k ($k = 1$ do 4), gdzie pierwsza ćwiartka Γ_1 składa się z Γ_{ij} ($i, j = 1$ do 2). Na podstawie symetrycznej sieci referencyjnej Γ , utworzyłam specyficzną wielokątną sieć okapów B_v w celu zdefiniowania wielopowłokowej konstrukcji dachu Σ . Zbiór $\{dds_{Aij}, dds_{Bij}, dds_{Cij}$ i $dds_{Dij}\}$ współczynników podziału jest używany do określenia pozycji punktów S_{Aij} , S_{Bij} , S_{Cij} i S_{Dij} znajdujących się na krawędziach bocznych

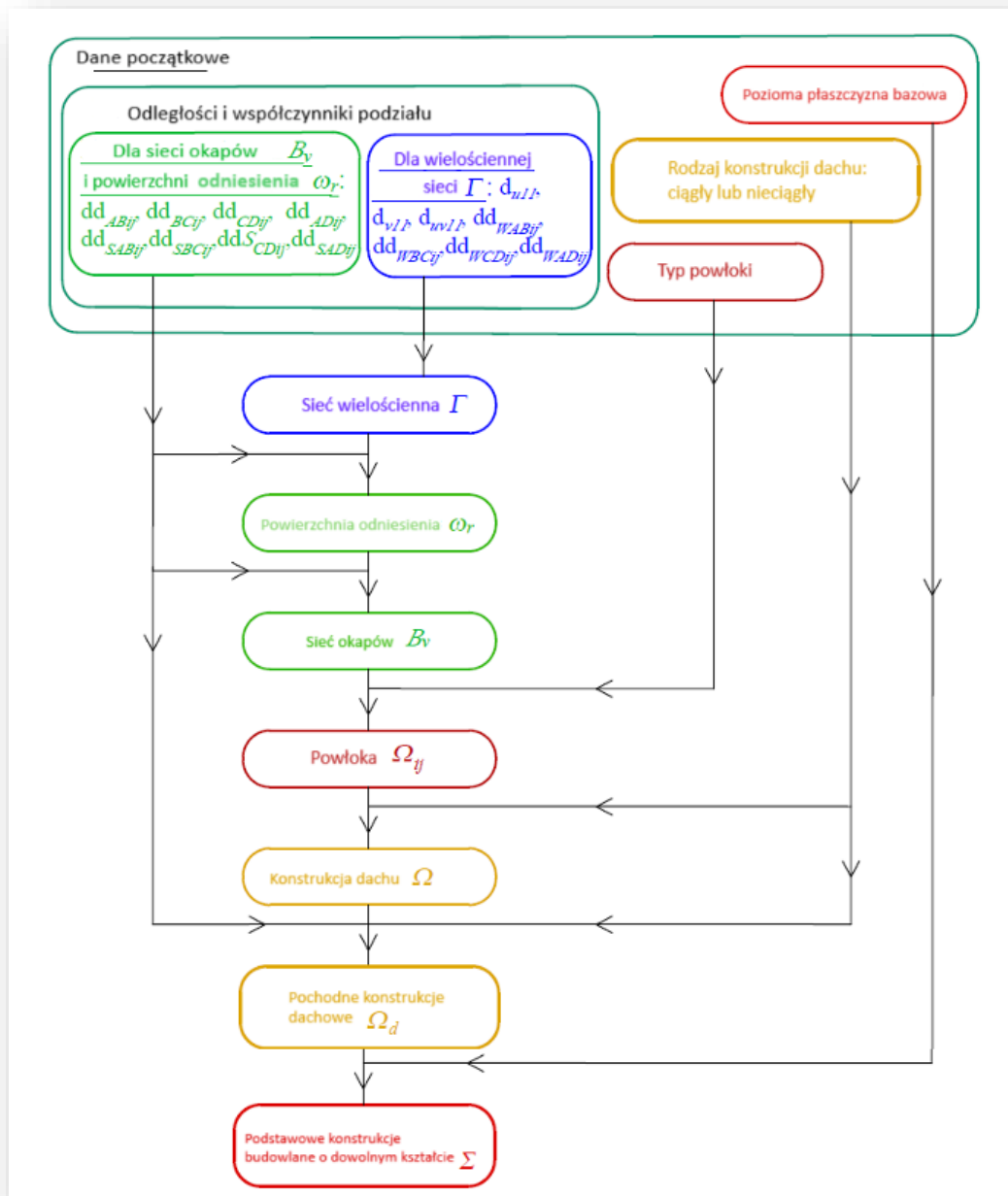
i definiujących powierzchnię odniesienia ω_r . Aby wyszukać sieć B_v , wykorzystałam inny zestaw $\{dd_{Aij}, dd_{Bij}, dd_{Cij}$ i $dd_{Dij}\}$ współczynników podziału do zdefiniowania pozycji punktów A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} i D_{ij} na krawędziach bocznych Γ . Punkty te stanowią wierzchołki sieci B_v , Rysunek 20 a-c [Załącznik A4].

Parametryzacja powinna skutkować podziałem pożądaných form na kilka odrębnych grup o podobnych właściwościach geometrycznych. Ponieważ zastosowana metoda parametryzacji polega na zdefiniowaniu zestawu współczynników podziału, które wyrażają proporcje między odległościami wierzchołków kolejno tworzonych siatek Γ_{ij} ważne jest, aby uwzględnić odpowiadające proporcje między długościami osi kolejnych siatek [Załącznik A4].



Rysunek 20. Etapy kształtowania całej konstrukcji budynku Σ : a) referencyjna sieć wielościenne Γ , b) sieć B_v i powierzchnia odniesienia ω , c) konstrukcja dachu powłokowego Ω [Załącznik A4].

Podstawy tworzonych form są płaskie i poziome. Arbitralny poziom każdej podstawy P_b należy do przedziału $\langle 0, d_{uv11} \rangle$. Pozycje wszystkich punktów P_{Aij} , P_{Bij} , P_{Cij} i P_{Dij} każdej podstawy, należących do krawędzi ścian elewacji, uzyskałam w wyniku przecięcia płaszczyzny P_b ze wszystkimi krawędziami bocznymi Γ . Metodologię badania (opracowaną przeze mnie wraz z promotorem) kształtowania niekonwencjonalnych form budynków składanych przedstawiłam na Rysunku 21 [Załącznik A4].



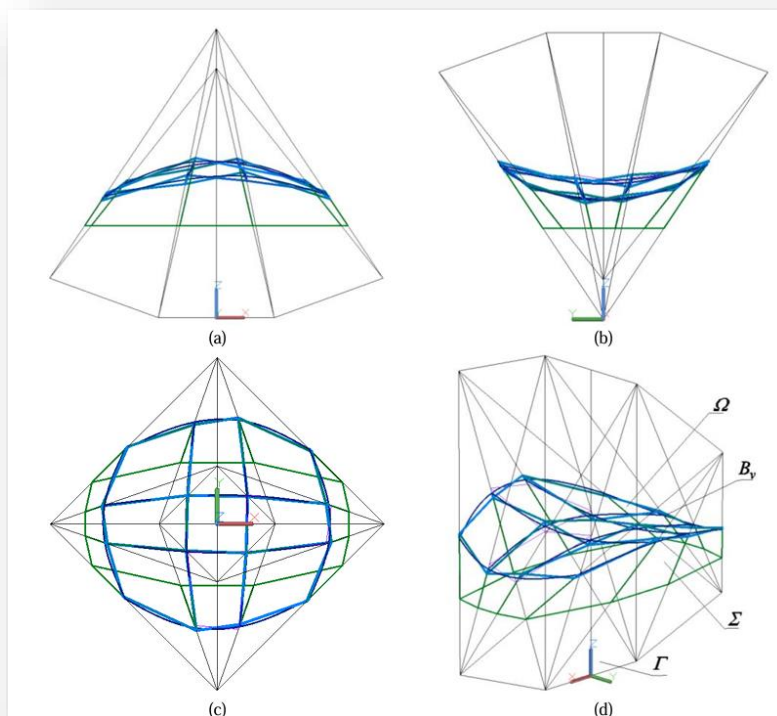
Rysunek 21. Metodologia badania opracowana wspólnie z promotorem [Załącznik A4].

Dla badanych wierzchołków ω_r , B_v i Σ wszystkie dopuszczalne wartości z powyższych wymienione dwa rodzaje współczynników podziału pobrałam z zakresu (0,1). Ponadto, arbitralna powierzchnia odniesienia ω_r zdefiniowana przez wszystkie tetrazy punktów S_{Aij} , S_{Bij} , S_{Cij} i S_{Dij} musi mieć ujemną krzywiznę Gaussa. To założenie skutkuje specyfiką właściwości geometrycznych B_v i Σ dowodzące innowacyjnego charakteru przeprowadzonej analizy i opracowanej procedury. Konstrukcje powłokowe dachu Σ skonstruowane za pomocą tej metody nazywane są złożonymi podstawowymi powłokami i charakteryzują się ciągłością całej złożonej powłoki dachu [Załącznik A4].

W ogólnym przypadku niektóre konstrukcje dachowe są tworzone w taki sposób, że ich siatki nie mają wspólnych boków lub wierzchołków. Właściwość ta jest charakterystyczna dla konstrukcji dachowych wywodzących się z wcześniej wymienionych podstawowych. Struktury te zostaną utworzone w dalszej części na kilku konkretnych przykładach. Konstrukcje dachowe utworzone w ten sposób nazywane są złożonymi pochodnymi konstrukcjami dachowymi. Charakteryzują się one wieloma obszarami nieciągłości między ich jednostkami powłok. Puste przestrzenie między sektorami mogą być przeznaczone na otwory okienne [Załącznik A4].

6.3.2 Wyniki

Algorytm metody przedstawiłam na powyższych przykładach parametrycznego modelowanie różnych złożonych form dachów pokrytych ciągłymi i nieciągłymi strukturami powłokowymi przy użyciu tej samej referencyjnej sieci wielościennej Γ . Pierwszym parametrem użytym do zdefiniowania Γ jest odległość d_{v11} dwóch wierzchołków osi v_{11} . Drugim jest stosunek d_{duv11} odległości d_{uv11} między osiami skośnymi u_{11} i v_{11} oraz d_{v11} . Trzecim parametrem jest stosunek d_{du11} odległości d_{u11} dwóch wierzchołków osi u_{11} do d_{v11} . Wartości wszystkich podobnych parametrów, które definiują wszystkie czworokienne siatki Γ_{1j} i Γ_{i1} strony należące do dwóch ortogonalnych pasów Γ są równe odpowiednio 20 000mm, 5 i 1 [Załącznik A4].



Rysunek 22. Zaprojektowana sieć referencyjna Γ i sieć okapowa B_v podstawowego złożonego budynku Σ : a) widok z przodu, b) widok z boku, c) widok z góry, d) widok aksonometryczny [Załącznik A4].

Współrzędne wierzchołków badanej sieci Γ , które przedstawiłam na Rysunku 22 w ortogonalnym układzie współrzędnych $[x, y, z]$ podałam w Tabeli 7. Opublikowane wartości odnoszą się do jednej czwartej Γ_1 symetrycznej sieci Γ , znajdującej się pomiędzy głównymi płaszczyznami (x, z) i (y, z) [Załącznik A4].

Tabela 7. Współrzędne wierzchołków W_{ABij} , W_{CDij} , W_{ADij} , W_{BCij} (dla $i,j=1,2$) wielościennej sieci referencyjnej Γ_1 [Załącznik A4].

Wierzchołek	Współrzędna x [mm]	Współrzędna y [mm]	Współrzędna z [mm]
W_{AB11}	-10,000	0	0
W_{CD11}	10,000	0	0
W_{AD11}	0	-10,000	50,000
W_{BC11}	0	10,000	50,000
W_{AB12}	-10,000	0	0
W_{CD12}	10,000	0	0
W_{AD12}	0	10,000	50,000
W_{BC12}	0	28,793	43,160
W_{AB21}	10,000	0	0
W_{CD21}	28,793	0	6,840
W_{AD21}	-10,000	0	50,000
W_{BC21}	10,000	0	50,000
W_{AB22}	10,000	0	0
W_{CD22}	28,793	0	6,840
W_{AD22}	0	10,000	50,000
W_{BC21}	0	28,793	43,160

Podczas kolejnego kroku algorytmu, pozycje kolejnych tetrad wierzchołków S_{Aij} , S_{Bij} , S_{Cij} i S_{Dij} powierzchni odniesienia ω_r , znajdujących się na krawędziach bocznych Γ , zdefiniowałam za pomocą współczynników podziału dds_{Aij} , dds_{Bij} , dds_{Cij} i dds_{Dij} . Przyjęte wartości tych współczynników podziału, przyjęte dla przykładowej podstawowej struktury ciągłej, pokazanej na Rysunku 22a-d, podałam w Tabeli 8 [Załącznik A4].

Tabela 8. Dane początkowe – współczynniki podziału określające pozycje punktów S_{Aij} , S_{Bij} , S_{Cij} i S_{Dij} powierzchni referencyjnej ω_r dla $i,j=1,2$ [Załącznik A4].

Stosunek	Wartość
dd_{SA11}	0.478
dd_{SB11}	0.478
dd_{SC11}	0.489
dd_{SD11}	0.489
dd_{SA12}	0.478
dd_{SB12}	0.612
dd_{SC12}	0.623
dd_{SD12}	0.489
dd_{SA21}	0.489
dd_{SB21}	0.489
dd_{SC21}	0.332
dd_{SD21}	0.332
dd_{SA22}	0.489
dd_{SB22}	0.623
dd_{SC22}	0.332
dd_{SD22}	0.332

Powyższe wartości odnoszą się do jednej symetrycznej ćwiartki ω_r zawartej w podprzestrzeni ograniczonej płaszczyznami (x, z) i (y, z) zdefiniowanymi przez dodatnie sensory osi x i y . Wartości wyróżnionych punktów tej ćwiartki ω_r są opublikowane w Tabeli 9 [Załącznik A4].

Tabela 9. Współrzędne wybranych punktów definiujących powierzchnię odniesienia ω_r dla $i,j=1,2$ [Załącznik A4].

Punkty	Współrzędna x [mm]	Współrzędna y [mm]	Współrzędna z [mm]
S_{D11}	5,107.3	-4,892.7	24,463.6
S_{C11}	5,107.3	4,892.7	24,463.6
S_{B11}	-5,221.5	4,778.5	23,892.6
S_{A11}	-5,221.5	-4,778.5	23,892.6
S_{D12}	5,107.3	4,892.7	24,463.6
S_{C12}	3,772.1	17,932.4	26,879.2
S_{B12}	-3,880.6	17,620.2	26,411.2
S_{A12}	-5,221.5	4,778.5	23,892.6
S_{D21}	19,237.5	-3,318.8	21,164.1
S_{C21}	19,224.6	3,323.3	21,183.4
S_{B21}	5,107.3	4,892.7	24,463.6
S_{A21}	5,107.3	-4,892.7	24,463.6
S_{D22}	19,224.6	3,323.3	21,183.4
S_{C22}	15,836.3	12,957.2	23,184.0
S_{B22}	3,772.1	17,932.4	26,879.2
S_{A22}	5,107.3	4,892.7	24,463.6

W kolejnym kroku algorytmu metody położenia wierzchołków A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} and D_{ij} kolejnych siatek B_{vij} z B_v , które definiują projektowaną powłokę dachu Ω , określiłam przy użyciu odpowiednich współczynników podziału $dd_{A_{ij}}$, $dd_{B_{ij}}$, $dd_{C_{ij}}$ and $dd_{D_{ij}}$. Wartości współczynników podziału zastosowałam dla badanej konstrukcji podstawowej Σ pokrytej dachem Ω , jak przedstawiłam na Rysunku 22a-d, wymieniłam w Tabeli 10. Współrzędne wierzchołków A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} and D_{ij} rozwiniętego B_v podałam w Tabeli 11 [Załącznik A4].

Tabela 10. Wartość współczynników podziału zastosowane do obliczenia współrzędnych wierzchołków podstawowej struktury Ω_1 dla $i,j=1,2$ [Załącznik A4].

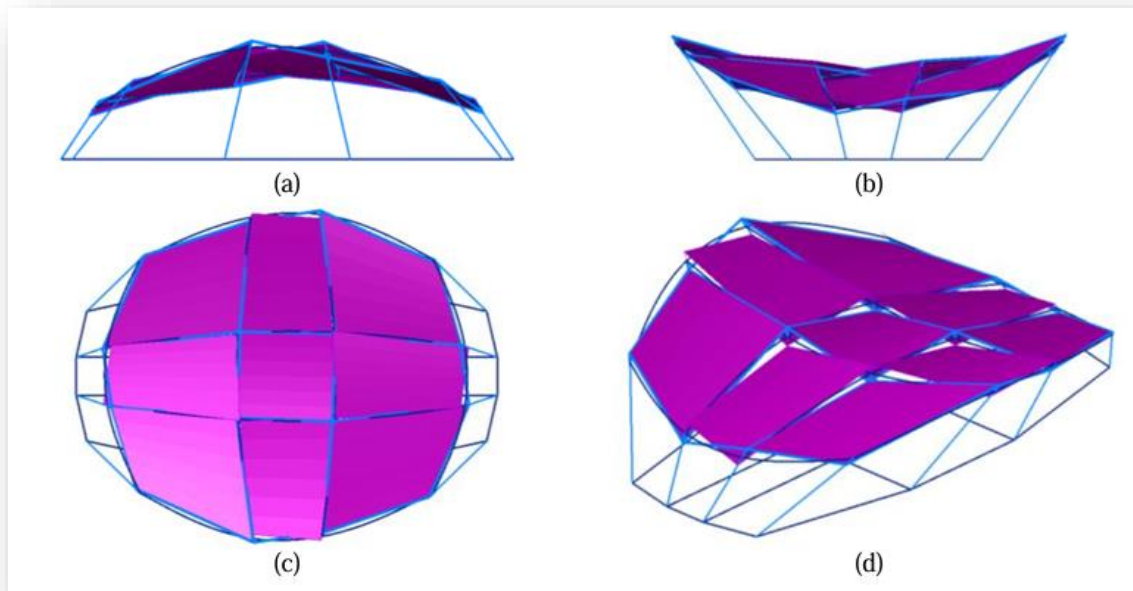
Stosunek	Wartość
dd_{D11}	0.505
dd_{C11}	0.474
dd_{B11}	0.493
dd_{A11}	0.462
dd_{D12}	0.474
dd_{C12}	0.638
dd_{B12}	0.597
dd_{A12}	0.493
dd_{D21}	0.317
dd_{C21}	0.347
dd_{B21}	0.474
dd_{A21}	0.505
dd_{D22}	0.347
dd_{C22}	0.435
dd_{B22}	0.638
dd_{A22}	0.474

Tabela 11. Współrzędne wierzchołków A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} , D_{ij} (dla $i,j=1,2$) struktury podstawowej Ω_1 dla $i,j=1,2$ [Załącznik A4].

Punkt	Współrzędna x [mm]	Współrzędna y [mm]	Współrzędna z [mm]
D_{11}	4,953.3	-5,046.7	25,233.4
C_{11}	5,261.2	4,738.8	23,693.8
B_{11}	-5,067.5	4,932.5	24,662.4
A_{11}	-5,375.4	-4,624.6	23,122.8
D_{12}	5,261.2	4,738.8	23,693.8
C_{12}	3,620.7	18,368.4	27,532.7
B_{12}	-4,032.0	17,184.3	25,757.8
A_{12}	-5,067.5	4,932.5	24,662.4
D_{21}	19,673.4	-3,167.4	20,510.6
C_{21}	18,788.6	3,474.7	21,836.9
B_{21}	5,261.2	4,738.8	23,693.8
A_{21}	4,953.3	-5,046.7	25,233.4
D_{22}	18,788.6	3,474.7	21,836.9
C_{22}	16,258.5	12,535.1	22,651.5
B_{22}	3,620.7	18,368.4	27,532.7
A_{22}	5,261.2	4,738.8	23,693.8

Następnie utworzyłam dwie nieciągłe struktury dachu Ω_{d1} i Ω_{d2} .

Cztery wierzchołki, które należą do czterech sąsiadujących oczek B_{vij} , B_{vij+1} , B_{vi+1j} i $B_{vi+1j+1}$ sieci B_v (struktura Ω) podzieliłam na pary, gdzie dwa wierzchołki z przeciwległych oczek B_{vij} i $B_{vi+1j+1}$ (sektory powłoki Ω_{ij} i $\Omega_{vi+1j+1}$) w ukośnym pasie są przesunięte na przeciwną stronę powierzchni ω_r w porównaniu do pozycji innych dwóch stacjonarnych wierzchołków należących do innych oczek B_{vij+1} i B_{vi+1j} (sektory Ω_{vij+1} i Ω_{vi+1j}). Te stacjonarne wierzchołki należą do oczek zawartych w innym ukośnym pasie B_v (Ω). To działanie wykonałam dla wszystkich wspólnych wierzchołków B_v (Ω). W wyniku tej modyfikacji uzyskałam pierwszą strukturę, która przedstawiłam na Rysunku 23a-d [Załącznik A4].



Rysunek 23. Zaprojektowana sieć referencyjna Γ i sieć okapowa B_{vd1} pierwszej złożonej pochodnej, struktura nieciągła Σ_{d1} : a) widok z przodu, b) widok z boku, c) widok z góry, d) widok aksonometryczny [Załącznik A4].

W wyniku przesunięcia wszystkich zestawów wierzchołków należących do sąsiednich oczek B_v wzdłuż odpowiedniej krawędzi bocznej Γ , w nieciągłej strukturze dachu powstają trójkątne płaskie obszary nieciągłej konstrukcji dachu Ω_{d1} (sieć B_{vd1}), umożliwiając dostęp światła słonecznego do wnętrza projektowanego budynku. Zróżnicowanie pozycji wierzchołków, należących do sąsiednich oczek B_{vd1} (Ω_{d1})

i znajdujących się na tej samej krawędzi bocznej Γ , osiągnęłam poprzez odpowiednie dostosowanie wartości współczynników podziału związanych z wierzchołkami B_{vd1} i ω_r . Zastosowane wartości współczynników podziału przedstawiłam w Tabeli 12 [Załącznik A4].

Tabela 12. Wartości współczynników podziału definiujących współrzędne wierzchołków pierwszej struktury pochodnej Ω_{d1} dla $i,j=1,2$ [Załącznik A4].

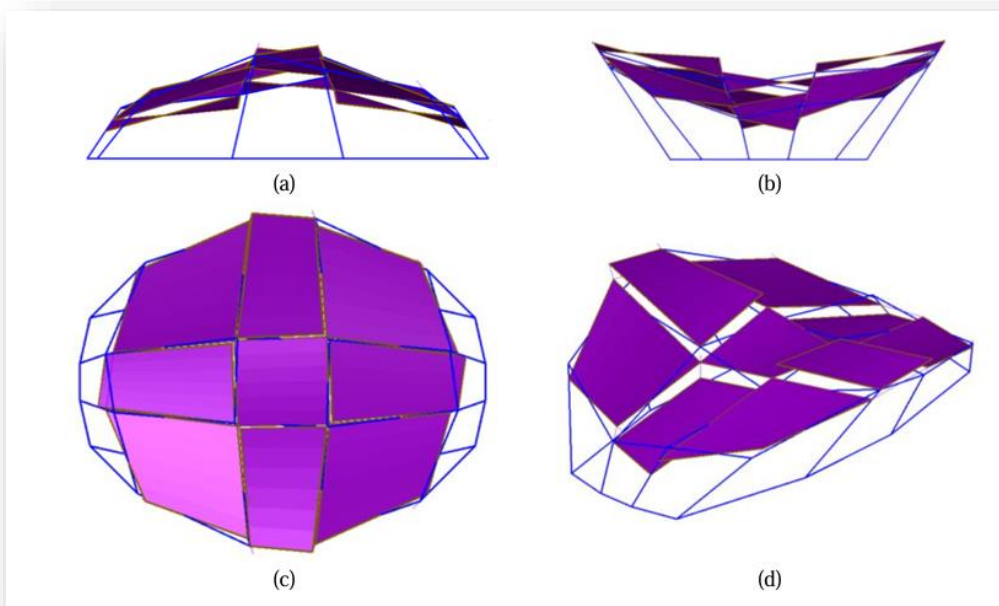
Stosunek	Wartość
dd_{D11}	0.493
dd_{C11}	0.462
dd_{B11}	0.505
dd_{A11}	0.474
dd_{D12}	0.462
dd_{C12}	0.640
dd_{B12}	0.602
dd_{A12}	0.505
dd_{D21}	0.347
dd_{C21}	0.317
dd_{B21}	0.505
dd_{A21}	0.474
dd_{D22}	0.343
dd_{C22}	0.435
dd_{B22}	0.640
dd_{A22}	0.462

Współrzędne wierzchołków A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} i D_{ij} modelu Ω_{d1} , które otrzymałam na podstawie współczynników z Tabeli 12 podałam w Tabeli 13 [Załącznik A4].

Tabela 13. Współrzędne wierzchołków A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} i D_{ij} (dla $i, j = 1, 2$) pierwszej pochodnej struktury Ω_{d1} [Załącznik A4].

Wierzchołek	Współrzędna x [mm]	Współrzędna y [mm]	Współrzędna z [mm]
A_{11}	-5,375.4	-4,624.6	23,122.8
B_{11}	-5,067.5	4,932.5	24,662.4
C_{11}	5,261.2	4,738.8	23,693.8
D_{11}	4,953.3	-5,046.7	25,233.4
A_{12}	-5,375.4	4,624.6	23,122.8
B_{12}	-3,729.2	18,056.2	27,064.7
C_{12}	3,923.5	17,496.5	26,225.8
D_{12}	4,953.3	5,046.7	25,233.4
A_{21}	5,261.2	-4,738.8	23,693.8
B_{21}	4,953.3	5,046.7	25,233.4
C_{21}	19,660.5	3,171.9	20,530.0
D_{21}	18,801.5	-3,470.2	21,817.5
A_{22}	5,261.2	4,738.8	23,693.8
B_{22}	3,620.7	18,368.4	27,532.7
C_{22}	16,258.5	12,535.1	22,651.5
D_{22}	18,788.6	3,474.7	21,836.9

Druga nieciągła struktura Ω_{d2} , wywodząca się z oryginalnej struktury ciągłej struktury Ω , uzyskałam poprzez przesunięcie wierzchołków wszystkich sektorów powłoki Ω_{i1} i Ω_{ij} z Ω znajdujących się w dwóch ortogonalnych pasach względem centralnego sektora Ω_{11} wzdłuż bocznych krawędzi Γ , jak pokazałam na Rysunku 24a-d. Wierzchołki ukośnie położonych sektorów powłoki nie zmieniają swojego położenia [Załącznik A4].



Rysunek 24. Sieć referencyjna Γ i sieć okapowa B_{vd2} drugiej złożonej pochodnej, struktura nieciągła Σ_{d2} : a) widok z przodu, b) widok z boku, c) widok z góry, d) widok aksonometryczny [Załącznik A4].

Charakterystyczną cechą struktury drugiej nieciągłej pochodnej Σ_{d2} jest to, że sektory Ω_{1j} jednego z ortogonalnych pasków są przesunięte powyżej powierzchni odniesienia ω_r , podczas gdy sektory drugiego ortogonalnego pasma Ω_{i1} są przesunięte poniżej powierzchni ω_r . Wynik przesunięcia wybranych sektorów Ω_{i1} i Ω_{1j} wzdłuż bocznych krawędzi Γ wynika z założenia odpowiednich różnic w wartościach współczynników podziału związanych z wierzchołkami B_v i punktami ω_r . Wartości tych współczynników przedstawiłam w Tabeli 14 [Załącznik A4].

Tabela 14. Wartości współczynników podziału definiujących współrzędne wierzchołków drugiej struktury pochodnej Ω_{d2} dla $i,j = 1,2$ [Załącznik A4].

Stosunek	Wartość
dd_{D11}	0.462
dd_{C11}	0.493
dd_{B11}	0.475
dd_{A11}	0.505
dd_{D12}	0.458
dd_{C12}	0.640
dd_{B12}	0.391
dd_{A12}	0.505
dd_{D21}	0.317
dd_{C21}	0.287
dd_{B21}	0.474
dd_{A21}	0.443
dd_{D22}	0.312
dd_{C22}	0.465
dd_{B22}	0.610
dd_{A22}	0.493

Współrzędne wierzchołków należących do Ω_{d2} (B_{vd2}) podałam poniżej w Tabeli 15 [Załącznik A4].

Tabela 15. Współrzędne wierzchołków A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} i D_{ij} (dla $i, j = 1, 2$) należących do drugiej struktury pochodnej Ω_{d2} [Załącznik A4].

Wierzchołek	Współrzędna x [mm]	Współrzędna y [mm]	Współrzędna z [mm]
A_{11}	-5,067.5	-4,932.5	24,662.4
B_{11}	-5,375.4	4,624.6	23,122.8
C_{11}	4,953.3	5,046.7	25,233.4
D_{11}	5,261.2	-4,738.8	23,693.8
A_{12}	-5,067.5	4,932.5	24,662.4
B_{12}	-3,426.3	18,928.1	28,371.6
C_{12}	3,620.7	18,368.4	27,532.7
D_{12}	4,645.4	5,354.6	26,773.0
A_{21}	5,569.2	-4,430.8	22,154.2
B_{21}	5,261.2	4,738.8	23,693.8
C_{21}	20,532.4	2,869.0	19,223.0
D_{21}	19,673.4	-3,167.4	20,510.6
A_{22}	4,953.3	5,046.7	25,233.4
B_{22}	3,923.5	17,496.5	26,225.8
C_{22}	15,414.2	13,379.4	23,716.5
D_{22}	19,660.5	3,171.9	20,530.0

6.3.3 Wnioski

Algorytm metody przedstawionej powyżej umożliwia wyznaczenie innowacyjnych podstawowych żebrowanych ciągłych i pochodnych nieciągłych powłokowych konstrukcji dachowych. Procedurę tej metody przedstawiłam na trzech konkretnych przykładach parametrycznych form budowlanych, sterowanych określonymi zestawami współczynników podziału. Omówiłam także zakresy zmienności tych współczynników w celu stworzenia kilku konkretnych typów nowatorskich form budynków. Ponadto omówiłam główne zależności położenia wszystkich wierzchołków sieci wielościanów Γ , sieci okapów B_v (struktura powłoki Ω) oraz wartości przypisane tym wierzchołkom jako współczynniki podziału [Załącznik A4].

Cechą charakterystyczną prezentowanej metody jest to, że wierzchołki projektowanych modułów dachowych są generowane przy użyciu współczynników podziału, które przyjmują wartości z zakresu (0,1) w stosunku do wierzchołków referencyjnych sieci wielościanów Γ . Ograniczenie to powoduje, że innowacyjne żebrowane konstrukcje dachowe są ograniczone tylko do tych, które składają się z przekształconych powłok

dachowych ułożonych zgodnie z wybraną powierzchnią, podczas gdy fasady są ograniczone do struktur wielościennych. Dodatkowo, wszystkie pojedyncze komórki Γ są czworoscianami, a wszystkie jednostki dachu, powłoki są segmentami hiperboliczno-parabolicznymi ograniczonymi przez przestrzenne czworokąty [Załącznik A4].

6.4 Publikacja 3

„ *An Influence of Roof Lattice Girder Inclination on the Work of Structural Systems Supporting Shed Roof Sheeting* ” – **Załącznik A2 [17-94]**.

Celem tej publikacji jest przedstawienie wyników analizy dotyczącej wpływu zmian nachylenia dźwigarów kratowych należących do płaskich ramowych układów konstrukcyjnych podpierających cienkościennie płaskiej blachy fałdowe na pracę wytrzymałościową i stateczność tych układów. Analiza ta obejmuje optymalizację przekrojów poprzecznych elementów prętowych należących do symulowanych ram pod względem wyężenia tych elementów i ogólnej stateczności całych ram pracujących pod kilkoma wybranymi typami obciążeń charakterystycznych dla wiat. Przeprowadzona analiza jest jednym z kilku ważnych, spójnych etapów badań prowadzących do opracowania kompleksowej metody parametrycznego kształtowania wiat charakteryzujących się innowacyjnymi, niekonwencjonalnymi formami ogólnymi i pokrytych nominalnie płaskimi cienkościennymi blachami fałdowymi przekształconymi elastycznie w formy powłokowe [Załącznik A2].

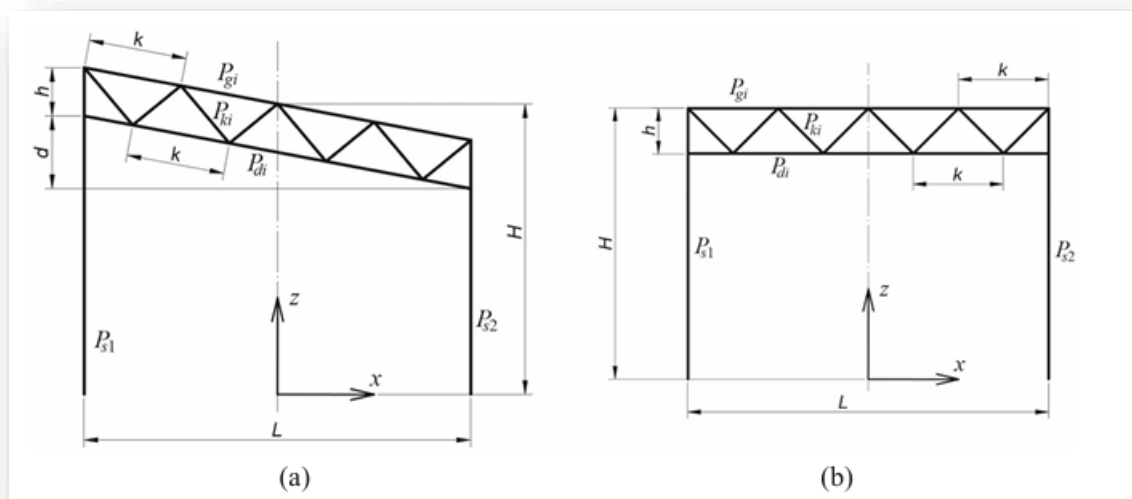
6.4.1 Metodologia

Analizowane poprzeczne układy konstrukcyjne to płaskie sztywne ramy rurowe, z których każda składa się z poziomego lub ukośnego dźwigara kratowego połączonego górnym i dolnym pasem z pionowymi słupami jednogłęziowymi. Pas górny i dolny są równoległe i połączone ze sobą pasami w kształcie litery V. Przekątne te są nachylone do obu pasów pod kątem 45 stopni. Wszystkie pręty tego samego typu, na przykład krzyżulce mają takie same przekroje [Załącznik A2].

W pierwszym kroku przyjąłem prostokątną sztywną ramę początkową K_{b0} (Rysunek 25b), którą następnie zoptymalizowałem do efektywnej prostokątnej konfiguracji podstawowej K_b (Rysunek 25a). Tą konfigurację uzyskałem poprzez zmianę przekrojów

poprzecznych – przypisanych do każdego rodzaju elementów oraz warunku optymalizacyjnego dotyczącego najwyższego możliwego wysiłku jego elementów i wystarczającej do utrzymania stateczności całej ramy [Załącznik A2].

Wysokość H każdego systemu wynosi 12m, szerokość $L=16$ m, wysokość dźwigara $h=1/8$ $L = 2$ m, rozstaw przekątnych $k=3$ m, rozstaw słupów $k=4$ m, a rozstaw kolejnych układów poprzecznych $b=6$ m [Załącznik A2].



Rysunek 25. Schemat przedstawiający: a) prostokątną, b) prostokątną trapezową ramę płaską składającą się z jednogałęziowych słupów P_{s1} i P_{s2} , pasów górnych i dolnych P_{gi} i P_{di} oraz stężeń ukośnych P_{ki} [Załącznik A2].

Każda z konfiguracji pochodnych K_{poj} ($j=1$ do 3) została zbudowana na podstawie K_{bo} poprzez pochylenie dźwigara kratowego do poziomu, gdzie wartość tego pochylenia n_b jest zmienną niezależną wpływającą na stateczność i wyężenie K_{poj} . Nachylenie jest definiowane jako stosunek kalenicy d do odległości L między słupami. Kalenicę mierzy się między poziomami głowic wyższego i niższego słupa. Testy przeprowadziłam na ramie podstawowej i kilku ramach pochodnych, dla których d przyjąłam jedną z wartości należących do zbioru $\{0, 1.5, 3.0, 4.5 \text{ m}\}$ [Załącznik A2].

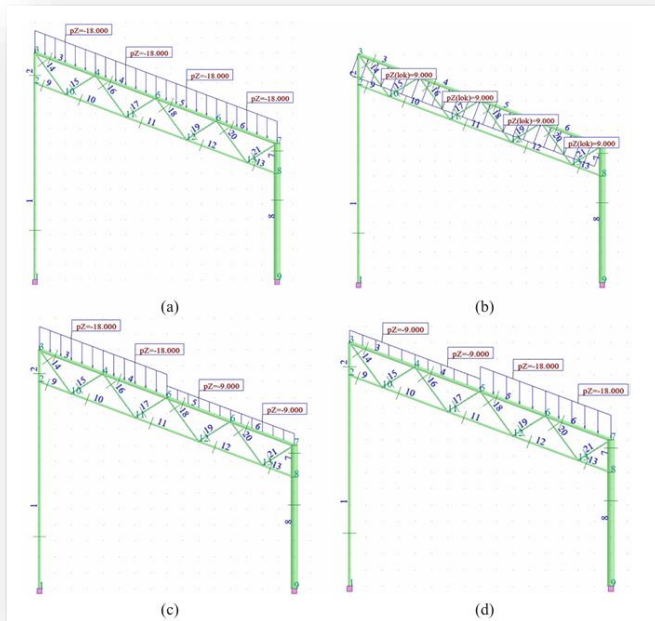
Wraz z promotorem przeprowadziłam badania, których głównym etapem są symulacje komputerowe modeli zbudowanych w programie Robot Structural Analysis Professional. Rozważane konfiguracje ram płaskich są idealnymi, które nie uwzględniają

początkowych niedoskonałości geometrycznych związanych z dokładnością wykonania i lokalizacji elementów. Ponadto w obliczeniach zastosowałam analizę nieliniową, aby uchwycić wzrost giętej sztywności prętów wywołany przez siły podłużne i sztywność poprzeczną całej ramy. Założyłam duże przemieszczenia i stosunkowo niewielkie odkształcenia. Proste podzielone regularnie na elementy skończone o długości nieprzekraczającej 1m, są wyidealizowanymi modelami MES wszystkich elementów ramy. Przeprowadzona parametryzacja dotyczyła jedynie kształtu ram. W przyszłości zamierzano rozważyć parametryzację obciążeń i właściwości mechanicznych ram [Załącznik A2].

Na potrzeby badań przyjąłam następujące założenia:

- 1) Pionowe obciążenie charakterystyczne dachu skierowane w dół do podstawy ramy wynosi 3kN/m^2 , na podstawie którego można obliczyć obciążenie równomiernie rozłożone działające wzdłuż górnego pasa dźwigara $q=b*3\text{kN/m}^2=18\text{kN/m}$ [Załącznik A2];
- 2) Obciążenie równomiernie rozłożone na powierzchni i skierowane normalnie do powierzchni wynosi $r=6\text{m}*1.5\text{kN/m}^2=9\text{kN/m}$ [Załącznik A2];
- 3) Pionowe asymetryczne charakterystyczne obciążenie dachu skierowane w dół i równe 3kN/m^2 i 1.5kN/m^2 , z którego równomiernie rozłożone obciążenie działające wzdłuż jednej połowy pasa górnego można obliczyć jako $q=b*3\text{kN/m}^2=18\text{kN/m}$ i równomiernie działające obciążenie wzdłuż drugiej połowy tego samego pasa górnego można uzyskać jako $q/2=b*1.5\text{kN/m}^2=9\text{kN/m}$ [Załącznik A2];
- 4) Inne pionowe asymetryczne charakterystyczne obciążenie dachu skierowane w dół do podstawy równe 3 i 1.5kN/m^2 , z którego wynika równomiernie rozłożone obciążenie działające wzdłuż jednej połowy pasa górnego można obliczyć jako $q/2=b*1.5\text{kN/m}^2=9\text{kN/m}$ i równomiernie działające obciążenie wzdłuż drugiej połowy tego samego pasa górnego można uzyskać jako $q=b*3\text{kN/m}^2=18\text{kN/m}$ [Załącznik A2];

Ciężar własny każdego systemu ramy jest obliczany przy użyciu algorytmu wewnętrznego programu komputerowego [Załącznik A2].



Rysunek 26. Cztery typy kombinacji obciążeń stosowane do optymalizacji rozważanych układów ram poprzecznych: a) obciążenie pionowe skierowane w dół (odpowiadające obciążeniu użytkowemu), b) obciążenie normalne (odpowiadające obciążeniu wiatrem), c) pierwsze asymetryczne obciążenie pionowe (odpowiadające obciążeniu użytkowemu), d) drugie asymetryczne obciążenie pionowe (odpowiadające obciążeniu użytkowemu) [Załącznik A2].

Dla każdej testowanej konfiguracji ramy pochodnej przyjąłm wyżej przedstawione kombinacje obciążeń (Rysunek 26a,b,c,d). Przekroje każdej z obu kolumn są zróżnicowane i optymalizowane oddzielnie ze względu na znaczną różnicę ich długości. Wszystkie rozważane zagadnienia dotyczą wpływu kształtu płaskich rurowych układów ramowych na ich pracę wytrzymałościową i stateczność w zakresie sprężystym [Załącznik A2].

6.4.2 Wyniki

Najbardziej wzmocnionymi elementami podstawowej konfiguracji K_b poddanymi przyjętymi typom obciążeń są pas górny P_g , pas dolny P_d i przekątne P_k . Całkowita nośność słupów P_s nie może być wykorzystana, ponieważ zdolność do utrzymania ogólnej stateczności całej prostokątnej ramy ma decydujący wpływ na wielkość ich przekrojów. Zoptymalizowane przekroje K_b zostały obliczone w wyniku wielu kolejnych obliczeń polegających na zmianie wielkości przekrojów. Podstawowe właściwości geometryczne i mechaniczne elementów ramy, które obliczyłam w procesie optymalizacji K_b przedstawiłam w Tabeli 16 [Załącznik A2].

Tabela 16. Podstawowe właściwości elementów dźwigara obliczone w wyniku procesu optymalizacji konfiguracji podstawowej K_b [Załącznik A2].

Element	Przekrój poprzeczny (mm × mm)	D/d	σ_c (MPa)	σ_c (MPa)	
P_s	177.8 × 4	44	207	– 98	
P_d	114.3 × 4	29	108	– 236	
P_g	219.1 × 4.5	49	238	– 130	
P_k	114.3 × 3	38	157	– 232	
f_{cr}					1.04

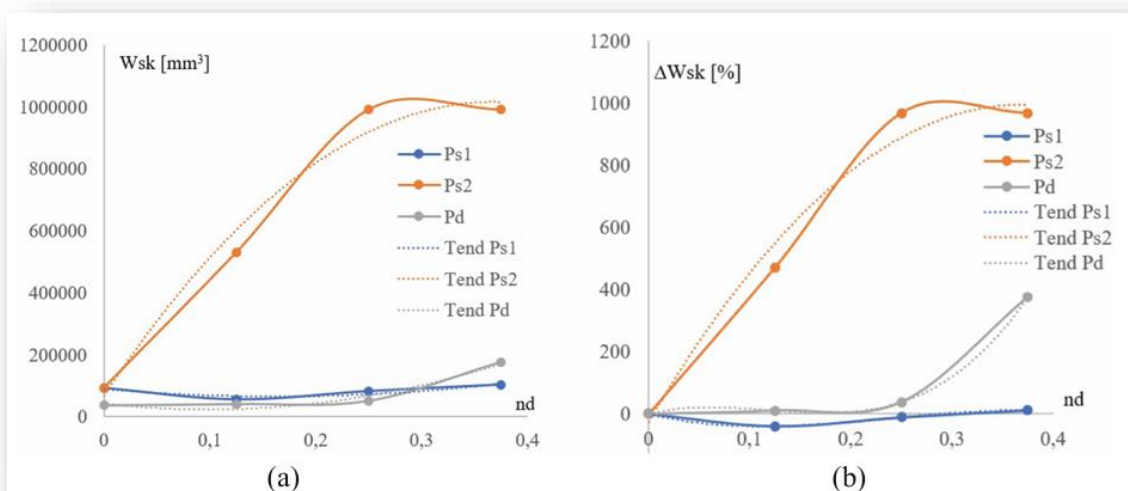
Charakterystyka przekrojów poprzecznych przedstawiona w Tabeli 17 została następnie wykorzystana do utworzenia początkowych konfiguracji pochodnych K_{poj} ($j=1-3$) [Załącznik A2].

Tabela 17. Naprężenia ściskające σ_c / rozciągające σ_r obliczone dla najbardziej naprzężonych prętów należących do każdego typu konfiguracji pochodnych K_{pj} ($j=1-3$) [Załącznik A2].

Konfiguracja	Kp1	Kp2	Kp3	
Element	Przekrój poprzeczny (mm × mm)	Przekrój poprzeczny (mm × mm)	Przekrój poprzeczny (mm × mm)	
P_{s1}	139.7 × 4	168.3 × 4	177.8 × 4.5	
	355.6 × 5.6	457 × 6.3	457 × 6.3	
P_d	114.3 × 4.5	127 × 4.5	159 × 4	
P_g	244.5 × 4	219.1 × 5	244.5 × 4.5	
P_k	101.6 × 4	101.6 × 4	101.6 × 4	
σ_c/σ_c (MPa)				
P_{s1}	228/ – 122	237/ – 124	232/ – 136	
P_{s2}	217/ – 234	222/ – 230	218/ – 222	
P_d	125/ – 221	146/ – 218	165/ – 225	
P_g	228/ – 131	231/ – 136	225/ – 138	
P_k	156/ – 223	164/ – 229	198/ – 232	
f_{cr}	7.07	5.81	5.76	1.04

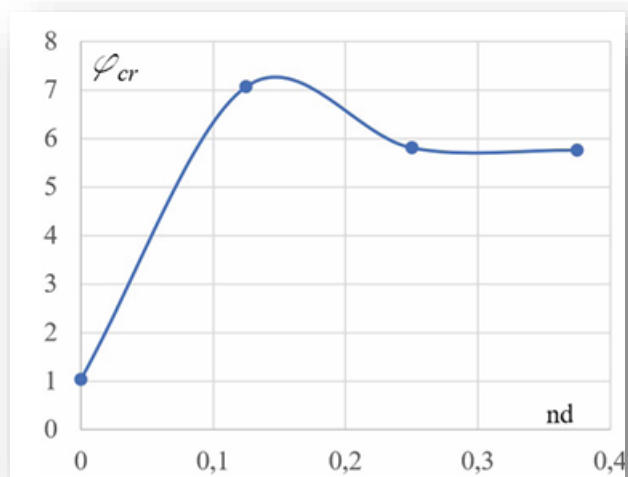
Po przeprowadzenia analizy pracy wytrzymałościowej i stateczności badanych ram, obliczyłam wskaźniki wytrzymałości przekrojów poprzecznych najbardziej wyciężonych prętów każdego z elementów tych ram, którymi są słupy i pasy dolne badanych konfiguracji K_b i K_{pj} [Załącznik A2].

Dwa wykresy, które przedstawiłam poniżej na Rysunku 21a,b zbudowałam w oparciu o wskaźnik wytrzymałości, gdzie trzy linie ciągłe przedstawiają trzy zależności pomiędzy wartościami wskaźników wytrzymałości przekrojów słupów P_{s1} i P_{s2} oraz pasa dolnego P_d , a nachyleniem dźwigarów kratowych. Przedstawione linie przerywane $Tend P_{s1}$, $Tend P_{s2}$ i $Tend P_d$ ilustrują tendencje zmian wielkości przekrojów poprzecznych powyższych elementów spowodowanych nachyleniem rozpatrywanych dźwigarów do płaszczyzny poziomej. Wartości bezwzględne obliczonych wskaźników wytrzymałości przedstawiłam na Rysunku 27a, zaś względne przyrosty wskaźnika wytrzymałości na Rysunku 27b [Załącznik A2].



Rysunek 27. Trzy zależności występujące pomiędzy wartościami badanych wskaźników wytrzymałości przekroju W_{sk} obliczonymi dla słupów P_{s1} , P_{s2} , pasa dolnego P_d , a nachyleniem n_d dźwigarów kratowych: a) wartości bezwzględne W_{sk} , b) względne przyrosty W_{sk} [Załącznik A2].

Istotną tendencję do jakościowych zmian właściwości mechanicznych analizowanych konfiguracji ram przedstawiłam na Rysunku 28 [Załącznik A2].



Rysunek 28. Zależność współczynnika obciążenia krytycznego φ_{cr} od nachylenia n_d dźwigarów [Załącznik A2].

6.4.3 Wnioski

Nachylenie dźwigarów kratowych badanych płaskich ram sztywnych do poziomu powoduje radykalny i bardzo znaczący wzrost wyężenia ich słupów i pasów dolnych oraz obciążeń krytycznych całych ram poddanych dowolnym rodzajom obciążeń. Procesy optymalizacji przeprowadziłam dla kolejno zwiększanych dyskretnych wartości nachylenia dźwigarów ramy prowadzą do istotnych zmian w wartościach wskaźnika wytrzymałości przekroju. Obciążenia krytyczne i zdolność ramy do utraty ogólnej stateczności są ograniczeniami określającymi minimalny rozmiar przekrojów słupów w konfiguracji prostokątnej. W przypadku badanych ram o przekroju innym niż prostokątny, decydującym warunkiem ograniczającym minimalny przekrój wszystkich ich elementów jest maksymalna dopuszczalna siła wynikająca z plastyczności stali S235, z której wykonane są pręty [Załącznik A2].

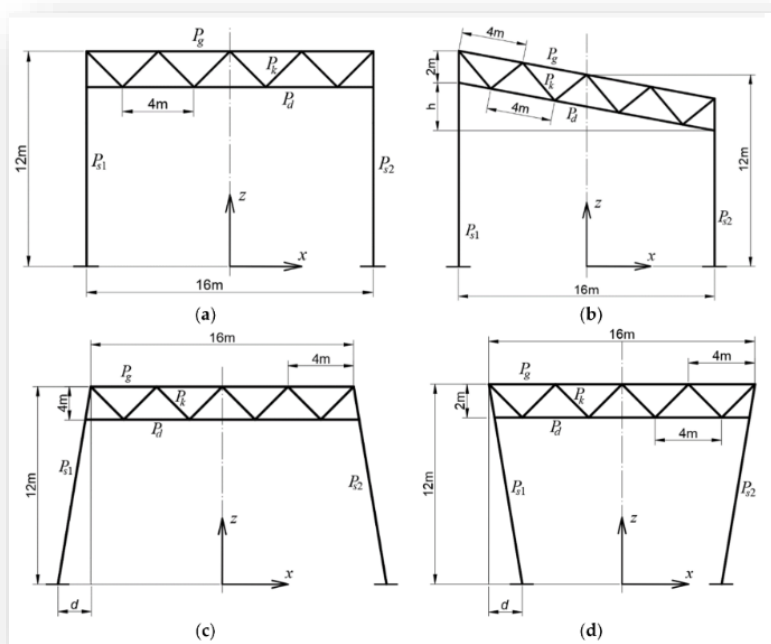
6.5 Publikacja 4

„Impact of Inclination of Girders and Columns on the Effort and Stability of Flat Bar Frames” – Załącznik A3 [17-94].

Celem tej publikacji jest analiza wpływu zmian nachylenia szeregu różnych, wybranych elementów płaskich układów konstrukcyjnych ram podtrzymujących różne przekształcone cienkościenne blachy fałdowe na stateczność ogólną i zmianę właściwości wytrzymałościowych elementów tych układów. Podstawowa konfiguracja rozpatrywanych ram składa się z poziomego dźwigara kratowego i dwóch pionowych słupów. Układy pochodne wywodzące się z podstawowej konfiguracji powstały w wyniku nachylenia słupów w pionie lub dźwigarów w poziomie. Przeprowadzone symulacje komputerowe pozwoliły zaobserwować kilka głównych trendów zmian w wytrzymałości i zdolności do utrzymania ogólnej stabilności [Załącznik A3].

6.5.1 Metodologia

Każdy analizowany w tej publikacji układ poprzeczny składa się z dźwigara kratowego, którego wysokość jest równa 2m oraz z dwóch słupów jednołązgowych (P_{s1} i P_{s2}). Dźwigar jest poziomy, a pas górny (P_g) i dolny (P_d) połączone są ze sobą przekątnymi (P_k) w kształcie litery V rozmieszczonymi co 4m. Dwie kolumny mają wysokość 12m, a ich rozstaw wynosi 16m. Pod uwagę wzięłam cztery typy kształtów ram: prostokątny (Rysunek 29a), prostokątno-trapezowy (Rysunek 29b), trapezowy (Rysunek 29c) i odwrócony trapez (Rysunek 29d), przy czym podstawowym kształtem jest prostokątny [Załącznik A3].



Rysunek 29. Schematy badanych ram płaskim: a) prostokątna rama podstawowa K_{b0} , b) rama pochodna prostokątno-trapezowa K_g , c) rama trapezowa K_{ce} , d) odwrócona rama pochodna trapezu K_{ci} [Załącznik A3].

Pierwszym typem konfiguracji pochodnych są konfiguracje K_g charakteryzujące się dźwigarami nachylonymi do płaszczyzny poziomej i słupami pionowymi (Rysunek 29b). Drugi typ konfiguracji pochodnych składa się z konfiguracji K_{ci} i K_{ce} charakteryzujących się kolumnami nachylonymi do pionu. Pierwszy z nich ma kolumny pochylone podstawami na zewnątrz (Rysunek 29c), a drugi pochylony do wewnątrz (Rysunek 29d) [Załącznik A3].

Badania związane są z wykonaniem kilku symulacji komputerowych modelujących parametry mechaniczne podstawowych i pochodnych konfiguracji ram, dokonując optymalizacji przekrojów poszczególnych ich elementów. Modele wykonałam wraz z promotorem w programie Robot Structural Analysis Professional. Dokładność modelowania geometrycznego wynosi 1 mm, a dokładność obliczeń wytrzymałościowych 1 MPa. [Załącznik A3].

Przeprowadzone badania podzieliłam na cztery główne etapy:

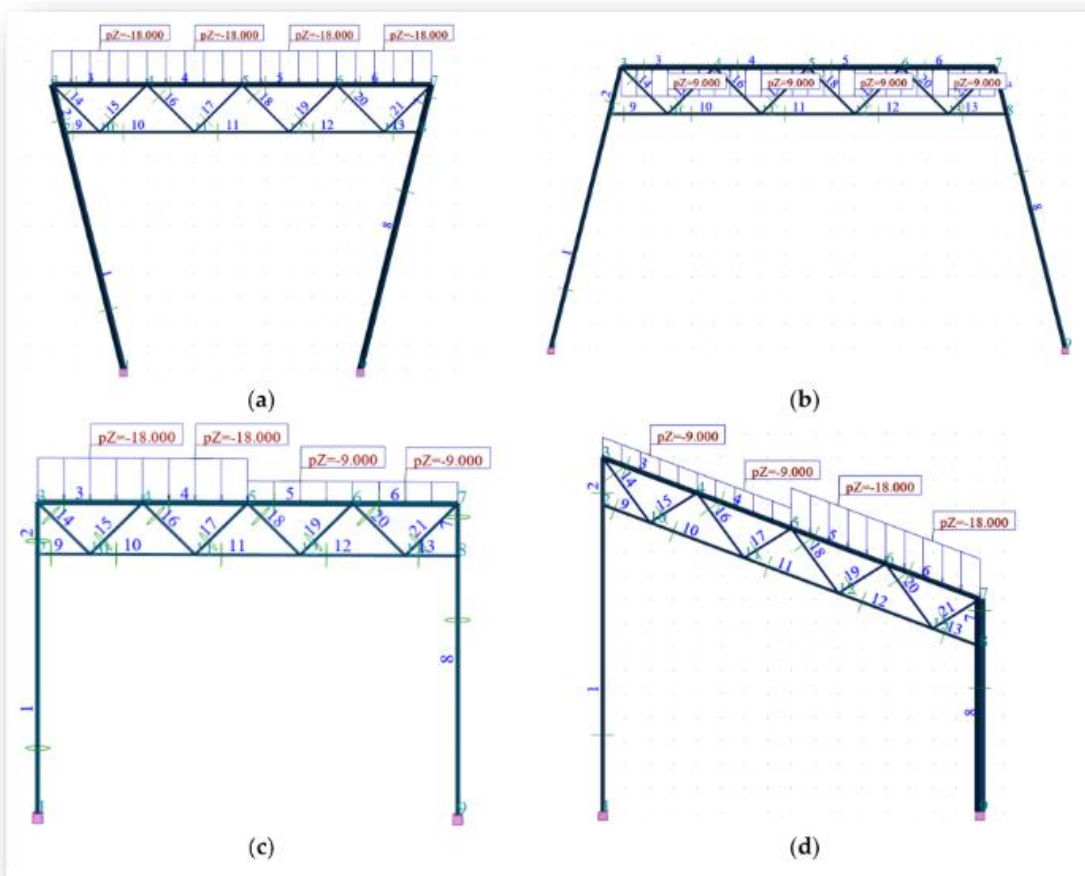
W pierwszym kroku podstawową konfigurację struktury K_{b0} zoptymalizowałam w celu osiągnięcia K_b . Przyjęłam trzy ograniczenia aby móc zoptymalizować wybrane schematy: maksymalny dopuszczalny wyężenie wszystkich pojedynczych prętów odpowiadające granicy plastyczności $235 \text{ MPa} \pm 3\%$ dla stali S235, klasa przekroju nie wyższa niż 3 oraz maksymalna niska wartość współczynnika obciążeń krytycznych wyznaczona dla każdej konfiguracji ramy, ale nie niższa niż 1. Wyniki symulacji realizujących wstępną koncepcję przyjętą przed badaniami i odnoszącej się do optymalizacji do K_b jedynie podstawowej konfiguracji ramy prostokątnej K_{b0} , a następnie wykorzystania obliczonych przekrojów dla analogicznych elementów następnie symulowanych konfiguracji pochodnych, okazały się niemożliwe ze względu na bardzo duże naprężenia występujące w ich słupach i pasach. W związku z tym procesy optymalizacyjne przeprowadziłam również dla wszystkich konfiguracji pochodnych [Załącznik A3].

W drugim etapie badań wykonałam modele komputerowe ram płaskich charakteryzujące się różnym nachyleniem ich dźwigarów do poziomu. Przyjęłam trzy różne dyskretne wartości parametru h należące do zbioru $\{1,5, 3,0, 4,5 \text{ m}\}$. Trzy utworzone w ten sposób konfiguracje nazwałam K_{gi} ($i = 1$ do 3) [Załącznik A3].

W trzecim etapie przeprowadziłam kilka symulacji nieprostokątnych układów ramowych K_{ci} i K_{ce} wyprowadzonych z K_b . Specyficzna właściwość tych konfiguracji polega na nachyleniu ich kolumn do pionu pod tym samym kątem. Przyjęłam cztery różne wartości parametru d dla K_{ce} i cztery dla K_{ci} . Przyjęte wartości parametru d należą do zbioru $\{1, 2, 3, 4 \text{ m}\}$ [Załącznik A3].

W czwartym, ostatnim etapie badań opracowałam kilka wykresów przedstawiających wpływ zmian nachylenia każdego istotnego elementu ramy na ogólną stateczność ramy oraz właściwości wytrzymałościowe poszczególnych jej prętów [Załącznik A3].

Pierwszym rodzajem obciążenia jest obciążenie pionowe $q=18\text{kN/m}^2$ równomiernie rozłożone na całej długości pasa każdej ramy. Wartość ta wynika z przyjęcia obciążenia dachu na poziomie 3kN/m^2 i rozstawu 6m dla ram z prętów płaskich rozmieszczonych na całej długości wiaty. Drugi i trzeci typ obciążenia to obciążenia nierównomiernie rozłożone na długości górnego pasa o wartościach q i $q/2$. Czwarty zaś typ obciążenia to obciążenie prostopadłe do osi górnego pasa i skierowane do góry, równomiernie rozłożone na całej długości górnego pasa dźwigara kratowego. Do każdego obciążenia brałam pod uwagę ciężar własny konstrukcji. Wszystkie rodzaje obciążeń przedstawiłam poniżej na Rysunku 30 [Załącznik A3].



Rysunek 30. Cztery rodzaje obciążeń przyłożonych do każdej z badanych konfiguracji ramy: a) obciążenie pionowe skierowane w dół, b) obciążenie skierowane w górę prostopadłe do pasa dźwigara, c) niesymetryczne obciążenie pionowe, d) niesymetryczne obciążenie pionowe przyłożone do konfiguracji niesymetrycznej [Załącznik A3].

6.5.2 Wyniki

Podstawowe właściwości geometryczne i mechaniczne elementów ramy obliczone w wyniku procesu optymalizacji K_b przedstawiłam w Tabeli 18. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że badany górny pas P_g , dolny pas P_d i przekątne P_k są najbardziej wzmocnionymi elementami podstawowej konfiguracji K_b poddanymi przyjętym obciążeniom [Załącznik A3].

Tabela 18. Podstawowe właściwości elementów K_b wyliczone w procesie optymalizacji [Załącznik A3].

Pierwiastek	Przekrój [mm × mm]	Stosunek dp/dp	σ_c [MPa]	σ_t [MPa]	Przemieszczenie Δx_{Max} [mm] Kolumna P_s	Ugięcie Δz_{Max} [mm] Dźwigar kratowy	Współczynnik obciążenia krytycznego φ_{Cr}
P_s	177.8×4	44	207	-98			
P_d	114.3×4	29	108	-236	11.4	33.0	1.04
P_g	219.1×4.5	49	238	-130			
P_k	114.3×3	38	157	-232			

Znak ujemny oznacza naprężenia rozciągające, a znak dodatni naprężenia ściskające, zgodnie z konwencją zastosowaną w programie komputerowym. Charakterystyki przekrojów obliczonych dla K_b wykorzystałam do stworzenia początkowych konfiguracji pochodnych K_{g0} , K_{ce0} i K_{ci0} . Te konfiguracje pochodne były podstawą do obliczeń związanych z procesem optymalizacji konfiguracji pochodnych K_{gi} , K_{cer} i K_{cij} . Wyniki uzyskane dla K_{gi} przedstawiłam w Tabeli 19 [Załącznik A3].

Tabela 19. Naprężenia obliczone dla najbardziej obciążonych prętów należących do każdego typu konfiguracji pochodnych K_{gi} [Załącznik A3].

Konfiguracja ramy	Kg1	Kg2	Kg3
Element ramy	Przekrój poprzeczny [mm × mm]	Przekrój poprzeczny [mm × mm]	Przekrój poprzeczny [mm × mm]
P_{s1}	139.7 × 4	168.3 × 4	188.8 × 4
P_{s2}	355.6 × 5.6	457 × 6.3	457 × 6.3
P_d	114.3 × 4.5	127 × 4.5	159 × 4
P_g	244.5 × 4	219.1 × 5	244.5 × 4.5
P_k	101.6 × 4	101.6 × 4	101.6 × 4
Naprężenia [MPa]	σ_d/σ_t	σ_d/σ_t	σ_d/σ_t
P_{s1}	228/-122	237/-124	232/-136
P_{s2}	217/-234	222/-230	218/-222
P_d	125/-221	146/-218	165/-225
P_g	228/-131	231/-136	225/-138
P_k	156/-223	164/-229	198/-232
Przemieszczenie Δx_{Max} [mm]	98.0	63.1	46.1
Ugięcie Δz_{Max} [mm]	42.4	47.4	57.3
Współczynnik obciążenia krytycznego φ_{Cr}	7.07	5.81	5.76

Wyniki uzyskane dla konfiguracji pochodnych odwróconego trapezu K_{cij} ($j = 1-4$) przedstawiłam w Tabeli 20. Wyniki uzyskane dla konfiguracji pochodnych trapezu K_{cer} ($r = 1-4$) przedstawiłam w Tabeli 21 [Załącznik A3].

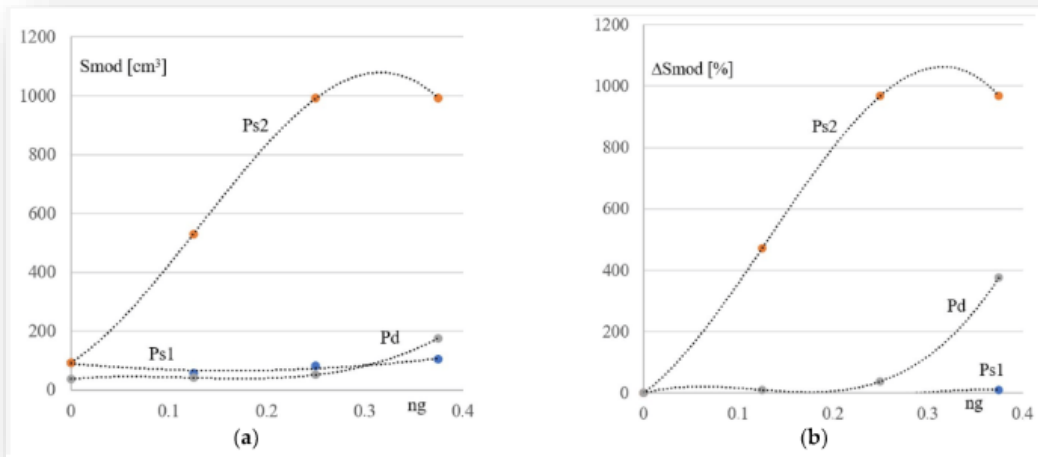
Tabela 20. Naprężenia obliczone dla najbardziej obciążonych prętów należących do każdego typu konfiguracji pochodnych K_{ci} [Załącznik A3].

Konfiguracja ramy	Kci1	Kci2	Kci3	Kci4
Element ramy	Przekrój poprzeczny [mm × mm]	Przekrój poprzeczny [mm × mm]	Przekrój poprzeczny [mm × mm]	Przekrój poprzeczny [mm × mm]
P_s	177,8 × 5,6	244,5 × 4	273 × 4,5	323,9 × 4,5
P_d	114,3 × 4	114,3 × 4	114,3 × 4	114,3 × 4
P_g	219,1 × 4,5	219,1 × 4,5	219,1 × 4,5	219,1 × 4,5
P_k	101,6 × 3	108,3 × 3	88,9 × 3	76,1 × 3,6
Naprężenia [MPa]	σ_c/σ_t	σ_c/σ_t	σ_c/σ_t	σ_c/σ_t
P_s	210/-121	218/-127	222/-148	214/-150
P_d	179/-235	177/-233	195/-231	207/-228
P_g	230/-131	217/-128	210/-129	228/-158
P_k	179/-236	207/-233	209/-228	205/-224
Przemieszczenie x_{Max} [mm]	187.0	143.7	147.0	132.5
Ugięcie z_{Max} [mm]	32.1	33.1	32.0	31.0
Współczynnik obciążenia krytycznego Ψ_{Cr}	1.26	2.11	2.79	6.24

Tabela 21. Naprężenia obliczone dla najbardziej obciążonych prętów należących do każdego typu konfiguracji pochodnych K_{ce} [Załącznik A3].

Konfiguracja ramy	Kce1	Kce2	Kce3	Kce4
Element ramy	Przekrój poprzeczny [mm × mm]	Przekrój poprzeczny [mm × mm]	Przekrój poprzeczny [mm × mm]	Przekrój poprzeczny [mm × mm]
P_s	177,8 × 4,5	193,7 × 4,5	193,7 × 5,6	273 × 5
P_d	114,3 × 4	114,3 × 4	114,3 × 4	127 × 4,5
P_g	244,5 × 4	244,5 × 4	244,5 × 4	273 × 4,5
P_k	114,3 × 3	114,3 × 3	101,6 × 3	101,6 × 3
Naprężenia [MPa]	σ_d/σ_t	σ_d/σ_t	σ_d/σ_t	σ_d/σ_t
P_s	211/-132	235/-160 szt.	233/-171	228/-153
P_d	135/-236	140/-236	141/-236	129/-218
P_g	222/-104	223/-104	225/-105	221/-91
P_k	156/-223	176/-232	175/-226	206/-228
Przemieszczenie x_{Max} [mm]	174.3	176.3	175.0	106.5
Ugięcie z_{Max} [mm]	34.0	34.0	34.0	30.0
Współczynnik obciążenia krytycznego φ_{Cr}	1.23	1.29	2.02	4.37

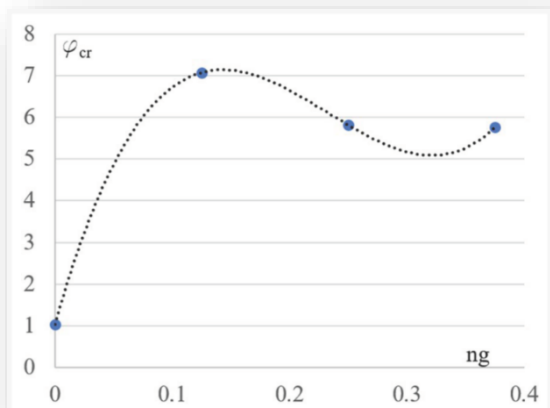
Analiza pracy wytrzymałościowej i stateczności badanych ram skutkuje porównaniem wskaźników wytrzymałości przekrojów obliczonych dla optymalnych przekrojów najbardziej wzmocnionych elementów (słupy i pasy dolne) symulowanych konfiguracji podstawowych i pochodnych K_b i K_{gi} . Na podstawie tych modułów zbudowałam dwa wykresy przedstawione poniżej, gdzie trzy linie ciągłe przedstawiają trzy zależności między wartościami wyżej wymienionych wskaźników wytrzymałości przekroju słupów P_{s1} oraz P_{s2} , a pasem dolnym P_d oraz nachyleniem n_g dźwigarów kratowych K_{gi} . Nachylenie n_g jest stosunkiem wysokości ramy h do odległości 16 m między słupami prostokątnej podstawowej konfiguracji ramy [Załącznik A3].



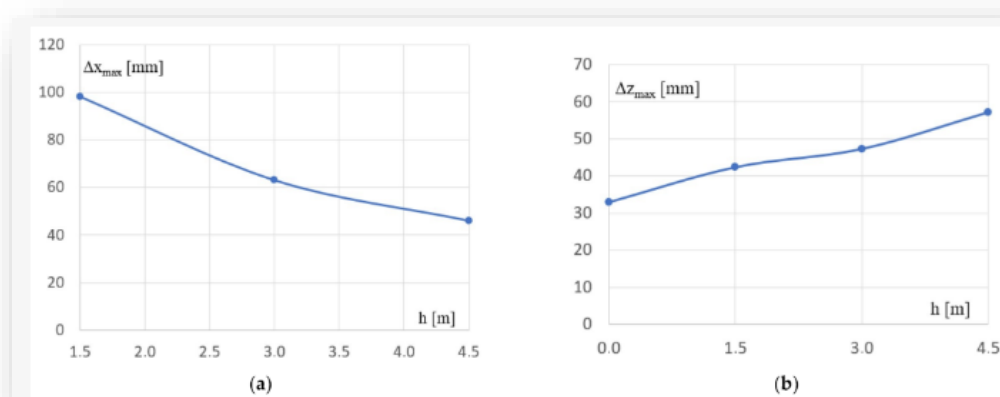
Rysunek 31. Trzy linie P_{s1} , P_{s2} i P_d prezentujące trzy zależności zachodzące pomiędzy wartościami wskaźników wytrzymałości przekroju sprężystego S_{mod} obliczone dla zoptymalizowanych przekrojów badanych słupów P_{s1} i P_{s2} i pasa dolnego P_d , a nachyleniem ng symulowanych dźwigarów kratowych: a) wartości bezwzględne S_{mod} , b) względne przyrosty ΔS_{mod} [Załącznik A3].

Linie przerywane ilustrują trzy trendy zmian wielkości optymalnych przekrojów poprzecznych powyższych elementów spowodowane zmianami nachylenia rozważanych dźwigarów ramy do płaszczyzny poziomej. Bezwzględne wartości wskaźników wytrzymałości przekroju S_{mod} obliczone dla uzyskanych optymalnych przekrojów prętów symulowanych konfiguracji ram przedstawiłam na Rysunku 31a, a względne przyrosty ΔS_{mod} tych modułów przedstawiłam na Rysunku 31b [Załącznik A3].

Schematy przedstawione poniżej na Rysunkach 32, 33 i 34 opracowałam na podstawie danych w Tabelach 20 i 21. Ilustrują one wpływ nachylenia słupa na właściwości mechaniczne ram pochodnych K_{gi} z pochylonymi dźwigarami kratowymi. [Załącznik A3].



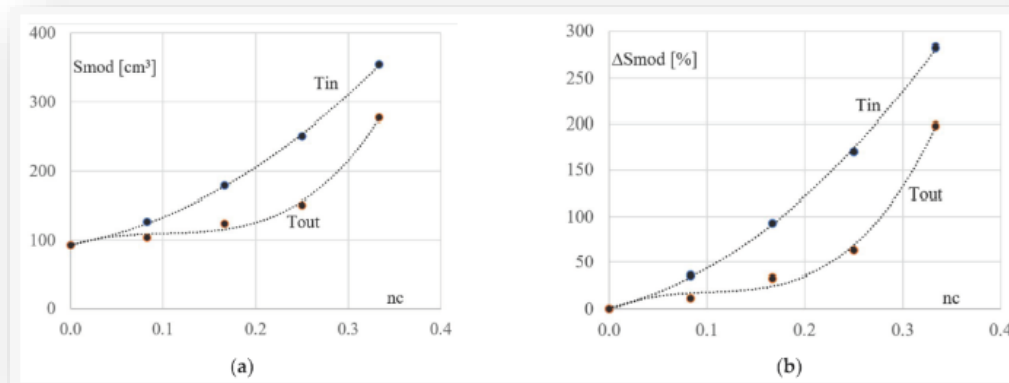
Rysunek 32. Zależność między współczynnikiem obciążenia krytycznego i nachyleniem dźwigara [Załącznik A3].



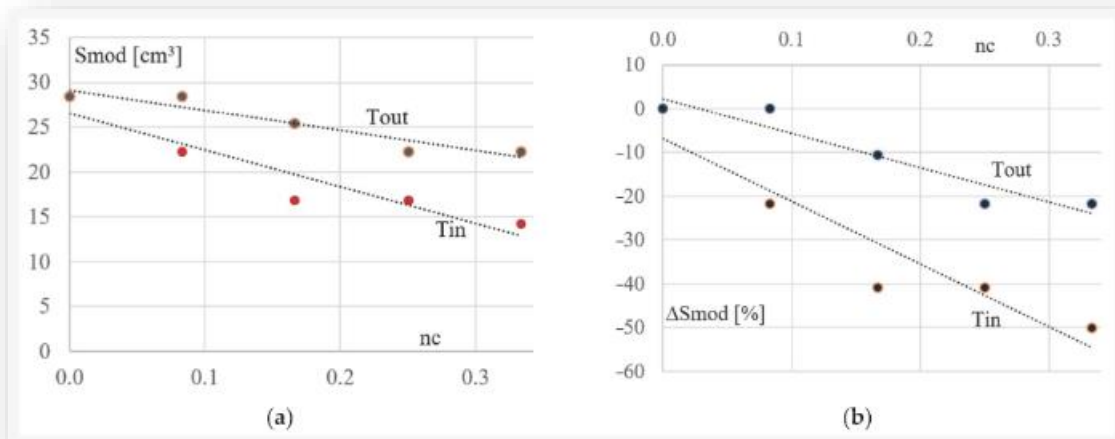
Rysunek 33. Zależności między różnicą h w wysokości P_{s1} oraz P_{s2} słupów K_{gi} i przemieszczenie dwóch wybranych połączeń ramy: a) skrajne przemieszczenie poziome węzła 2 należącego do P_{s1} , b) skrajne ugięcie dźwigara kratowego (przemieszczenie węzła 5 górnego pasa) [Załącznik A3].

Na powyższych wykresach zerową wartość ng przypisałam do odpowiedniej wartości modułu sprężystości zoptymalizowanego przekroju obliczonego dla każdego elementu podstawowej konfiguracji ramy prostokątnej. Zmiana przebiegu dowolnej linii z powyższych wykresów ilustruje zmianę modułu przekroju odpowiedniego elementu kolejno symulowanych konfiguracji pochodnych. Znaczące zmiany przebiegu wyżej wymienionej linii wskazują na istotny wpływ pochylenia dźwigara na właściwości mechaniczne badanej ramy [Załącznik A3].

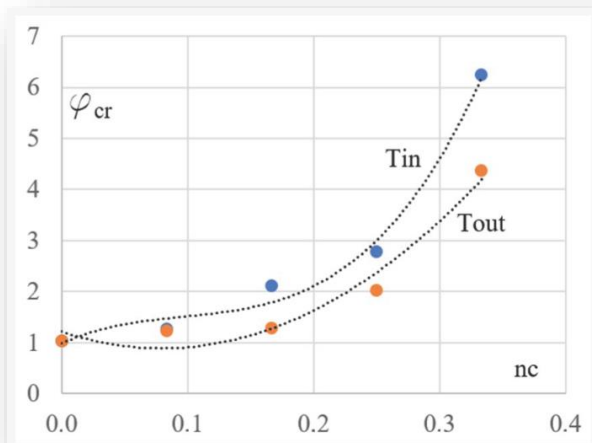
Przedstawione poniżej wykresy utworzyłam na podstawie pozostałych danych podanych w Tabeli 20 i 21, pokazują wpływ nachylenia kolumny na właściwości mechaniczne pochodnych ram trapezowych K_{cij} i K_{cer} [Załącznik A3].



Rysunek 34. Linie T_{in} i T_{out} przedstawiają odpowiednio zależności między wskaźnikami wytrzymałości przekroju S_{mod} przekrojów poprzecznych kolumn, konfiguracjami odwróconego trapezu K_{cer} i konfiguracjami trapezowego K_{cij} oraz nachyleniem nc tych kolumn: a) wartości bezwzględne wskaźników wytrzymałości przekroju S_{mod} , b) względne przyrosty ΔS_{mod} [Załącznik A3].



Rysunek 35. Linie T_{in} i T_{out} przedstawiają zależności między wskaźnikami wytrzymałości przekroju S_{mod} przekrojów ukośnych dźwigara odpowiednio w konfiguracjach odwróconego trapezu K_{cer} i trapezowego K_{ci} oraz nachylenie nc ich kolumn: a) wartości bezwzględne S_{mod} , b) względne przyrosty ΔS_{mod} [Załącznik A3].



Rysunek 36. Dwie zależności współczynnika obciążenia krytycznego na nachyleniu kolumny n_c obliczonym dla konfiguracji odwróconego trapezu K_{cer} – linia Tout i konfiguracji trapezowej K_{ci} – linia Tin [Załącznik A3].

Dla wszystkich konfiguracji pochodnych K_{ci} i K_{cer} decydujące jest maksymalna nośność ich kolumn. Większą zdolność ram do zachowania ogólnej stateczności obserwuje się dla pochodnych konfiguracji trapezowych K_{cer} niż dla odwróconych konfiguracji trapezowych K_{ci} . Zmiany wartości współczynnika obciążenia krytycznego zależą nieliniowo od zmian nachylenia słupa n_c . Uzyskane wyniki stanowią podstawę i uzasadnienie do przeprowadzenia symulacje oraz badań w zakresie dalszej modyfikacji kształtu, obciążeń, pracy, a także sposobów wykorzystania różnych konfiguracji ram płaskich [Załącznik A3].

6.5.3 Wnioski

Opracowałam podczas badań i zaprezentowałam w pracy niekonwencjonalne podejście do definiowania obciążeń charakterystycznych rozpatrywanych ram podpierających dolne półki fałd przekształconego poszycia dachowego, jako obciążeń rozłożonych równomiernie wzdłuż długości pasa górnego dźwigara ramy dachowej, gdzie wszystkie fałdy podparte są dodatkowymi płytami mocowanymi bezpośrednio do dźwigara zamiast stosowania płatwi przenoszących siły skupione na połączenia kratownicowe. Wynikiem takiego podejścia jest nowatorski sposób sprawdzania wpływu zmiany kształtu kolejnych płaskich ram pokrytych przekształconymi cienkościennymi osłonami na właściwości geometryczne i mechaniczne elementów tych ram. Przeprowadzone przeze mnie

symulacje komputerowe potwierdziły istotność zmian kształtów konfiguracji ram, wynikających z nachylenia słupów lub dźwigarów, co spowodowało istotny wzrost nakładu ich elementów pracujących pod przyjętymi typami obciążeń [Załącznik A3].

Wspólnie z promotorem opracowałam nowatorski zestaw warunków optymalizujących wydajność przyjętych form ramy, a następnie przeprowadziłam analizę zaobserwowanych zależności. Analizę tę przeprowadziłam w stosunkowo niekonwencjonalny sposób z wykorzystaniem pól powierzchni i wskaźników wytrzymałości poprzecznych przekrojów wszystkich typów prętów, gdzie optymalizacja ta została przeprowadzona osobno dla przekrojów prętów każdej analizowanej konfiguracji ramy bazowej i pochodnej [Załącznik A3].

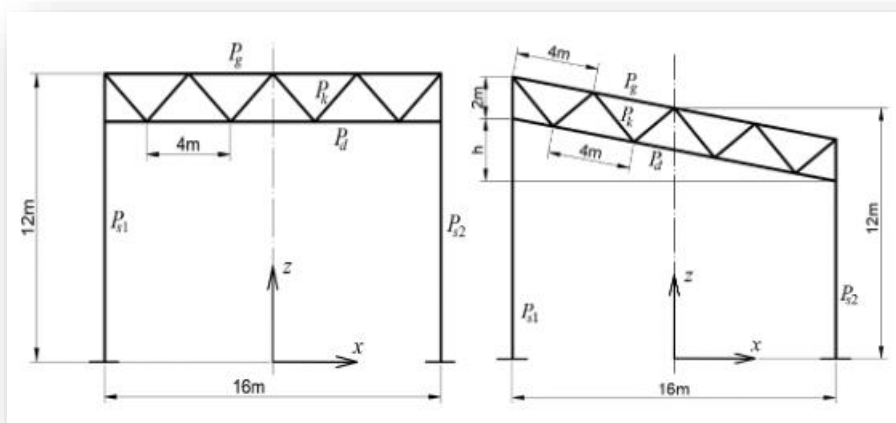
Stwierdziłam, że wybrane zmiany mechaniczne badanych konfiguracji ram spowodowane zmianami nachylenia dźwigarów lub słupów mają charakter ilościowy i jakościowy. Obliczone obciążenia krytyczne oraz możliwość utrzymania ogólnej stateczności ram są ograniczeniami ograniczającymi optymalną wielkość przekrojów słupa w układzie prostokątnym. W przypadku rozważanych ram trapezowych i trapezowych odwróconych decydującym warunkiem ograniczającym optymalną wielkość przekrojów wszystkich elementów jest maksymalne dopuszczalne wyężenie wynikające z granicy plastyczności zastosowanej stali [Załącznik A3].

6.6 Publikacja 5

„ *An influence of column inclination on the work of plane bar structural systems supporting shed roof sheeting* ” – **Załącznik A5 [17-94]**.

Celem tej publikacji jest przedstawienie wyników analizy wpływu zmian nachylenia słupów badanych konfiguracji ram pochodnych przeznaczonych do układów konstrukcyjnych wiat na pracę wytrzymałościową i stateczność tych układów. Analiza ta dotyczy przekrojów prętów wszystkich elementów wchodzących w skład badanych ram pod kątem ich wybranych właściwości mechanicznych, a także pod kątem zdolności do zachowania stateczności ogólnej tych ram obciążonych równomiernie rozłożonymi obciążeniami charakterystycznymi dla wiat zadanych nominalnie płaskimi cienkościennymi blachami fałdowymi przekształconymi w kształty powłokowe [Załącznik A5].

We wcześniejszych badaniach [Rysunek 25, Załącznik A2] rozważałam niektóre główne właściwości geometryczne i mechaniczne dwóch typów płaskich ram kratowych. Są to ramy prostokątne, czyli konfiguracje bazowej oraz ramy prostokątno-trapezowe, czyli konfiguracje pochodne. W badaniach tych uwzględniłam wpływ nachylenia dźwigara kratowego na właściwości mechaniczne wszystkich elementów ram. Schematy rozważanych we wcześniejszych badaniach ram przedstawiłam to na Rysunku 37 [Załącznik A5].

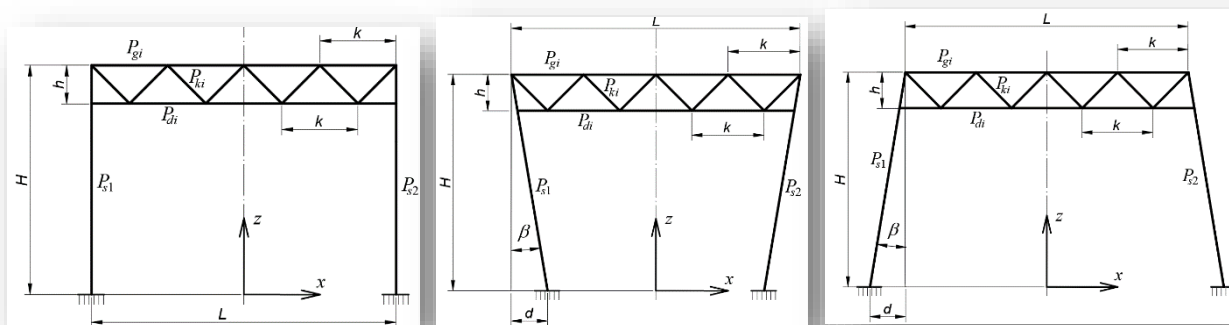


Rysunek 37. Schematy dwóch typów płaskich ram prętowych: konfiguracja o podstawie prostokątnej i konfiguracja o podstawie trapezowej prostokątnej [Załącznik A5].

6.6.1 Metodologia

Badania polegały na stworzeniu uproszczonych modeli prętów w programie Robot Structural Analysis i przeprowadzeniu symulacji komputerowych metodą przyrostową MES. W nieliniowych obliczeniach przyrostowych przyjęłam założenie nieliniowości geometrycznej, a więc duże przemieszczenia i efekt P- Δ . Dokładność modelowania geometrycznego położenia osi podłużnej prętów układów ramowych wynosi 1 mm. Każdy rozważany układ poprzeczny jest płaską sztywną ramą rurową składającą się z poziomego dźwigara kratowego połączonego górnym i dolnym pasem ze słupem jednoogłazowym po każdej stronie. We wstępnej koncepcji przekroje, które obliczyłam dla zoptymalizowanej podstawowej konfiguracji ramy K_b , Rysunek 37, wykorzystałam w procesie kształtowania i testowania wybranych właściwości fizycznych trapezoidalnych pochodnych konfiguracji K_p . Każdą K_p zbudowałam na bazie K_b poprzez

wychylenie w pionie obu przeciwległych kolumn. Działanie to spowodowało przesunięcie podstaw słupów do wewnątrz lub na zewnątrz ramy [Załącznik A5].



Rysunek 38. Schematy różnych trzech typów badanych ram płaskich składających się z jednogałęziowych słupów P_{s1} i P_{s2} , dźwigarów z równoległymi pasami P_{gi} i P_{di} oraz krzyżulców typu V P_{ki} : a) układ prostokątnym, b) odwrócony układ trapezowy, c) układ trapezowy [Załącznik A5].

Pasy dźwigara są poziome i połączone krzyżulcami typu V nachylnymi pod kątem 45° . Pręty jednego typu mają identyczne przekroje. W pierwszym etapie badań przyjąłm wstępne przekroje wszystkich elementów wstępnej prostokątnej konfiguracji, a następnie zoptymalizowałam je pod kątem uzyskania jak największych naprężeń tych elementów i wystarczającej stateczności w wyniku przeprowadzenia metody „prób i błędów”. Wysokość H każdej ramy to 12m, szerokość $L=16$ m, wysokość dźwigara $h=1/8L=2$ m, rozstaw krzyżulców $k=4$ m, a rozstaw kolejnych układów poprzecznych ram $b=6$ m [Załącznik A5].

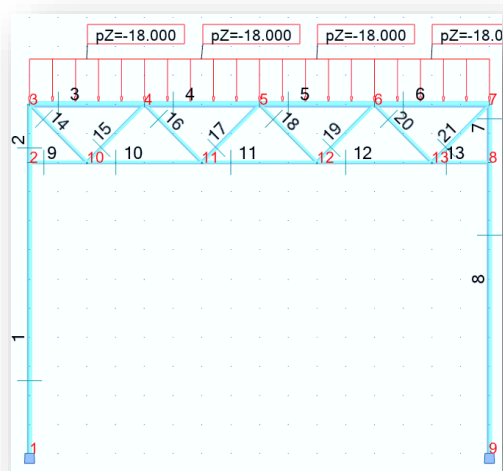
Obciążenie własne każdej ramy zostało wprowadzone i obliczone przy użyciu wewnętrznego algorytmu komputera. Założyłam, że:

- 1) pionowe obciążenie charakterystyczne dachu skierowane w dół do podstawy wynosi 3 kN/m^2 , przy czym obliczyłam obciążenie użytkowe równomiernie rozłożone wzdłuż pasa górnego każdego dźwigara, wynoszące $q = b \cdot 3 \text{ kN/m}^2 = 18 \text{ kN/m}$, Rysunek 39a [Załącznik A5];
- 2) obciążenie równomiernie rozłożone na dachu, skierowane w dół prostopadle do jego powierzchni, odpowiadające ssaniu wiatru i podnoszeniu dachu, obliczyłam na jeden metr pasa górnego, wynoszące $r = 6 \text{ m} \cdot 1,5 \text{ kN/m}^2 = 9 \text{ kN/m}$, Rysunek 39b [Załącznik A5];

- 3) pionowe asymetryczne obciążenie charakterystyczne dachu skierowane w dół do podstawy przyjął, jako 3 kN/m^2 i $1,5 \text{ kN/m}^2$, dzięki czemu obliczyłam obciążenie użytkowe równomiernie rozłożone wzdłuż jednej połowy pasa górnego dźwigara: $q = b \cdot 3 \text{ kN/m}^2 = 18 \text{ kN/m}$, oraz obciążenie równomiernie rozłożone działające wzdłuż drugiej połowy tego samego pasa górnego: $q / 2 = b \cdot 1,5 \text{ kN/m}^2 = 9 \text{ kN/m}$, Rysunek 39c [Załącznik A5];

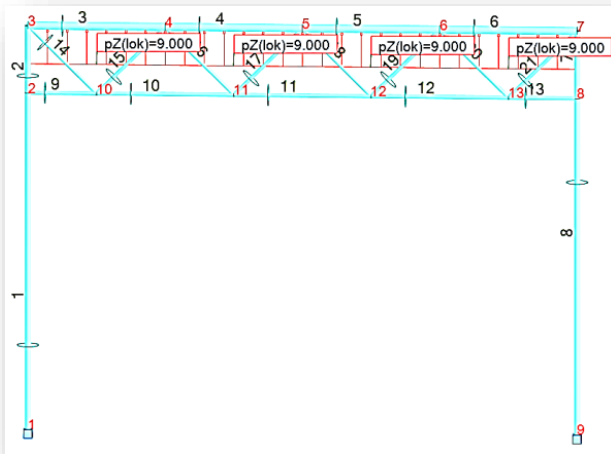
Ze względu na eksploracyjny charakter przeprowadzonych testów nie zastosowano współczynników redukcji obciążenia i materiału wymaganych podczas projektowania konkretnego ustroju konstrukcyjnego [Załącznik A5].

Opisane wyżej przyjęte przeze mnie obciążenia przedstawiłam na Rysunku 39 [Załącznik A5].

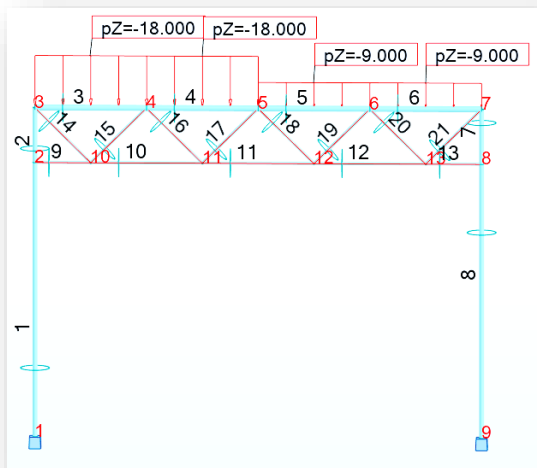


Rysunek 39. Kombinacje obciążeń rozważanych poprzecznych układów ram nośnych: a) obciążenie pionowe skierowane w dół, b) obciążenie pionowe skierowane w górę, c) asymetryczne obciążenie pionowe [Załącznik A5].

a)



b)



c)

Pod względem pracy wytrzymałościowej prętów wykonanych ze stali S235 przeanalizowałam naprężenia pochodzące od sił ściskających i rozciągających wynikających z różnych wyżej wymienionych konfiguracji obciążeń. Lokalna stateczność prętów została zachowana poprzez przyjęcie odpowiedniej klasy przekroju każdego typu pręta. Ogólna stateczność pojedynczych płaskich układów ramowych zbadałam za pomocą współczynnika obciążenia krytycznego, przyjętego jako większy lub równy 1.0 [Załącznik A5].

Przeprowadzenie badań według wstępnie zaplanowanej koncepcji zakładającej optymalizację tylko bazowej konfiguracji ramy prostokątnej okazało się niemożliwe ze względu na bardzo duże różnice w naprężeniach występujących w słupach kolejnych konfiguracji pochodnych. Postanowiłam więc przeprowadzić proces optymalizacji również dla każdej badanej konfiguracji pochodnej, a następnie zbadałam trendy zmian

poziomów naprężeń występujących w prętach, postanowiłam również zbadać trendy zmian pola powierzchni i momentu bezwładności każdego typu przekroju. Ze względu na uzyskane wyniki, prezentujące duży wzrost wartości naprężeń występujących w kolejnych konfiguracjach pochodnych – charakteryzujących się coraz większym nachyleniem słupów, uwzględniłam trendy pojawiających się podczas zmian wartości modułów przekroju poprzecznego prętów oraz współczynnika obciążenia krytycznego całych ram poddanych procesom optymalizacji [Załącznik A5].

6.6.2 Wyniki

Biorąc pod uwagę przyjęte obciążenia, uzyskałam następujące konfiguracje ram, w których najbardziej obciążone pręty należą do pasa górnego P_g , pasa dolnego P_d i krzyżulców P_k . Ostateczne przekroje zoptymalizowanych elementów obliczyłam w wyniku wielu kolejnych prób podjętych podczas procesu obliczeniowego kształtowania podstawowej konfiguracji ramy. Główne charakterystyki geometryczne i mechaniczne obliczone dla wszystkich elementów konfiguracji K_b z uwzględnieniem wyżej wymienionych kombinacji obciążeń przedstawiłam w Tabeli 22 [Załącznik A5].

Tabela 22. Podstawowe wielkości geometryczne i mechaniczne prętów każdego z czterech elementów obliczone na podstawie konfiguracji podstawowej K_b [Załącznik A5].

Nr	Element	Przekrój poprzeczny [mm x mm]	D/d	σ_c [MPa]	σ_r [MPa]	
1	P_s	177.8 x 4	44	207	-98	
2	P_d	114.3 x 4	29	108	-236	
3	P_g	219.1 x 4.5	49	238	-130	
4	P_k	114.3 x 3	38	157	-232	
5	φ_{cr}					1.04

Charakterystyki przekroju poprzecznego przedstawione w Tabeli 22 wykorzystałam do utworzenia arbitralnych konfiguracji pochodnych K_{pj} ($j=1-8$) zastosowanych do optymalizacji ostatecznych konfiguracji pochodnych K_{pj} . Wyniki uzyskane dla K_{pj} podałam w Tabelach 23-24 [Załącznik A5].

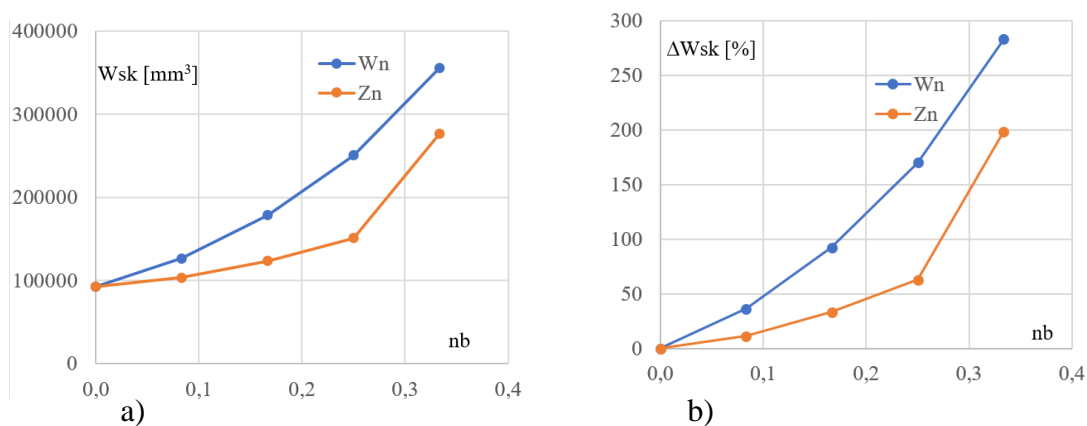
Tabela 23. Naprężenia ściskające σ_c /naprężenia ścinające σ_r obliczone dla najbardziej obciążonych prętów każdego element pochodnej odwróconej konfiguracji trapezowej K_{pj} ($j=1-4$) [Załącznik A5].

Konfiguracja	Kp1	Kp2	Kp3	Kp4
Element	Przekrój poprzeczny	Przekrój poprzeczny	Przekrój poprzeczny	Przekrój poprzeczny
P_s	177.8 x 5.6	244.5 x 4	273 x 4.5	323.9 x 4.5
P_d	114.3 x 4	114.3 x 4	114.3 x 4	114.3 x 4
P_g	219.1 x 4.5	219.1 x 4.5	219.1 x 4.5	219.1 x 4.5
P_k	101.6 x 3	88.9 x 3	88.9 x 3	88.9 x 3
Naprężenia	σ_c / σ_r [MPa]	σ_c / σ_r [MPa]	σ_c / σ_r [MPa]	σ_c / σ_r [MPa]
P_s	210/-121	218/-127	222/-148	214/-150
P_d	179/-235	177/-233	195/-231	207/-228
P_g	230/-131	217/-128	210/-129	228/-158
P_k	179/-236	207/-233	209/-228	211/-222
φ_{cr}	1.26	2.11	2.79	6.24

Tabela 24. Naprężenia ściskające σ_c /naprężenia ścinające σ_r obliczone dla najbardziej obciążonych prętów każdego element pochodnej konfiguracji trapezowej K_{pj} ($j=5-8$) [Załącznik A5].

Konfiguracja	Kp5	Kp6	Kp7	Kp8
Element	Przekrój poprzeczny	Przekrój poprzeczny	Przekrój poprzeczny	Przekrój poprzeczny
P_s	177.8 x 4.5	193.7 x 4.5	193.7 x 5.6	273 x 5
P_d	114.3 x 4	114.3 x 4	114.3 x 4	127 x 4.5
P_g	244.5 x 4	244.5 x 4	244.5 x 4	273 x 4.5
P_k	114.3 x 3	114.3 x 3	114.3 x 3	101.6 x 3
Naprężenia	σ_c / σ_r [MPa]	σ_c / σ_r [MPa]	σ_c / σ_r [MPa]	σ_c / σ_r [MPa]
P_s	211/-132	235/-160	233/-171	228/-153
P_d	135/-236	140/-236	141/-236	129/-218
P_g	222/-104	223/-104	225/-105	221/-91
P_k	156/-223	176/-232	175/-226	206/-228
φ_{cr}	1.23	1.29	2.02	4.37

Ponieważ słupy są przede wszystkim zginanymi elementami ramy, ich odkształcenie zależy od wielkości wskaźnika wytrzymałości ich przekrojów poprzecznych. Obliczyłam wartości wskaźników wytrzymałości przekrojów obliczonych przekrojów, aby uzyskać możliwość optymalizacji właściwości konstrukcyjnych słupów. Obliczone wartości wskaźników wytrzymałościowych optymalnych przekrojów poprzecznych odpowiadają punktom na wykresach przedstawionych na Rysunku 40a-b. Przez wyznaczone punkty poprowadziłam dwie linie łamane W_n i Z_n przedstawiające zależności pomiędzy nachyleniem, a właściwościami mechanicznymi (wskaźnikami wytrzymałości przekroju) przekrojów poprzecznych słupów w konfiguracjach ramy trapezowej odwróconej i trapezowej [Załącznik A5].

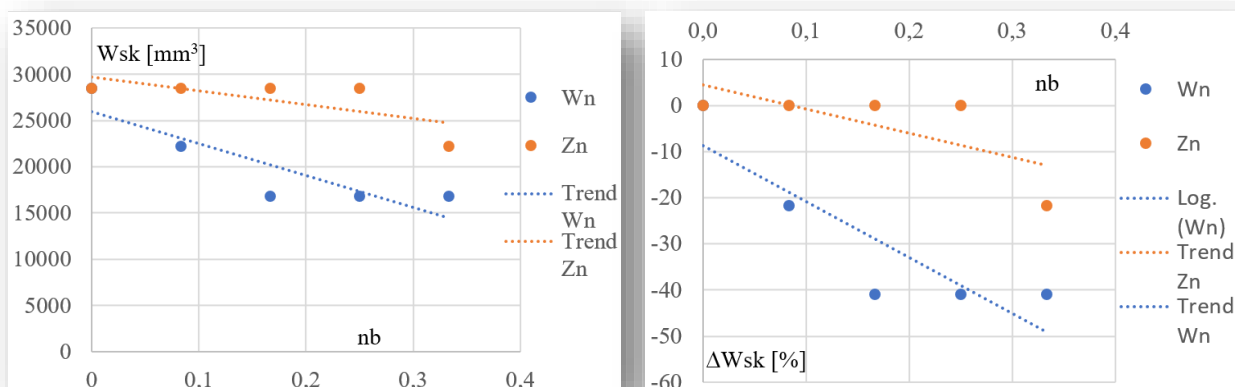


Rysunek 40. Linie W_n i Z_n pokazujące zależność pomiędzy wielkością wskaźników wytrzymałości przekroju W_{sk} przekrojów poprzecznych odwróconych trapezów konfiguracji K_{pj} ($j=1-4$) – linia W_n i trapezów konfiguracji K_{pj} ($j=5-8$) – linia Z_n , a nachyleniem n_b tych kolumn: a) bezwzględne wartości wskaźnika W_{sk} , b) względne przyrosty wskaźnika wytrzymałości przekroju W_{sk} [Załącznik A5].

Wykresy przedstawiają zmiany właściwości mechanicznych (wskaźnika wytrzymałości przekroju) zoptymalizowanych kolejnych ram, których słupy mają zmienne nachylenie do pionu. Pojedyncza linia ilustruje więc sposób, w jaki zmiana kąta nachylenia słupów powoduje konieczność zmiany wielkości przekrojów tych słupów (wskaźnika wytrzymałości przekroju) w celu optymalizacji ich pracy zgodnie z przyjętymi kryteriami nośności i stateczności [Załącznik A5].

Wraz ze wzrostem nachylenia nb słupów w konfiguracjach pochodnych, naprężenia ich prętów znacznie wzrastają powyżej maksymalnego dopuszczalnego poziomu przewidywanego dla stali S235 przy zachowaniu wymiarów przekrojów obliczonych dla zoptymalizowanego K_b . Dlatego też, dla kolejnych konfiguracji pochodnych K_{pj} zmieniałam wielkości przekrojów wybranych elementów tak, aby uzyskać jak najwyższe naprężenia dopuszczalne występujące w ich słupach [Załącznik A5].

Duże punkty W_n i Z_n , pokazane na Rysunku 41a-b, wynikają z obliczeń wykonanych dla dyskretnej konfiguracji ram i reprezentują zależności między nachyleniem, a właściwościami mechanicznymi przekrojów poprzecznych stężeń poprzecznych należących do konfiguracji ram trapezowych. Przedstawione przerywane linie proste reprezentujące dwie grupy punktów i nazwane Trend W_n i Trend Z_n (Rysunki 41a-b), pokazują trendy zmian wartości wskaźników wytrzymałości przekroju obliczonych dla zoptymalizowanych przekrojów poprzecznych stężeń poprzecznych kolejno badanej prostokątnej konfiguracji podstawowej K_b i trapezowych konfiguracji pochodnych K_{pj} dla $j = 1-4$ - linia W_n , i $j = 5-8$ - linia Z_n [Załącznik A5].

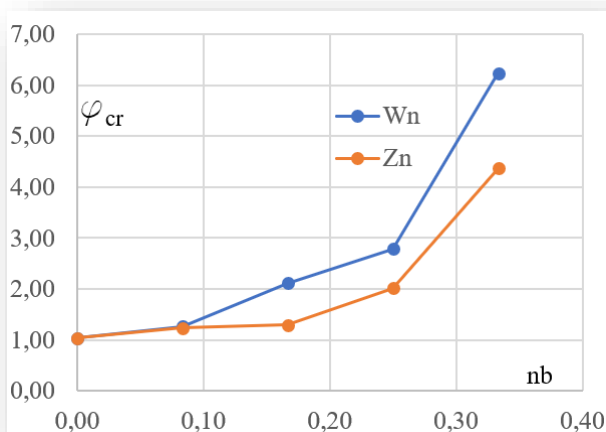


a)

b)

Rysunek 41. Linie W_n i Z_n pokazujące trendy pomiędzy wielkością wskaźników wytrzymałości przekroju W_{sk} przekrojów poprzecznych odwróconych przekrojów trapezowych K_{pj} ($j=1-4$) – Trend W_n lub trapezowych konfiguracji K_{pj} ($j=5-8$) – trend Z_n , a nachyleniem przekrojów poprzecznych: a) bezwzględne wartości W_{sk} , b) względne przyrosty W_{sk} [Załącznik A5].

W związku z niewielką zmiennością wyników wyznaczyłam proste trendy (linie proste przerywane) obrazujące tendencje niewielkich zmian wielkości zoptymalizowanych przekrojów poprzecznych krzyżulców. Ważny trend w jakościowych zmianach mechanicznych analizowanych konfiguracji przedstawiłam na Rysunku 42 [Załącznik A5].



Rysunek 42. Zależność współczynnika obciążenia krytycznego φ od nachylenia nb słupów obliczone dla: odwróconych konfiguracji trapezowych K_{pj} ($j=1$ do 4) - linia W_n oraz dla konfiguracji trapezowych K_{pj} ($j=5$ do 8) - linia Z_n [Załącznik A5].

Uzyskane zależności są silnie nieliniowe i świadczą o coraz silniejszym wpływie wzrostu nachylenia słupów na wielkość optymalnych przekrojów słupów, a w mniejszym stopniu na wielkość krzyżulców. Analogiczna zależność uzyskana dla konfiguracji trapezowych jest wyraźnie słabsza niż dla odwróconych konfiguracji trapezowych. Pozostałe element badanych konfiguracji ram nie wykazują tendencje do zmian w optymalnych przekrojach spowodowanych nachyleniem słupów do pionu [Załącznik A5].

6.6.3 Wnioski

Zmiana nachylenia słupa do pionu powoduje znaczący nieliniowy wzrost naprężeń w słupie i współczynnika obciążeń krytycznych całej płaskiej ramy obciążonej założonymi typami obciążeń. Zmiana ta powoduje jednak konieczność znacznego zwiększenia rozmiaru przekroju pręta przekroju słupów. Zmiana nachylenia słupa do pionu powoduje również większy wzrost wartości wskaźnika wytrzymałości przekroju

wybranych przekrojów elementów prętowych dla ram trapezowych niż dla odwróconych ram trapezowych [Załącznik A5].

Analizowane zmiany mechaniczne ram spowodowane zmianami nachylenia ich słupów są nie tylko ilościowe, ale także jakościowe. Wynika to z faktu, że decydującym warunkiem dotyczącym minimalnego rozmiaru przekrojów słupów ram prostokątnych są obciążenia krytyczne i zdolność tych ram do utraty ogólnej stateczności spowodowanej rodzajami i wartościami zastosowanych obciążeń. Z kolei w przypadku ram trapezowych i odwróconych ram trapezowych o stosunkowo niewielkim nachyleniu słupów do pionu, plastyczność stali jest decydującym warunkiem ograniczającym minimalny rozmiar ich przekrojów [Załącznik A5].

Uzyskane duże zmiany właściwości mechanicznych rozważanych ram spowodowane zmianą nachylenia słupów lub dźwigarów uzasadniają prowadzenie dalszych badań w celu optymalizacji wydajności różnych płaskich ram ze względu na ich wielkość obciążenia. Przeprowadzona analiza powinna prowadzić do procedury parametrycznej, która pozwoli zoptymalizować przekroje elementów rozważanych typów ze względu na ich maksymalne obciążenia [Załącznik A5].

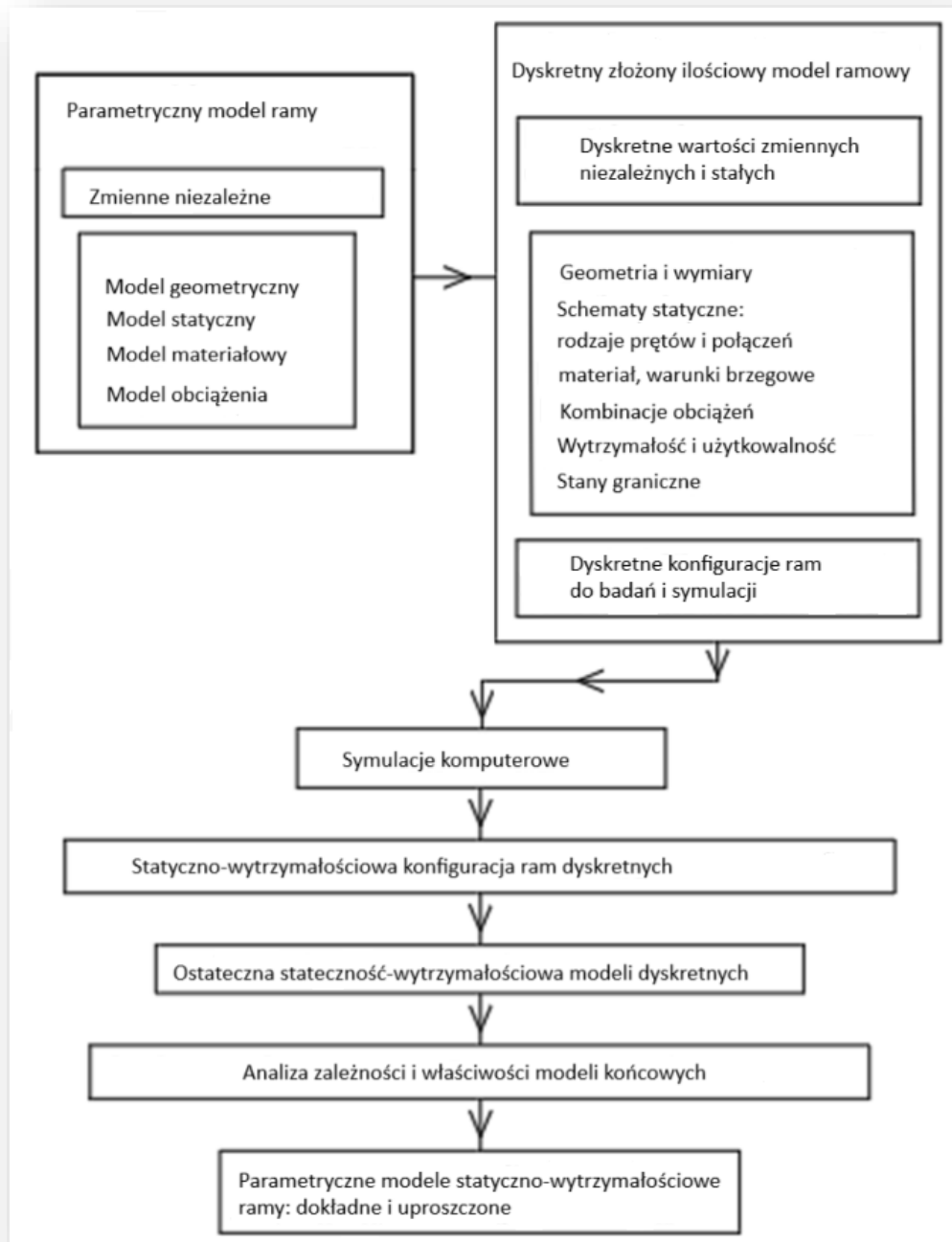
6.7 Publikacja 6

„Impact of Column Support Stiffness on the Mechanical Performance of Flat Frame Structural Systems Supporting Thin-Walled Folded Roofs” – Załącznik A6 [17-95].

Celem tej publikacji jest przedstawienie parametrycznego mechanicznego modelu ramy za pomocą analitycznego opisu bazującego na zależnościach zaobserwowanych w trakcie badań. Dokonany opis pozwala na wykorzystanie (w procesie automatyzacji obliczeń) dyskretnej wartości parametrów określających projektowany układ konstrukcyjny ramy płaskiej (na wykorzystanie w celu łączenia prętów z wykorzystaniem połączeń o różnych sztywnościach). Wspólnie z promotorem opracowałam jednoparametrowy model ramy, w którym przyjęłam, że sztywność połączeń podporowych zmienia się w zakresie: 50, 100 i 500 kNm/Deg [Załącznik A6].

6.7.1 Metodologia

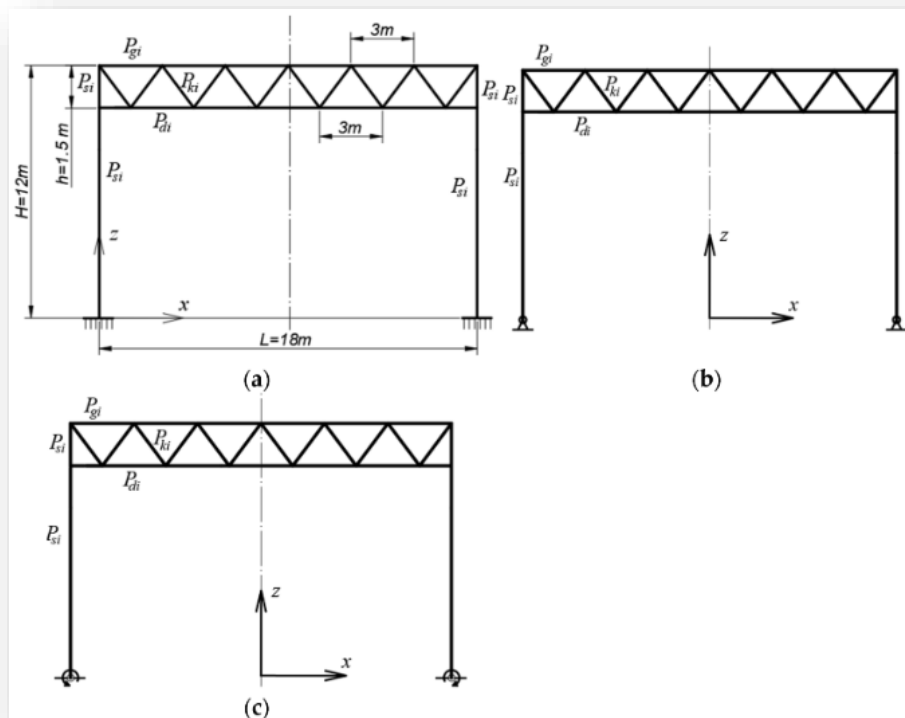
Opracowaną koncepcję badawczą, przedstawiłam poniżej, w postaci schematu blokowego [Załącznik A6].



Rysunek 43. Metodologia badania [Opracowanie własne] [Załącznik A6].

Na początku badań zdefiniowałam proste modele: geometryczny, statyczny, materiałowy, fizyczny i obciążeń, z wykorzystaniem zmiennych niezależnych (parametrów) i stałych współczynników. W wyniku rozszerzenia definicji na wszystkie wyżej wymienione modele, powstaje złożony parametryczny model projektowy ramy. Następnie przyjął małe dyskretne wartości zmiennych niezależnych w celu zdefiniowania konkretnych dyskretnych modeli ramowych wykorzystywanych w kolejnych symulacjach. Kolejno przeprowadziłam symulacje pracy statyczno-wytrzymałościowej skonstruowanych modeli dyskretnych. W oparciu o uzyskane wyniki, przeanalizowałam istotność zaobserwowanych zależności. Na podstawie powyższej analizy, w ostatnim etapie badań, opracowałam wynikowy parametryczny model ramy statyczno-wytrzymałościowej [Załącznik A6].

Model geometryczny ramy zdefiniowałam jako zestaw przekrojów o wymiarach pokazanych poniżej na Rysunku 44. Model statyczny ramy został stworzony na podstawie wyżej wymienionego modelu geometrycznego, przy założeniu, że: każdy przekrój jest modelem jednego pręta; istnieją cztery rodzaje elementów, słupy P_{si} ($i=1$ do 4), pas dolny P_{di} ($i=11$ do 17), pas górny P_{gi} ($i=5$ do 10) oraz krzyżulce P_{ki} ($i=18$ do 29). Pręty są sztywno połączone na połączeniach, z wyjątkiem połączeń podparcia słupa, których sztywność k przyjął jako parametr - zmienną niezależną [Załącznik A6].



Rysunek 44. Trzy rodzaje badanych ram: a) podstawowa ze sztywnym podparciem słupa, b) rama pochodna ze sztywnymi połączeniami podpór słupów, c) rama pochodna z przegubowymi połączeniami podpory słupa [Załącznik A6].

Ostatecznie przyjąłem, że wyżej wymienione połączenia słupów są przegubowe, elastyczne lub sztywne. Za odniesienie przyjąłem konfigurację C_{fg1} ze sztywnymi połączeniami wsporczy (Rysunek 44a). Dla tej konfiguracji przeprowadziłem optymalizację. Optymalizacja dotyczyła wszystkich typów elementów należących do C_{fg1} . Kolejne testowane konfiguracje pochodne C_{fgi} ($i=2$ do 5) charakteryzowały się podobnymi przekrojami elementów jak w C_{fg1} . Badałem trzy typy konfiguracji ram C_{fgi} z elastycznymi połączeniami, w których przyjąłem następujące sztywności: 50, 100 i 500 kNm/Deg (Tabela 23) [Załącznik A6].

Tabela 25. Testowane konfiguracje ram z różnymi typami połączeń wsporczych [Załącznik A6].

Konfiguracja	cfg1	Cfg2	Cfg3	Cfg4	Cfg4
Rodzaj połączeń	Sztywne	Półsztywne	Półsztywne	Półsztywne	Przegubowe
Sztywność k (kNm/Deg)	5000	500	100	50	0
Elastyczność c (Deg/kNm)	0.000	0.01	0.02	100	10,000
D_{op_cl}/d_{op_cl} (mm)	406.4/6.3	406.4/6.3	406.4/6.3	406.4/6.3	406.4/6.3
D_{op_tp}/d_{op_tp} (mm)	168.3/4.5	168.3/4.5	168.3/4.5	168.3/4.5	168.3/4.5
D_{op_bt}/d_{op_bt} (mm)	114,3/5,0	114,3/5,0	114,3/5,0	114,3/5,0	114,3/5,0
D_{op_dg}/d_{op_dg} (mm)	70/3,6	70/3,6	70/3,6	70/3,6	70/3,6

Model materiałowy jest rozszerzeniem modeli geometrycznych i statycznych. Zastosowany materiał to stal S235. Model uwzględnia również ograniczenia dotyczące granicy plastyczności tej stali, stateczności całej ramy i jej poszczególnych elementów, przemieszczeń połączeń ramy oraz ugięć elementów ramy. Przyjęte właściwości mechaniczne są następujące: granica plastyczności stali $f_y = 235$ MPa, moduł sprężystości $E = 205$ GPa, moduł odkształcenia przy ścinaniu Kirchhoffa $G = 80$ MPa i ciężar właściwy stali $\rho = 7800$ kg/m³. Dla konstruowanych modeli przyjęłam następujące ograniczenia optymalizacyjne: współczynnik obciążenia krytycznego $f_{Cr} \geq 1,0$; maksymalny wzrost przemieszczeń poziomych połączeń ramy $\Delta x \leq H/150$; maksymalny wzrost ugięcia dźwigara $\Delta z \leq L/250$ [Załącznik A6].

Model obciążenia składa się z następujących wystąpień: wiatru, śniegu, obciążeń ruchomych i obciążenia własnego prętów ramy. Założyłam jeden rodzaj obciążenia wiatrem i jeden rodzaj obciążenia śniegiem charakterystyczne dla obszarów nizinnych w Europie Środkowej. W obliczeniach dotyczących obciążeń śniegiem przyjęłam współczynniki $c_e = 1,0$ i $s_k = 0,9$, co dało wynik $0,72$ kN/m². W obliczeniach dotyczących obciążeń wiatrem $v_{D0} = 19,8$ m/s, $q_b = 245$ N/m² oraz $g_p = 0,593$ kN/m² zostały założone. Dobrałam charakterystyczną wysokość terenu $z_{Ter} = 300$ m n.p.m. i charakterystyczna

wartość obciążenia użytkowego 0,3 kN/m². Ponieważ rozstaw rozważanych poprzecznych układów ramowych wynosi 6 m, wartości z Tabeli 26 należy pomnożyć przez 6, aby uzyskać obciążenie w kN/m dla dźwigarów lub słupów [Załącznik A6].

Tabela 26. Charakterystyki obciążenia symulowanych modeli [Załącznik A6].

Dźwigar		Kolumna	
Współczynnik	Wartość	Współczynnik	Wartość
GD (kN/m ²)	1.04	GSc (kN/m ²)	0.5
S1 (kN/m ²)	0.72	WDep + Wis (kN/m ²)	0.631
S2 (kN/m ²)	0.36	WEep + Wis (kN/m ²)	0.134
WEp + Wjest (kN/m ²)	-0,042	WBep + Wis (kN/m ²)	0.631
WEs + WIp (kN/m ²)	-0,31		

Dla wyżej wymienionych indywidualnych przypadków śniegu, wiatru itp. Obliczyłam standardowe kombinacje obciążeń [90,91]. W tym celu wykorzystałam ogólnie znane wzory (1a) i (1b) dla stanu granicznego SGN oraz (1c) dla stanu granicznego SGU [92]. Po podstawieniu odpowiednich wartości współczynników do tych wzorów, w sposób opisany w dalszej części wraz z promotorem utworzyłam 12 kombinacji typu SGN oraz sześć kombinacji typu SGU [Załącznik A6].

$$Kmbi = \sum \xi_j \cdot Y_{G,j} \cdot G_{k,j} + Y_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum Y_{Q,i} \cdot \sum \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (1a)$$

$$Kmbi = \sum Y_{G,j} \cdot G_{k,j} + Y_{Q,1} \cdot \psi_{0,1} \cdot Q_{k,1} + \sum Y_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (1b)$$

$$Kmbi = \sum G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum Y_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (1c)$$

Gdzie: $\gamma_{G,j} = 1.35$ lub 1.00 , $\gamma_{Q,1} = 1.5$ lub 0 , $\gamma_{Q,i} = 1.5$ lub 0 , $\xi = 0.85$, $\psi_0 = 0.5$ (dla śniegu) lub 0.6 (dla wiatru).

Obliczono standardowe kombinacje obciążeń, wykorzystując ogólne wzory dla stanu granicznego SGN oraz dla stanu granicznego SGU. W tym celu utworzono 12 kombinacji typu SGN oraz 6 kombinacji typu SGU. [Załącznik A6].

W przypadku rozpatrywanych modeli i symulacji przyjęłam następujące obciążenia szczegółowe i ich kombinacje, działające na przegrodę zewnętrzną budynku.

Przyjęłam, że w pierwszej kombinacji K_{omb1} śnieg jest obciążeniem wiodącym, obciążenie górnego pasa dźwigara obliczyłam ze wzoru:

$$K_{Roof_1} = 1.35 \cdot 0.85 + G_R + 1.5 \cdot S_1 + 1.5 \cdot 0.6 \cdot (W_{Rep,1} + W_{Ris,1}) \quad (2a)$$

Obciążenia słupów obliczyłam za pomocą wzorów:

$$K_{ScD_1} = 1.35 \cdot 0.85 \cdot G_D + 1.5 \cdot 0.6 \cdot (W_{Dep,1} + W_{Dis,1}) \quad (2b)$$

$$K_{ScE_1} = 1.35 \cdot 0.85 \cdot G_D + 1.5 \cdot 0.6 \cdot (W_{Eep,1} + W_{Eis,1}) \quad (2c)$$

Gdzie: G_R - równomiernie rozłożone obciążenie ciężarem własnym dachu; S_1 - równomiernie rozłożone obciążenie śniegiem; $W_{Rep,1}$ - równomiernie rozłożone parcie wiatru na powierzchnię dachu; $W_{Ris,1}$ - ciśnienie ssania wewnątrz budynku; G_D - równomiernie rozłożone obciążenie ciężarem własnym ścian; $W_{Dep,1}$ - równomiernie rozłożone parcie wiatru na ścianę nawietrzną; $W_{Dis,1}$ - wewnętrzne ciśnienie ssania działające na ścianę nawietrzną; $W_{Eep,1}$ - równomiernie rozłożone ssanie wiatru działające na ścianę zawietrzną; $W_{Eis,1}$ - wewnętrzne ciśnienie ssania działające na ścianę zawietrzną [Załącznik A6].

Założyłam, że w przypadku drugiej kombinacji K_{omb2} , obciążeniem wiodącym jest ciężar własny dachu i ścian, a następnie obciążenie górnego pasa dźwigara zostało obliczyłam za pomocą wzoru [Załącznik A6]:

$$K_{Roof_2} = 1.35 \cdot G_R + 1.5 \cdot 0.5 \cdot S_1 + 1.5 \cdot 0.6 \cdot (W_{Rep,1} + W_{Ris,1}) \quad (3a)$$

Obciążenia słupów obliczyłam za pomocą wzorów [Załącznik A6]:

$$K_{ScDE_2} = 1.35 \cdot G_D + 1.5 \cdot 0.6 \cdot (W_{Dep,1} + W_{Dis,1}) \quad (3b)$$

$$K_{ScE_2} = 1.35 \cdot G_D + 1.5 \cdot 0.6 \cdot (W_{Eep,1} + W_{Eis,1}) \quad (3c)$$

W przypadku trzeciej kombinacji obciążeń K_{omb3} wiatr jest wiodący, a następnie obciążenie działające na pas górny obliczyłam ze wzoru [Załącznik A6]:

$$K_{Roof_3} = 1.35 \cdot 0.85 \cdot G_R + 1.5 \cdot 0.5 \cdot S_1 + 1.5 \cdot (W_{Rep,1} + W_{Ris,1}) \quad (4a)$$

Obciążenia słupów obliczyłam za pomocą wzorów [Załącznik A6]:

$$K_{ScDE_3} = 1.35 \cdot G_D + 1.5 \cdot (W_{Dep,1} + W_{Dis,1}) \quad (4b)$$

$$K_{ScE_3} = 1.35 \cdot G_D + 1.5 \cdot (W_{Eep,1} + W_{Eis,1}) \quad (4c)$$

Dla kolejnych trzech kombinacji Komb4, Komb5 i Komb6 zastosowałam wzory analogiczne do wzorów (2a)-(4c), założyłam jednocześnie, że górny pas dźwigara jest nierównomiernie obciążony śniegiem. Kombinacje Kombi (i=1 do 6) odnoszą się do stanów granicznych nośności (SGN) ram, zaś kombinacje Kombi (i=7 do 9) odnoszą się do stanu granicznego użyteczności (SGU) rozważanych ram [Załącznik A6].

Wzory przedstawione w punktach (5a)-(5c) odnoszą się do kombinacji opisujących możliwość podniesienia dachu, ze względu na działające ciśnienie wewnętrzne i ssanie wiatru [Załącznik A6].

$$K_{Roof_7} = G_R + S_1 + 0.6 \cdot (W_{Rep,1} + W_{Ris,1}) \quad (5a)$$

$$K_{ScDE_7} = G_D + S_1 + 0.6 \cdot (W_{Dep,1} + W_{Dis,1}) \quad (5b)$$

$$K_{ScE_7} = G_D + S_1 + 0.6 \cdot (W_{Eep,1} + W_{Eis,1}) \quad (5c)$$

Równania przedstawione w punktach (6a)-(6c) uwzględniają kombinacje obciążeń z dominującym udziałem śniegu [Załącznik A6].

$$K_{Roof_8} = G_R + 1.5 \cdot S_1 + W_{Rep,1} + W_{Ris,1} \quad (6a)$$

$$K_{ScDE_8} = G_D + 1.5 \cdot S_1 + W_{Dep,1} + W_{Dis,1} \quad (6b)$$

$$K_{ScE_8} = G_D + 1.5 \cdot S_1 + W_{Eep,1} + W_{Eis,1} \quad (6c)$$

Równania przedstawione w punktach (7a)-(7c) uwzględniają kombinacje z asymetrycznym obciążeniem śniegu [Załącznik A6].

$$K_{Roof_9} = G_R + S_1 + 0.6 \cdot (W_{Rep,1} + W_{Ris,1}) \quad (7a)$$

$$K_{ScDE_9} = G_D + S_1 + 0.6 \cdot (W_{Dep,1} + W_{Dis,1}) \quad (7b)$$

$$K_{ScE_9} = G_D + S_1 + 0.6 \cdot (W_{Eep,1} + W_{Eis,1}) \quad (7c)$$

Kolejne dziewięć kombinacji Kombk (k=10 do 18) jest związanych z różnie działającymi kierunkami wiatru na budynek. Orientacja dźwigarów ramy jest równoległa do kierunku naporu wiatru, obciążenie ze ścian bocznych poddanych ssaniu wiatru i ciśnieniu wewnętrznemu zaś jest przenoszone na słupy dźwigara [Załącznik A6].

Kombinacje K_{ombi}(i=10 do 15) odnoszą się do stanów granicznych nośności, analogicznie do kombinacji K_{ombi} (i=1 do 6). Różnią się tym, że w przypadku równań (8a)-(8c) użyte do obliczeń obciążenia działają na oba słupy ramy. Kombinacje, w których użyłam asymetryczne obciążenie śniegiem nie zostały przedstawione ze względu na analogię do zastosowanych symetrycznych obciążeń śniegiem [Załącznik A6].

$$K_{_ScB_{10}} = 1.35 \cdot 0.85 \cdot G_D + 1.5 \cdot S_1 + 1.5 \cdot 0.6 \cdot (W_{Bep,2} + W_{Bis,2}) \quad (8a)$$

$$K_{_ScB_{11}} = 1.35 \cdot G_D + 1.5 \cdot 0.5 \cdot S_1 + 1.5 \cdot 0.6 \cdot (W_{Bep,2} + W_{Bis,2}) \quad (8b)$$

$$K_{_ScB_{12}} = 1.35 \cdot 0.85 \cdot G_D + 0.5 \cdot 1.5 \cdot S_1 + 1.5 \cdot (W_{Bep,2} + W_{Bis,2}) \quad (8c)$$

Do obliczeń związanych ze stanem granicznym użyteczności dla rozpatrywanych ram, wykorzystałam kombinacje obciążeń Kombi (i=16 do 18), które przedstawiłam we wzorach (9a)-(9c) [Załącznik A3].

$$K_{_ScB_{16}} = G_D + 1.5 \cdot (W_{Bep,2} + W_{Bis,2}) \quad (9a)$$

$$K_{_ScB_{17}} = G_D + S_1 + 0.6 \cdot (W_{Bep,2} + W_{Bis,2}) \quad (9b)$$

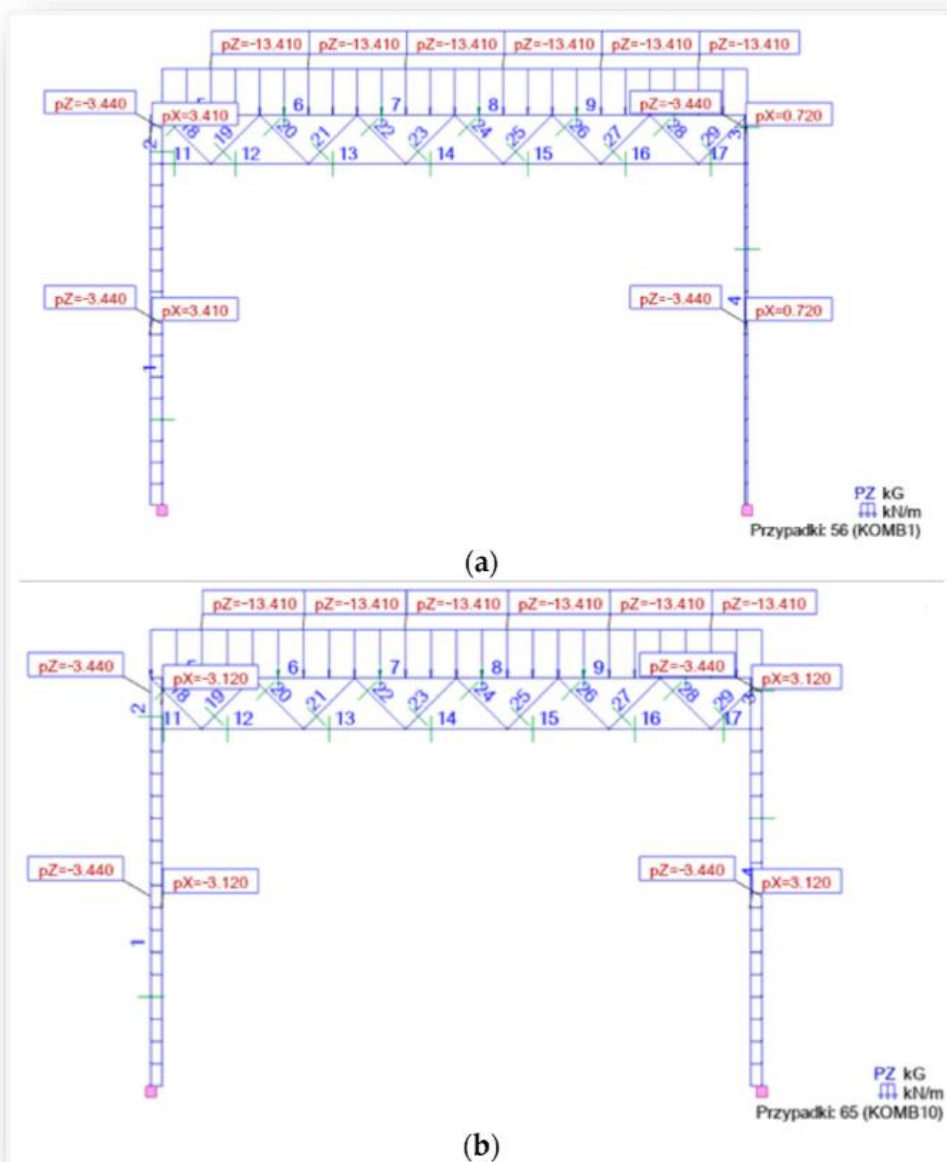
$$K_{_ScB_{18}} = G_D + 0.5 \cdot S_1 + W_{Bep,2} + W_{Bis,2} \quad (9c)$$

Wartości obciążenia użytkowego, wiatru, śniegu i ciśnienia wewnętrznego działającego na dach i poszczególne ściany budynku obliczyłam i dla każdej wcześniej wymienionej kombinacji obciążeń przedstawiłam w Tabeli 27 [Załącznik A6].

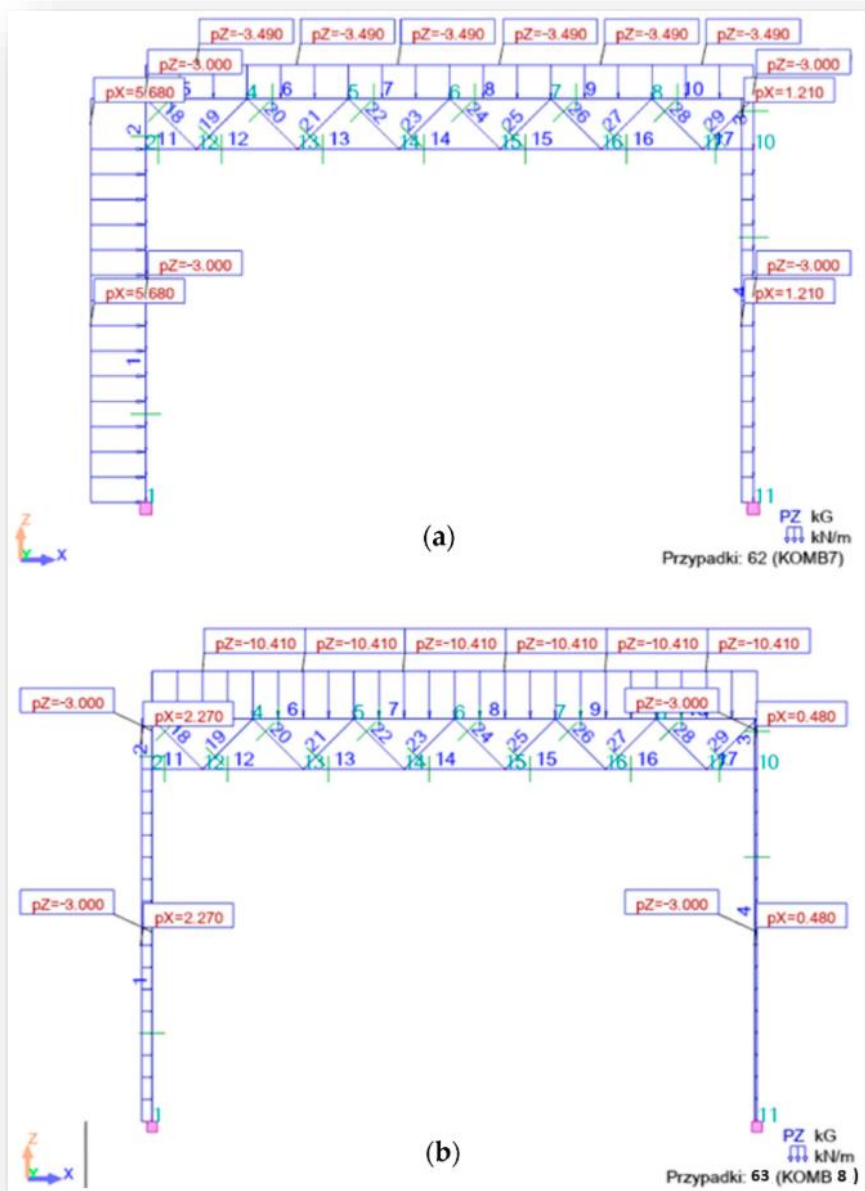
Tabela 27. Wartości obciążenia działającego na dach i ściany budynku dla każdej z rozpatrywanych kombinacji obciążeń [Załącznik A6].

	Dach (kN/m ²)	Ściana zewnętrzna(kN/m ²)	Ściana wewnętrzna (kN/m ²)	Ściany boczne (kN/m ²)	Ciężar ściany (kN/m ²)
Komb1	2.24	0.57	0.12	-	0.5737
Komb2	1.91	0.57	0.12	-	0.675
Komb3	1.67	0.95	0.20	-	0.5737
Komb4	1.70	0.57	0.12	-	0.5737
Komb5	1.64	0.57	0.12	-	0.675
Komb6	1.40	0.95	0.20	-	0.5737
Komb7	0.58	0.95	0.20	-	0.5
Komb8	1.73	0.38	0.08	-	0.5
Komb9	1.36	0.63	0.13	-	0.5
Komb10	2.24	-	-	0.52	0.5737
Komb11	1.91	-	-	0.52	0.675
komb12	1.67	-	-	0.87	0.5737
komb13	1.70	-	-	0.52	0.5737
Komb14	1.64	-	-	0.52	0.675
komb15	1.40	-	-	0.87	0.5737
komb16	0.58	-	-	0.87	0.5
komb17	1.73	-	-	0.35	0.5
komb18	1.36	-	-	0.58	0.5

Przykłady dwóch kombinacji K_{omb1} i K_{omb10} , które spełniły wymagania stanu granicznego nośności przedstawiłam na Rysunku 45, zaś przykłady dwóch kombinacji $Komb7$ i $Komb8$ spełniających wymagania stanu granicznego użyteczności przedstawiłam na Rysunku 46 [Załącznik A6].



Rysunek 45. Stan graniczny nośności: a) K_{omb1} z asymetrycznym obciążeniem wiatrem ścian szczytowych i symetrycznym obciążeniem śniegiem dachu, b) K_{omb10} z symetrycznym obciążeniem wiatrem na ścianach bocznych i symetrycznym obciążeniem śniegiem na dachu [Załącznik A6].



Rysunek 46. Stan graniczny użyteczności: a) K_{omb7} ze skorygowanym obciążeniem wiatrem szczytów i dachu oraz obciążeniem śniegiem całego dachu, b) K_{omb8} z pełnym obciążeniem wiatrem szczytów i dachu oraz skorygowanym obciążeniem dachu śniegiem [Załącznik A6].

6.7.2 Wyniki

Wyniki symulacji wytrzymałości i stateczności pierwszej badanej grupy konfiguracji ramy C_{fgi} ($i = 1$ do 5) przedstawiłam w Tabeli 28. Analogiczne elementy każdej z tych konfiguracji charakteryzują się identycznymi przekrojami, co oznacza, że przekroje konfiguracji C_{fgi} ($i = 2$ do 5) celowo nie zostały zoptymalizowane ze względu na przedstawione wcześniej warunki optymalizacyjne i cele symulacji. Za punkt odniesienia przyjęto konfigurację C_{fg1} ze stałymi kolumnami, a przekroje wszystkich jej elementów zoptymalizowałam, przy zachowaniu warunków podanych w sekcji metodycznej [Załącznik A6].

Tabela 28. Charakterystyki mechanicznych właściwości badanych konfiguracji ram charakteryzujących się stałymi przekrojami analogicznych elementów, bez optymalizacji przekrojów [Załącznik A6].

	Dach (kN/m ²)	Ściana nawietrzna (kN/m ²)	Ściana zawietrzna (kN/m ²)	Ściany boczne (kN/m ²)	Ciężar ściany (kN/m ²)
Konfiguracja	cfg1	Cfg2	Cfg3	Cfg4	Cfg5
$\sigma_{max_cl}/$ σ_{min_cl}	236/-218	230/-201	289/-260	333/-303	482/-448
$\sigma_{max_tp}/$ σ_{min_tp}	233/-123	234/-126	237/-131	239/-134	238/-154
$\sigma_{max_bt}/$ σ_{min_bt}	179/-226	193/-231	231/-238	259/-241	335/-241
$\sigma_{max_dg}/$ σ_{min_dg}	232/-236	232/-236	239/-246	245/-254	263/-277
Δx (mm)	38	39	40	40	40
Δz (mm)	58	79	136	170	316
Δf (stopnie)	0.007	0.007	0.014	0.021	0.045
k (kNm/°)	Sztywny	500	100	50	0

W przypadku zoptymalizowanej konfiguracji odniesienia C_{fg1} decydującym warunkiem okazało się nieprzekroczenie dopuszczalnych naprężeń dla wszystkich jej elementów. Rama zachowywała wystarczającą stabilność i sztywność pod obciążeniem, dzięki czemu nie zostały przekroczone dopuszczalne przemieszczenia jej połączeń i ugięcia jej elementów oraz współczynnik obciążenia krytycznego [Załącznik A6].

Wyniki symulacji statyczno-wytrzymałościowej drugiej grupy konfiguracji ramy C_{opi} ($i=2$ do 5) przedstawiłam w Tabeli 29. Ponieważ konfiguracja referencyjna C_{fg1} została zoptymalizowana w poprzednim etapie, założyłam, że jest to podstawowa konfiguracja C_{opi1} drugiej zoptymalizowanej grupy C_{opi} . Optymalizację przeprowadziłam dla każdego typu elementu każdej z kolejnych symulowanych ram C_{opi} [Załącznik A6].

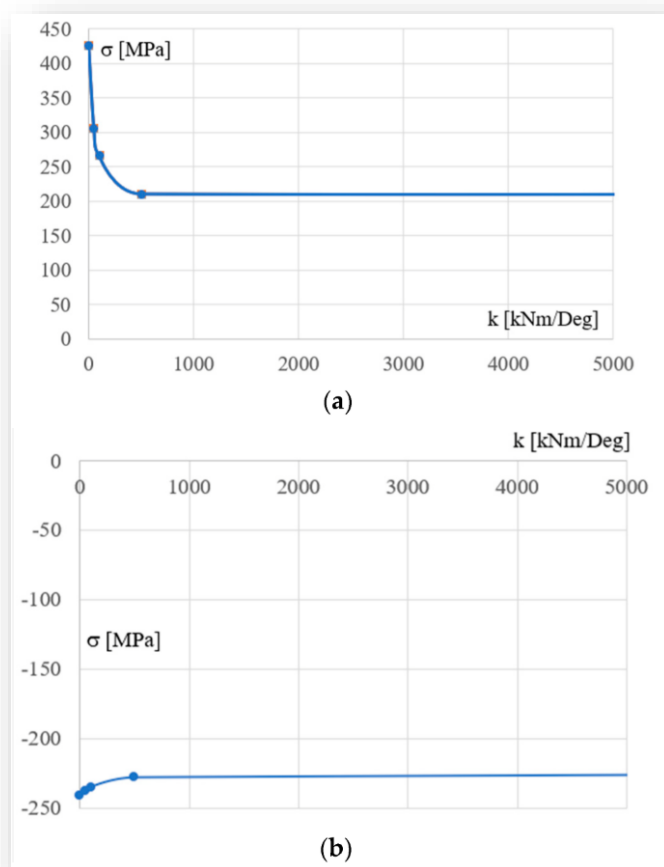
Tabela 29. Charakterystyki: geometryczna i mechaniczna badanych konfiguracji ram o różnych przekrojach analogicznych elementów optymalizowanych ram [Załącznik A6].

Konfiguracja	Cop2	Cop3	Cop4	Cop5	Cop6	Cop7	Cop8
D_{op_cl}/d_{op_cl}	406/6.3	457/5.6	457/8.0	508/8.0	610/6.3	610/7.1	711/8.0
D_{op_tp}/d_{op_tp}	168.3/4.5	168.3/4.5	168.3/4.5	168.3/4.5	168.3/4.5	168.3/4.5	168.3/4.5
D_{op_bt}/d_{op_bt}	114.3/5	114.3/5.0	114.3/5	114.3/4.5	114.3/5.0	114.3/5.6	177.8/5.0
D_{op_dg}/d_{op_dg}	70/3.6	70/3.6	70/4.0	70/4.0	70/4.0	70/4.0	70/4.0
S_{mod_cl} (cm ³)	399,205	450,910	639,090	791,781	906,414	1,019,502	1,561,537
S_{mod_tp} (cm ³)	1174	1174	1174	1174	1174	1174	1174
S_{mod_bt} (cm ³)	878	878	878	792	878	981	1377
S_{mod_dg} (cm ³)	386	386	427	427	427	427	427
k (kNm/Deg)	500	300	180	100	50	25	0

Na podstawie wartości podanych w przedstawionych wcześniej tabelach, przeprowadziłam wspólnie z promotorem analizę wyników i opracowałam poniższe wykresy ilustrujące zaobserwowane zależności pomiędzy modelem obliczeniowym (projektowym), a modelem wynikowym [Załącznik A6].

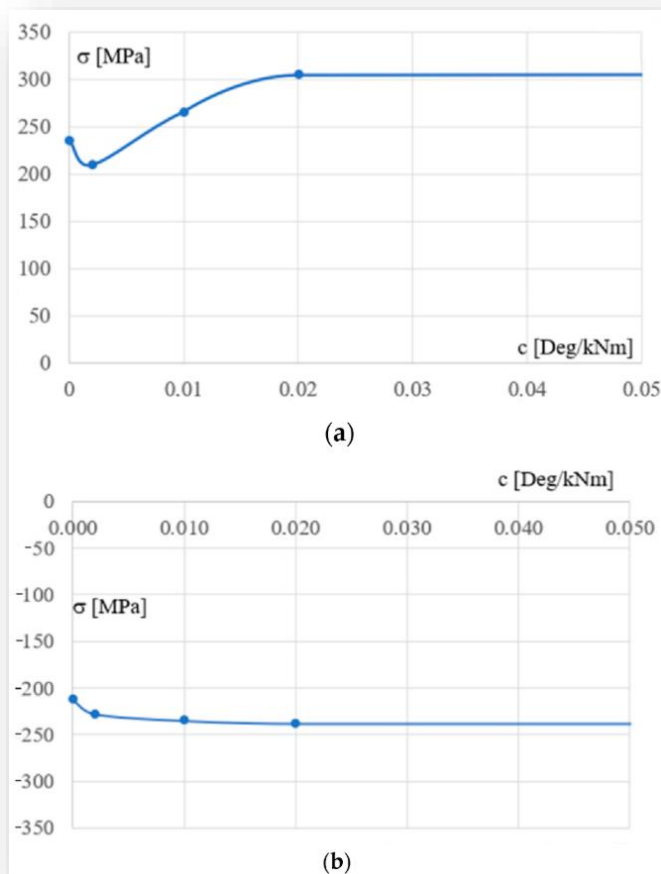
Zależności charakterystyczne dla pierwszego typu C_{fgi} konfiguracji ramy [C_{fgi} (i = 1 do 5)]

Na podstawie wartości podanych w przedstawionych wcześniej Tabelach opracowałam następujące wykresy, w celu zilustrowania zaobserwowanych zależności między modelem obliczeniowym, (projektowym) a modelem wynikowym. Zależności uzyskane dla konfiguracji C_{fgi} (i = 1 do 5) przedstawiłam na Rysunku 47a. Linia z tego wykresu przedstawia nieliniową zależność między sztywnością obrotową k podpory słupa, a maksymalnymi naprężeniami σ występującymi w słupach. Zależność ta jest silnie nieliniowa. Dla pasa dolnego (Rysunek 47b) analogiczna zależność jest słabo liniowa [Załącznik A6].



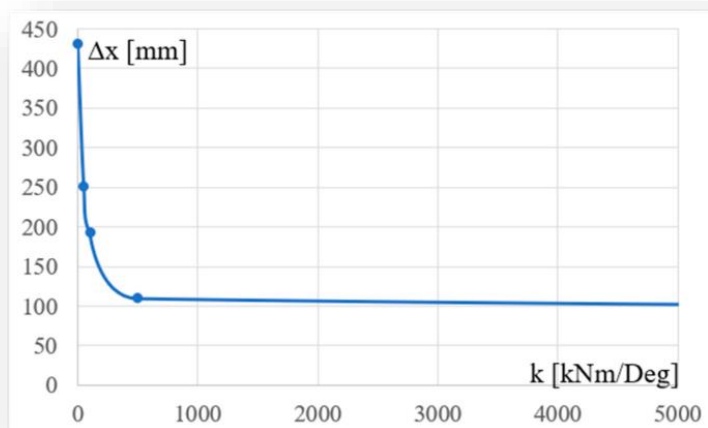
Rysunek 47. Zależność pomiędzy k /sztywnością podpory słupa, a σ maksymalnymi naprężeniami występującymi w a) słupach, b) dolnych pasach analizowanych ram [Załącznik A6].

Rysunek 48 przedstawia zależność między elastycznością c podpory słupa, a maksymalnymi naprężeniami występującymi w słupie – Rysunek 48a i w pasie dolnym – Rysunek 48b. Zależność ta w przypadku słupów jest silnie nieliniowa z lokalnym ekstremum, zaś w przypadku pasa dolnego zależność ta jest słabo nieliniowa [Załącznik A6].



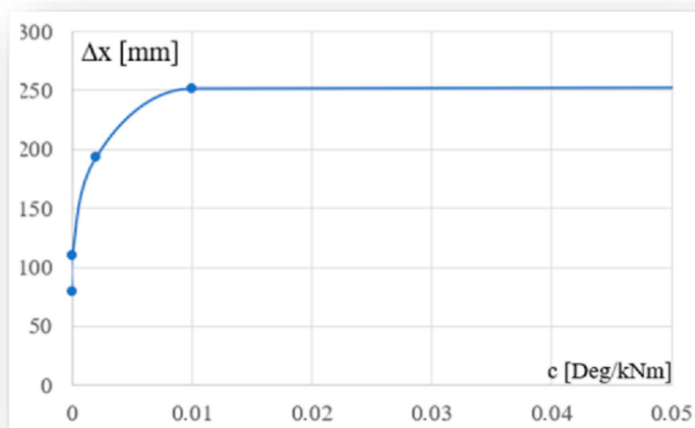
Rysunek 48. Zależność pomiędzy elastycznością c podpory słupa, a σ maksymalnymi naprężeniami występującymi w a) słupie, b) dolnym pasie dźwigara [Załącznik A6].

Oprócz kombinacji obciążeń zdefiniowanych dla SGN, uwzględniono kombinacje obciążeń charakterystyczne dla SGU. Na Rysunku 49 przedstawiłam zależność między sztywnością k podpory słupa, a maksymalnym przemieszczeniem poziomym górnych połączeń słupa dla konfiguracji Cfgi. Zależność ta jest silnie nieliniowa [Załącznik A6].



Rysunek 49. Zależność pomiędzy sztywnością k podpory słupa, a maksymalnym przemieszczeniem poziomym górnych połączeń słupa [Załącznik A6].

Krzywa z Rysunku 50 przedstawia zależność między elastycznością c podpory słupa, a maksymalnym przemieszczeniem poziomym wspólnego połączenia słupa i pasa dolnego. Zależność ta jest również silnie nieliniowa dla konfiguracji Cfgi ($i = 2$ do 5).

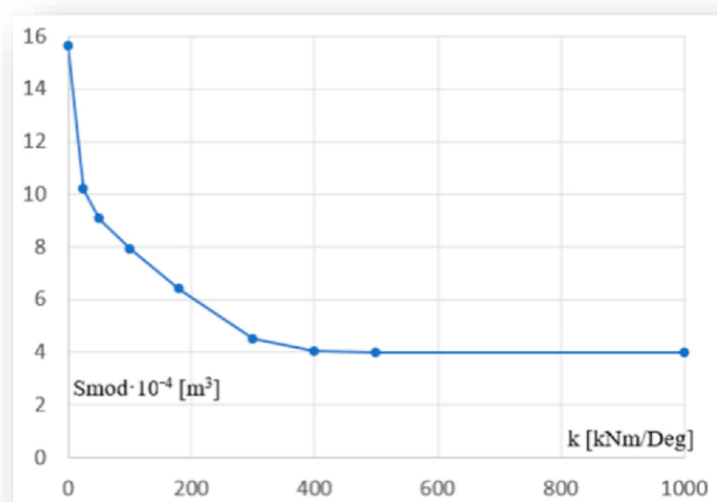


Rysunek 50. Zależność pomiędzy elastycznością c podpory słupa, a maksymalnym przemieszczeniem poziomym wierzchołka słupa analizowanych ram [Załącznik A6].

Charakterystyczne właściwości dla zoptymalizowanych konfiguracji ramy Copi

W wyniku przeprowadzonego procesu optymalizacji przekrojów wszystkich elementów Copi uzyskałam wykresy przedstawione w dalszej części niniejszego podrozdziału. Liczbę wykresów ograniczyłam do przypadków pracy słupów, ponieważ tylko w tym przypadku uzyskane zależności są znaczące [Załącznik A6].

Na Rysunku 51 przedstawiłam zależność między sztywnością k podpory, a wskaźnikiem wytrzymałości przekroju słupa. Zależność ta jest silnie nieliniowa i trudna do modelowania przy użyciu opisu na przykład poprzez pojedyncze równanie. Aby osiągnąć oczekiwaną dokładność wyniku zdecydowałam się na przybliżenie linii z Rysunku 51 linią łamaną [Załącznik A6].

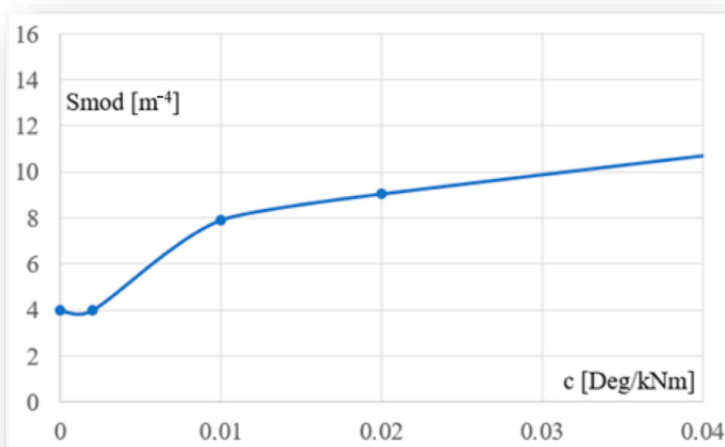


Rysunek 51. Zależność między sztywnością k podpory słupa, a wskaźnikiem wytrzymałości przekroju S_{mod} przekroju poprzecznego słupa [Załącznik A6].

Wyniki symulacji i analiza wykresu przedstawionego na Rysunku 51 wskazują na zasadniczą tendencję polegającą na silnym zmniejszeniu wielkości przekrojów słupów, uzyskanym w procesie optymalizacji statyczno - wytrzymałościowej ram, spowodowanym niewielkim wzrostem sztywności obrotowej przegubów nośnych tych słupów w zakresie od 0 do 30 kNm/Deg. Zmiana sztywności w zakresie od 30 do 300 kNm/Deg powoduje stosunkowo powolny spadek wielkości przekrojów słupów, uzyskanych w procesie optymalizacji, spowodowany wzrostem sztywności przegubów

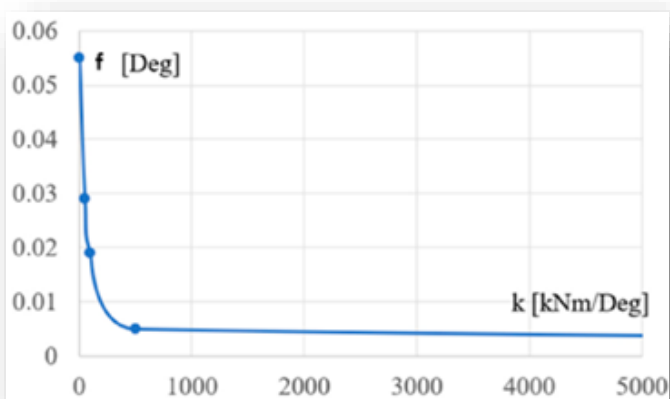
nośnych. Tendencję tę obrazuje niezbyt duży kąt nachylenia środkowego przekroju należącego do linii z Rysunku 51 [Załącznik A6].

Na rysunku 52 przedstawiłam zależność pomiędzy elastycznością c podpory słupa, a wskaźnikiem wytrzymałości przekroju poprzecznego słupa. Zależność ta jest również silnie nieliniowa [Załącznik A6].



Rysunek 52. Zależność między elastycznością c podpory słupa, a wskaźnikiem wytrzymałości przekroju S_{mod} przekroju poprzecznego słupa [Załącznik A6].

Na Rysunku 53 przedstawiłam zależność między sztywnością k podpory słupa, a kątem obrotu słupa. Zależność ta jest również silnie nieliniowa [Załącznik A6].

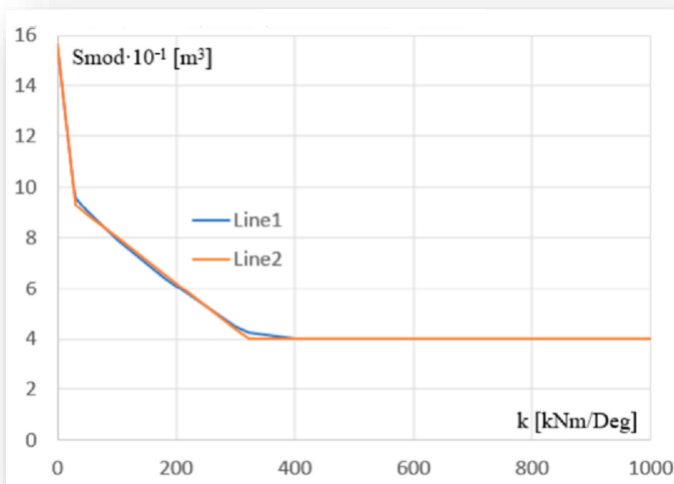


Rysunek 53. Zależność między sztywnością k , a kątem obrotu f podpory słupa [Załącznik A6].

Model parametryczny połączenia podpór słupa

Linia z Rysunku 51 została przedstawiona jako Line1 na Rysunku 54. Ze względu na trudności pojawiające się z opisem analitycznym tej linii w postaci ciągłej krzywej, ostatecznie, linia ta została przybliżona przez zoptymalizowaną linię Line 2 składającą się z trzech odcinków. Odcinki te wyznaczono na podstawie trzech linii prostych z równaniem (10) i dwoma punktami [Załącznik A6].

$$y = a_i \cdot x + b_i \quad (10)$$



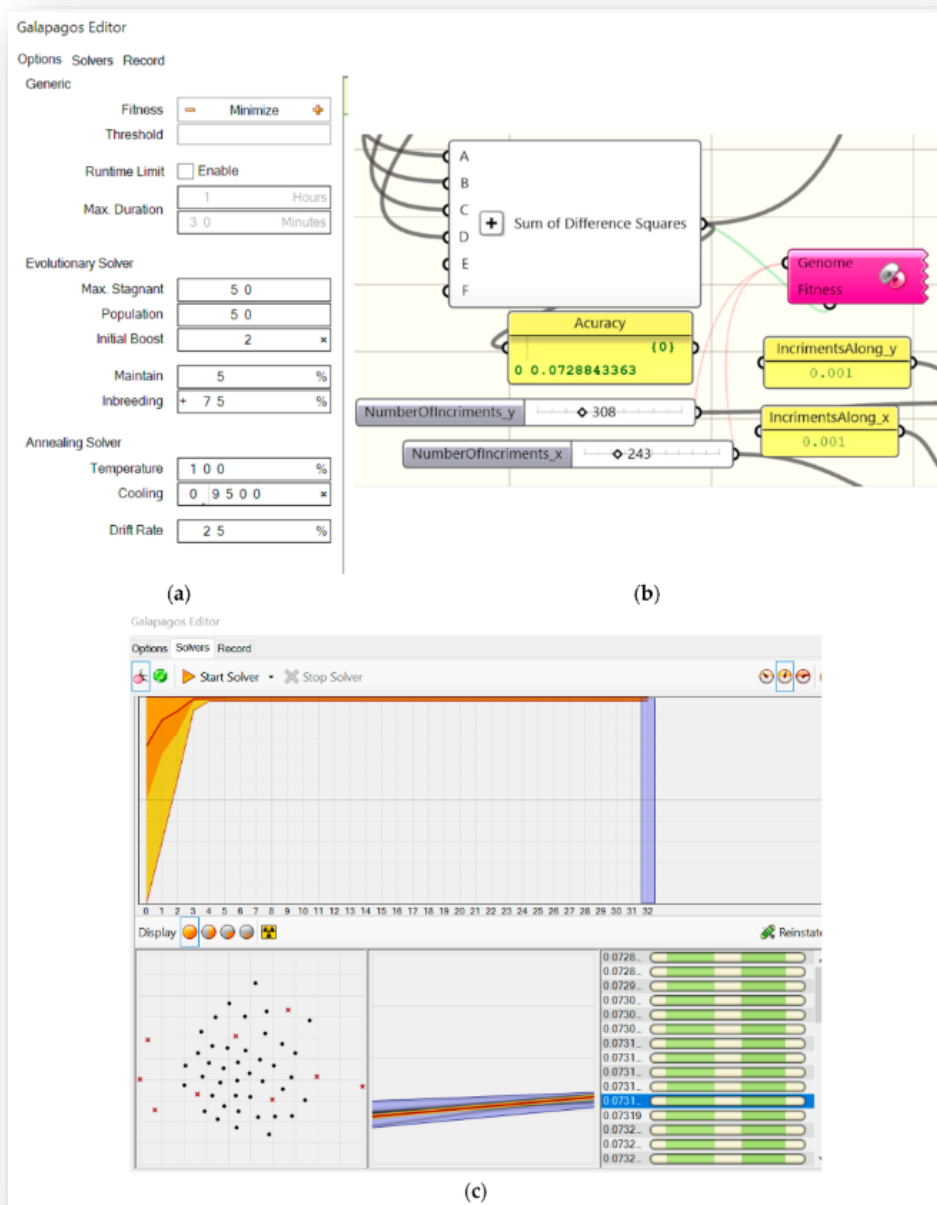
Rysunek 54. Dwie linie przedstawiające zależność pomiędzy sztywnością k podparcia słupa, a wskaźnikiem wytrzymałości S_{mod} przekroju poprzecznego słupa: a) Line1 - linia uzyskana na podstawie symulowanych modeli i ich charakterystyk dyskretnych; b) Line2 - trzysegmentowa linia z danym równaniem analitycznym przybliżającym linię Line1 [Załącznik A6].

Współczynniki a_i i b_i prostych oraz współrzędne ich punktów przecięcia podałam w Tabeli 30. Współrzędne każdego z tych punktów to sztywność k węzłów podporowych słupów i wskaźnik wytrzymałości S_{mod} przekroju słupa. Zdefiniowana linia łamana jest główną częścią poszukiwanego modelu parametrycznego określającego optymalną wydajność badanych ram [Załącznik A6].

Tabela 30. Współczynniki trzech linii prostych biorących udział w procesie aproksymacji oraz współrzędne punktów przecięcia tych linii [Załącznik A6].

Współczynnik	a_{ja}	b_{ja}
Linia pr1	-13.09	15.62
Linia pr2	-1,802	9.808
Linia pr3	0.000	4.000
Współczynnik	k (kNm/Deg)	Smod (m ³)
Punkt Q1	29.25	9.281
Punkt Q2	322.3	4.000

Na Rysunku 55a-c przedstawiłam (1) przyjęte wartości parametrów konfiguracyjnych programu optymalizacyjnego Galapagos, Rysunek 55a, (2) wymyślone obiekty implementujące opracowane procedury procesu optymalizacji opracowane w programie Rhino/Grasshopper [47], Rysunek 55b, (3) uzyskaną dokładność przeprowadzonego procesu optymalizacji, Rysunek 55b, (4) interfejs wyświetlający bieżące wyniki i postępy w działaniach optymalizacyjnych aplikacji Galapagos, Rysunek 55c. Uzyskana dokładność 0,072884 odnosi się do jednostek użytych dla osi x i y wykresu z Rysunku 54 oraz dziewięciu punktów reprezentowanych przez kropki na Rysunku 51 [Załącznik A6].



Rysunek 55. Wartości parametrów konfiguracyjnych zastosowanego programu optymalizacyjnego Galapagos (a), wymyślonych obiektów opracowanych w programie Rhino/Grasshopper, w tym kontenera dokładności, przeprowadzającego proces optymalizacji (b), interfejsu wyświetlającego aktualne wyniki i postęp przeprowadzonego procesu optymalizacji (c) [Załącznik A6].

6.7.3 Wnioski

W wyniku analiz dokonanych wspólnie z promotorem, opracowałam nowy jednoparametrowy model mechaniczny ramy płaskownikowej o ściśle określonym schemacie statycznym. Badane ramy składają się z dźwigarów kratowych i pojedynczych słupów rozgałęźnych. Mechanicznym parametrem jest sztywność (elastyczność) węzła podporowego słupa. Istotny okazał się analizowany wpływ sztywności połączenia podpory na właściwości geometryczne zoptymalizowanych przekrojów prętów poszczególnych elementów ramy. Przyjęłam następujące warunki optymalizacyjne: stateczność ogólna określona przez współczynnik obciążeń krytycznych nie mniejszy niż 1; dopuszczalne naprężenia w zakresie aż do osiągnięcia granicy plastyczności; normowe ograniczenia dotyczące przemieszczeń połączeń i ugięć elementów ram z uwzględnieniem stanów granicznych nośności i użytkowości; średniej wielkości obciążenia charakterystyczne dla klimatu umiarkowanego [Załącznik A6].

Ostatecznie za pomocą przedstawionych wzorów analitycznych i wykresów graficznych dokonałam szczegółowego opisu nieliniowego wpływu sztywności połączenia podpory słupa na wielkość zoptymalizowanych przekrojów wszystkich elementów ramy. Ze względu na niską dokładność szeregu wzorów analitycznych opisujących obserwowane zależności nieliniowe, konieczne było wyznaczenie stosunkowo złożonych opisów za pomocą trzysegmentowej linii łamanej. W przyjętym optymalizacyjnym procesie wykorzystana została metoda najmniejszych kwadratów oraz autorskie procedury zaimplementowane w programie Rhino/Grasshopper, a także ogólnie znane optymalizacyjne algorytmy genetyczne [Załącznik A6].

7. PODSUMOWANIE I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

7.1. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych działań opracowałam nowatorskie procedury umożliwiające parametryczne geometryczne modelowanie niekonwencjonalnych złożonych form budowlanych oraz parametryczne geometryczne i statyczno-wytrzymałościowe kształtowanie prętowych konstrukcji ramowych podpierających poszycie wielosegmentowych powłokowych dachów i elewacji. Kluczowymi cechami tych procedur jest: ułożenie licznych przekształconych powłok konstrukcji dachu w przestrzeni trójwymiarowej zgodnie z właściwościami regularnej powierzchni o ujemnej krzywiznie Gaussa, oraz uzyskanie różnych kątów nachyleń ścian elewacyjnych względem pionu, zarówno na zewnątrz, jak i wewnątrz tego samego budynku. Zaprezentowana metoda wypełnia istotną lukę w dotychczasowej wiedzy, zarazem stając się rozwiązaniem innowacyjnym [*Załącznik A1*].

Nowatorska metoda polega na modelowaniu niekonwencjonalnych form budynków, obejmujących złożone ściany elewacyjne, nachylone w pionie oraz zadaszone złożonymi przekształconymi strukturami powłokowymi złożonymi z wielu jednostek rozmieszczonych na regularnych powierzchniach o ujemnej krzywiznie Gaussa. Algorytm tej metody umożliwia wyznaczenie innowacyjnych żebrowanych podstawowych ciągłych i pochodnych nieciągłych powłokowych konstrukcji dachowych. Metoda ta uzupełnia istniejące metody związane z kształtowaniem wielościennych wielościanów zadaszonych strukturami złożonymi z wielu powłok rozmieszczonych na regularnych powierzchniach o dodatniej krzywiznie Gaussa [*Załącznik A4*].

Zaobserwowane przeze mnie zmiany wybranych właściwości mechanicznych badanych konfiguracji ram spowodowane zmianami nachylenia ich dźwigarów do poziomu lub słupów do pionu mają charakter ilościowy, jak i jakościowy. Wynika to z faktu, że obciążenia krytyczne opisujące zdolność utrzymania ogólnej stateczności ram ograniczają dopuszczalną optymalną wielkość przekrojów słupa. W przypadku rozważanych ram trapezowych i trapezowych odwróconych, kluczowym warunkiem ograniczającym optymalną wielkość przekrojów wszystkich ich elementów jest

maksymalne dopuszczalne wyężenie wynikające z granicy plastyczności zastosowanej stali-S235. W przypadku konfiguracji ram pochodnych wartości współczynnika obciążenia krytycznego szybko rosną do pięciu, a nawet siedmiu dla ram z najbardziej pochylonymi elementami [*Załącznik A2*].

W przypadku nachylenia dźwigara kratowego obserwuje się znaczny wzrost wartości wskaźników wytrzymałości obliczonych dla zoptymalizowanych przekrojów poprzecznych krótszych słupów, który wyniósł 1000% dla najbardziej nachylonych badanych dźwigarów. Istotny wzrost wartości wskaźników zoptymalizowanych przekrojów prętów obserwuje się również w przypadku pasa dolnego, gdzie sięga on 400%. W pozostałych zoptymalizowanych elementach przyrost wartości wskaźników ich przekrojów jest nieznaczny. W przypadku najbardziej pochylonych słupów w konfiguracjach ramy pochodnej, obserwuje się znaczny wzrost wartości wskaźników przekrojów zoptymalizowanych, wynoszący do 200% w konfiguracjach trapezowych i 300% w konfiguracjach trapezu odwróconego. W przypadku pozostałych elementów tych ram wzrost wyężenia jest niewielki [*Załącznik A3*].

We wcześniejszych badaniach rozważałam niektóre główne właściwości geometryczne i mechaniczne pokryć dachowych, następnie przeszłam do zbadania tego kształtowania rozważanych typów konstrukcji ram. Zwiększenie nachylenia słupa do pionu powoduje większy wzrost wartości wskaźnika wytrzymałości przekroju wybranych elementów prętowych dla ram trapezowych niż dla odwróconych ram trapezowych. Zmiana pochylenia słupa nb z 0 do 1/3 powoduje wzrost wartości wskaźnika wytrzymałości przekroju o 200% dla konfiguracji trapezowych i o 280% dla konfiguracji trapezowych odwróconych. Wzrost nachylenia słupów ma również raczej niewielki wpływ na zmiany wielkości przekrojów rozważanych krzyżulców. Zmiana ich modułów przekroju wynosi do 20% dla konfiguracji trapezowych i do 40% dla odwróconych konfiguracji trapezowych. Wzrost ten powoduje również stosunkowo nieznaczną zmianę wielkości optymalnych przekrojów prętów należących do pozostałych elementów badanych ram [*Załącznik A5*].

Do opracowania ogólnych modeli uniwersalnych wykorzystałam szereg zestawów wartości dyskretnych, uzyskanych podczas testów dla następnie symulowanych konfiguracji ram o różnych sztywnościach połączeń podporowych. Na podstawie tych

danych zbadalam zależności pomiędzy zmienną niezależną określającą sztywność, a zmiennymi zależnymi, takimi jak pole powierzchni i wskaźnik wytrzymałości przekrojów, definiującymi wynikowy parametryczny model mechaniczny ramy. Opracowany model parametryczny może być modyfikowany poprzez dodawanie kolejnych nowych parametrów w sposób przedstawiony dla sztywności połączenia podpory słupa. Dzięki temu opracowany algorytm pozwala na osiągnięcie większej uniwersalności tworzonych modeli poprzez wprowadzenie szeregu zmiennych sterujących właściwościami geometrycznymi i fizycznymi projektowanych ram oraz ich obciążeniami [Załącznik A6].

7.2. Kierunki dalszych badań

Realizacja niniejszej rozprawy doktorskiej oraz osiągnięcie wyznaczonych celów pracy pozwoliły na określenie następujących kierunków dalszych badań naukowych:

- 1) Zachodzi potrzeba poszukiwania nowych niekonwencjonalnych form budynków, w tym dachów i elewacji oraz odpowiednio dostosowanych innowacyjnych systemów konstrukcyjnych podtrzymujących pokrycie dachowe i elewacyjne. Planowane są rozszerzone badania laboratoryjne i symulacje komputerowe w zakresie cienkościennych blach składanych przekształcanych elastycznie w różne formy powierzchni siodłowych (o ujemnej krzywiznie Gaussa).
- 2) Implementowałam metodę definiowania obciążeń właściwych rozpatrywanych ram podpierających dolne półki fałd przekształconego pokrycia dachowego, jako obciążeń rozłożonych równomiernie na całej długości górnego pasa dźwigara ramy dachowej. Uzyskane wyniki są podstawą i uzasadnieniem do przeprowadzenia symulacji i testów w zakresie dalszej modyfikacji formy, obciążeń, pracy oraz metod stosowania różnych konfiguracji ram płaskich.
- 3) Wszystkie pojedyncze komórki wielościennej sieci referencyjnej Γ są czworościanami, a wszystkie jednostki dachu powłokowego są segmentami hiperboliczno-parabolicznymi ograniczonymi przestrzennymi czworokątami. Algorytm tej metody, przedstawiony w przykładach, pozwala na dalszą eksplorację innowacyjnych i atrakcyjnych wizualnie typów niekonwencjonalnych złożonych form budowlanych, pokrytych ciągłymi i nieciągłymi przekształconymi powłokami złożonymi w złożone

żebrowane struktury powłokowe oparte na powierzchniach odniesienia o prawie dowolnej krzywiznie Gaussa. Dalsze badania będą koncentrować się na optymalizacji form i położenia tych żebrowanych konstrukcji dachowych w stosunku do gładkich powierzchni odniesienia.

4) Aby móc zbudować uniwersalność modelu mechanicznego ramy płaskownikowej o ściśle określonym schemacie statycznym, konieczne jest zwiększenie liczby zmiennych niezależnych, co spowoduje jak się wydaje, istotne zmiany we właściwościach geometrycznych i statyczno-wytrzymałościowych ram. Uzyskane i zaprezentowane wyniki wskazują na bardzo wysokie prawdopodobieństwo istotnego wpływu czynników - zmiana sztywności połączeń podpór słupa wskazuje na bardzo istotny wzrost przemieszczeń poziomych ramy górnej, w tym połączeń słupa i dźwigara, prowadzi także do istotnej rozbieżności siły ciężkości słupów, w tym zróżnicowania naprężeń na poziomie około 100% . Takie tendencje wyznaczają kierunek nowych przyszłych badań i pozwalają na wysokie prawdopodobieństwo oczekiwania zadowalających wyników. Funkcja algorytmu genetycznego, opierającego się na wieloparametrowych modelach obliczeniowych i poszukiwaniu optymalnych rozwiązań dyskretnych dla złożonych warunków optymalizacyjnych, będzie oczekiwana w przyszłych badaniach, w których planowane jest uwzględnienie znacznie większej liczby zmiennych niezależnych. Przewidywane jest rozszerzenie parametrycznego modelu ramy o kolejne parametry geometryczne, fizyczne i obciążeniowe, poprzez symulacje i analizy komputerowe.

8. WYKAZ NORM I LITERATURY (WYBRANE POZYCJE)

1. Abramczyk, J. *Shell free forms of buildings roofed with transformed corrugated sheeting*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej **2017**.
2. Cheng, F. *Aesthetics in architecture: unity of form, function and meaning*; SciELO Brazylia, **2024**.
3. Naeem Abrar *Contextuality and Design Approaches in Architecture: Methods to Design in a Significant Context*; University of Lisbon, Portugal **2021**.
4. Cibis, J., Olejko, W., *Architektura modernistyczna – równość wobec idei*; Teka Komisji Architektury, Urbanistyki i Architektury, Kraków **2008**.
5. Kwieciński, K., Pasternak, A. *Automatyzacja w projektowaniu architektonicznym*; Builder 36, Politechnika Warszawska **2016**.
6. Asefi, M., Kronenburg, R. *An Architectural Evaluation of Transformable Roof Structures*; International Conference On Adaptable Building Structures Eindhoven **2006**.
7. Borges, R.F. *Evolution of Architectural Forms of Historic Buildings*; WIT Transactions on The Built Environment 2001
8. Rusu, Anna-Maria *Geometry and Complexity in Architecture*; Journal of Industrial Design and Engineering Graphics Bucharest **2015**.
9. Dębczak, K., Kozłowski, M., Suchecka, N. *Szkło oknem na świat – o historii szkła w architekturze*; Builder Science **2023**.
10. Tofil, J. *Forma organiczna konstrukcji ciągłowej mostów i przekryć - piękno struktury naturalnej*; Czasopismo Techniczne, Architektura, **2007**.
11. D.D.Campos, I., F.A.Bernardo, L. *Architecture and Steel. Reflection and Analysis on the Use of Steel Structures (in Sight) as a Concept in the History of Architecture*; Designs **2020**, 4(3),30.
12. N.Krivoshapko, S. *Shell structures and shells at the beginning of the 21st century*; Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings 17(6) **2021**.
13. Casini, M. *Smart Buildings Advanced Materials and Nanotechnology to Improve Energy-Efficiency and Environmental Performance*; WP Woodheas Publishing **2016**.
14. Szczepańska, M. *Zielony dach - niecodzienne miejsce wypoczynku i rekreacji*; WWSTiZ w Poznaniu **2010**.

15. Górzyński, J. *Pozyskiwanie i przetwarzanie energii odnawialnej; Napędy i sterowanie* **2020**.
16. Major, M. Minda, I. *Zastosowanie technologii druku przestrzennego w budownictwie; Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej, Budownictwo* **22, 2016**.
17. Abel, J.F.; Mungan, I. *Fifty Years of Progress for Shell and Spatial Structures; International Association for Shell and Spatial Structures: Madrid, Spain, 2011*.
18. Saitoh, M. *Recent Spatial Structures in Japan*. J. JASS **2001**, 32, 62–69.
19. Abramczyk, J. *Symmetric Free Form Building Structures Arranged Regularly on Smooth Surfaces with Polyhedral Nets*. Symmetry **2020**, 12, 763.
20. Abramczyk, J. *Shell Free Forms of Buildings Roofed with Transformed Corrugated Sheetting, Monograph; Publishing House of Rzeszow University of Technology: Rzeszów, Poland, 2017*.
21. Reichhart, A. *Geometrical and Structural Shaping Building Shells Made up of Transformed Flat Folded Sheets; House of Rzeszow University of Technology: Rzeszów, Poland, 2002*. (In Polish).
22. Abramczyk, J. *Symmetric Shape Transformations of Folded Shell Roofs Determining Creative and Rational Shaping of Building Free Forms*. Symmetry **2019**, 11, 1438.
23. Abramczyk, J. *Folded Sheets as a Universal Material for Shaping Transformed Shell Roofs*. Materials **2021**, 14, 2051.
24. Reichhart, A. *Principles of designing shells of profiled steel sheets*. In Proceedings of the X International Conference on Lightweight Structures in Civil Engineering, Rzeszow, Poland, 25–29 December 2004; pp. 138–145.
25. Prokopska, A.; Abramczyk, J. *Responsive Parametric Building Free Forms Determined by Their Elastically Transformed Steel Shell Roofs*. Buildings **2019**, 9, 46.
26. Abramczyk, J. *Innovative Building Forms Determined by Orthotropic Properties of Folded Sheets Transformed into Roof Shells*. J. JASS **2020**, 61, 111–124.
27. Pottmann, H.; Asperi, A.; Kilian, A.; Hofer, M. *Architectural Geometry; Institute Press: Bentley, KS, USA, 2007*.
28. Attard, M.M. *Nonlinear theory of Non-Uniform Torsion of Thin-Walled Open Beams*. Thin-Walled Struct. **1986**, 4, 101–134.

29. Vlasov, V.Z. *Tonkostennye Uprugie Sterzhni; Gosudarstvennoe Izdatel'stvo Fizikomatematicheskoi Literatury*: Moskva, Russia, 1959.
30. Vaziri, A. *Mechanics of highly deformed elastic shells. Thin-Walled Struct.* **2009**, 47, 692–700.
31. Samyn, P.E. *Structures isobarres et isonoeads*. In Proceedings of the 2nd International Conference on Space Structures—University of Surrey, Guilford, UK, 15–18 September **1975**; pp. 621–634.
32. Abramczyk, J. *Transformed Shell Structures Determined by Regular Networks as a Complex Material for Roofing*. *Materials* **2021**, 14, 3582.
33. Reichhart, A. *Corrugated Deformed Steel Sheets as Material for Shells*. In Proceedings of the International Conference of Lightweight Structures in Civil Engineering, Warsaw, Poland, 1 December **1995**; pp. 625–636.
34. Eekhout, M. (ed) (**2000**) *Form as a bridge between architectural, structural and industrial design*. In: 4th international colloquium on structural morphology. IASS: spatial lattice and tension structures, Delft, Netherlands, pp 1000–1010.
35. Motro, R. (**2009**) *An anthology of structural morphology*. Universite Montpellier, Word Scientific Publishing Company, Montpellier.
36. LiQ, Borgart A, WuY (**2016**) *How to understand 'structural morphology?'* *J Int Assoc. Shell Spat. Struct.* 57(2):145–158.
37. Reichhart, A. (**1995**) *Corrugated deformed steel sheets as material for shells*. In: International conference on lightweight structures in civil engineering. Micro-Publisher-C-P, Warsaw, pp 185–197.
38. Bryan ER, Davis JM (**1982**) *Manual of stressed skin diaphragm design*. Granada Publishing Ltd, London.
39. Gergely P, Banavalkar PV, Parker JE (**1971**) *The analysis and behaviour of thin-steel hyper bolic paraboloid shells*. In: A research project sponsored by the America iron and steel institute. Technical Report No. 338. Cornell University, Ithaca, NY.
40. Abramczyk, J. (**2012**) *Multi-segment shell structures*. In: XIII international conference on lightweight structures in civil engineering (Polish chapter). Micro-Publisher-C-P, Warsaw, pp 38–47.
41. Abramczyk, J., Chrzanowska, K. (**2022**) *Complex building forms roofed with transformed shell units*. *Materials* 15(24):8942.

42. Abramczyk, J. (2016) *Integrated building forms covered with effectively transformed folded sheets*. *Procedia Eng* 8:1545–1550.
43. Lam D, Ang TC, Chiew S-P (2013) *Structural Steel work: design to limit state theory*, 4th edn. Taylor & Francis Group, CRC Press.
44. Gutkowski W, Bauer J, Gierliński KM, Obrębski J (1975) *Obliczenia statyczne płaskich, prętowych przekryć strukturalnych*, vol 3. *Prace COBPKM Mostostal*, pp 1–5 .
45. Zhang H, Shayan S, Rasmussen KJR, Ellingwood BR (2016) *System-based design of planar steel frames*, I: reliability framework. *J Constr Steel Res* 123:135–143.
46. Gomes RA, de Oliveira LA, Francisco MB, Gomes GF (2023) *Tubular auxetic structures: a review*. *Thin-Walled Struct* 188:110850.
47. Ram S, Gupta S (2019) *Principles of structural design, wood, steel, and concrete*, 3rd edn. Taylor & Francis Group, CRC Press.
48. Somma G, Vit M (2023) *Experimental investigation of flare groove weld stiffness in lattice girder beams by means of push-out tests*. *J Constr Steel Res* 202:107780.
49. Wardenier J, Packer JA, Zhao X-L, van der Vegte GJ (2010) *Hollow sections in structural applications*. *Bouwen met Staal*, Zoetermeer, The Netherlands.
50. Qu H, Huo J, Li A, Jiang Y, Liu Y (2017) *Experimental study on impact behaviour of steel plane tubular frames*. *Thin-Walled Struct* 111:210–223.
51. Ziemian RD, McGuire W, Deierlein GG (1992) *Inelastic limit states design. Part I: planar frame studies*. *J Struct Eng (ASCE)* 118(9):2532–2549.
52. Wester, T. *Structural morphology—A new challenge in engineering and architecture*. In *Proceedings of the IASS, Design, Construction, Performance & Economics*, Stuttgart, Germany, 10–14 September 1997; pp. 115–125.
53. Abbas, I.; Marin, M.; Saeed, T.A. *GL model on thermo-elastic interaction in a poroelastic material using finite element method*. *Symmetry* 2020, 12, 488.
54. Marshal, P.W. *Design of Welded Tubular Structures*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1992.
55. Jarmai, K.; Farkas, J. *Stability constraints in the optimum design of tubular members*. In *Stability of Steel Structures International Colloquium European Session*; Technical University of Budapest: Budapest, Hungary, 1995; pp. 187–194.

56. Hillebrand, M.; Schmidt, M.; Wieneke, K.; Hegger, J. *Investigations on Interface Shear Fatigue of Semi-Precast Slabs with Lattice Girders*. Appl. Sci. **2021**, *11*, 1196.
57. Kurobane, Y.; Packer, J.A.; Wardenier, J.; Yeomans, N. *Design Guide for Structural Hollow Section Column Connections*; Verlag TUV Rheinland GmbH: Koln, Germany, 2005.
58. Packer, J.A.; Henderson, J.E. *Hollow Structural Section Connections and Truss—A Design Guide*, 2nd ed.; Canadian Institute of Steel Construction: Toronto, ON, Canada, 1997.
59. Tarczewski, R. *Structural systems in the mind of an architect—Cognition through a non-linear teaching model*. World Trans. Eng. Technol. Educ. **2021**, *19*, 358–363.
60. Farzampour, A.; Mansouri, I.; Lee, C.H.; Sim, H.B.; Hu, J.W. *Analysis and design recommendations for corrugated steel plate shear walls with a reduced beam section*. Thin-Walled Struct. **2018**, *132*, 658–666.
61. Winter G., "Strength of thin steel compression flanges", in Trans. ASCE **1974**, *112*, 895–912.
62. Parker J.E., *Behavior of Light Gauge Steel Hyperbolic Paraboloid Shells*, Ph.D. Thesis, Cornell University. Ithaca, NY, **1969**.
63. Gergely P., Banavalkar P.V. and Parker J.E., "The analysis and behavior of thin-steel hyperbolic paraboloid shells", in A Research Project Sponsored by the America Iron and Steel Institute, Report No. 338, Dept. of Struct. Engng., 1971, Cornell University: Ithaca, New York, NY, **1971**.
64. Egger H., Fischer M. and Resinger F., "Hyperschale aus Profilblechen", Stahlbau **1971**, *12*, pp. 353–361.
65. Bródka, J., Broniewicz, M. *Steel structures made of hollow sections*, PWT, Rzeszów, **2016** (in Polish).
66. Abouelregal, A.E.; Marin, M. *The response of nanobeams with temperature-dependent properties using state-space method via modified couple stress theory*. Symmetry **2020**, *12*, 1276.
67. Rębielak, J. *Architectonic forms and engineering systems designed by application of method of superposition*. In Proceedings of the 7th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, Cape Town, South Africa, 2–4 September **2019**.

68. Ananthi, G.B.G.; Roy, K.; Lim, J.B. *Experimental and numerical investigations on axial strength of back-to-back built-up cold-formed steel angle column*. *Steel Compos. Struct.* **2019**, *33*, 595–614.
69. Korcz-Konkol, N.; Iwicki, P. *Truss imperfections in the design of bar and diaphragm bracing systems*. *J. Constr. Steel Res.* **2023**, *206*, 107936.
70. Deng, Y.; Jiang, Z.; Peng, X.; Ma, C.; Zhang, A.; Chen, Z.; Chen, Y.; Wang, D.; Zhang, Y. *Predicting and optimizing the dimensions of rod in lattice structures fabricated by laser powder bed fusion*. *Mater. Today Commun.* **2024**, *40*, 109979.
71. Kaveh, A.; Gerami, A.B. *Optimal design of large-scale space steel frames using cascade enhanced colliding body optimization*. *Struct. Multidiscip. Optim.* **2017**, *55*, 237–256.
72. Hosseinpour, M.; Daei, M.; Zeynalian, M.; Ataei, A. *Neural networks-based formulation for predicting ultimate strength of bolted shear connectors in composite cold-formed steel beams*. *Eng. Appl. Artif. Intell.* **2023**, *118*, 105614.
73. Li, D.; Ge, S.; Zhao, K.; Cheng, X. *A Shallow Neural Network for Recognition of Strip Steel Surface Defects Based on Attention Mechanism*. *ISIJ Int.* **2023**, *63*, 525–533.
74. Kim, B.; Yuvaraj, N.; Park, H.W.; Preethaa, K.R.; Pandian, R.A.; Lee, D.E. *Investigation of steel frame damage based on computer vision and deep learning*. *Autom. Constr.* **2021**, *132*, 103941.
75. Wang, T.; Yu, Y.; Luo, H.; Wang, Z. *Plastic Constitutive Training Method for Steel Based on a Recurrent Neural Network*. *Buildings* **2024**, *14*, 3279.
76. Yu, W.W.; LaBoube, R.A.; Chen, H. *Cold Formed Steel Design*; John Wiley and Sons Inc.: New York, NY, USA, **2000**.
77. Grey, A. *Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces with Mathematica*; CRC Press LCC: Boca Raton, FL, USA, **1999**.
78. Zhang, L.; Bhatti, M.M.; Michaelides, E.E.; Marin, M.; Ellahi, R. *Hybrid nanofluid flow towards an elastic surface with tantalum and nickel nanoparticles, under the influence of an induced magnetic field*. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* **2022**, *231*, 521–533.
79. Prokopska, A.; Abramczyk, J. *Innovative systems of corrugated shells rationalizing the design and erection processes for free building forms*. *Archit. Civ. Eng. Environ.* **2017**, *7*, 29–40.

80. Craciun, E.M.; Marin, M.; Pop, N. *Some Results in Green–Lindsay Thermoelasticity of Bodies with Dipolar Structure*. *Mathematics* **2020**, *8*, 497.
81. Gronostajska, B.E.; Tarczewski, R.; Jablonska, J. *Architecture, City, People and Structure*. *Buildings* **2021**, *12*, 277.
82. Biegus A (2003) *Stalowe budynki halowe* (In Polish). Arkady, Warszawa
83. Nageim H (2016) *Steel structures: practical design studies*, 4th edn. Boca Raton, CRC Press
84. Martin, L.; Purkiss, J. *Structural Design of Steelwork to EN 1993 and EN 1994*, 3rd ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, **2007**.
85. Havelia, P. *A Ground Structure Method to Optimize Topology and Sizing of Steel Frame Structures to Minimize Material, Fabrication and Erection Costs*. Ph.D. Thesis, Stanford University, Stanford, CA, USA, **2016**.
86. Rebielak, J. *Two-Stage Method Applied for Approximate Calculations of Selected Types of Statically Indeterminate Trusses*. *Int. J. Comput. Methods* **2020**, *18*, 2041004.
87. Vukadinović, A.; Radosavljević, J.; Đorđević, A.; Protić, M.; Petrović, N. *Multi-objective optimization of energy performance for a detached residential building with a sunspace using the NSGA-II genetic algorithm*. *Sol. Energy* **2021**, *224*, 1426–1444.
88. Bello-García, A.; Coz Díaz, J.J.; Suarez, F.; Jose, P.; Nieto, G. *Optimization of steel structures with one genetic algorithm according to three international building codes*. *Rev. Constr.* **2018**, *17*, 47–59.
89. Fan, J.; Li, T.; Sun, P.; Wang, D.; Chen, X. *Experimental analysis of the truss-to-column connection in a modularized prefabricated steel structure*. *J. Build. Eng.* **2022**, *49*, 104115.
90. Kem,G.N. *Rigidity and safety optimization of 3-dimensional repetitive frame systems as bar-joint building with graphs*. *Eng. Struct.* **2019**, *201*, 109782.
91. PN-EN1991-1-3; *Eurocode 1: Actions on Structures. Part 1-3: General Actions. Snow Loads*. PKN: Warsaw, Poland, **2005**
92. PN-EN1991-1-4; *Eurocode 1: Actions on Structures: Part 1.4: Wind Actions*. PKN: Warsaw, Poland, **2008**.
93. PN-EN1993-1-1; *Eurocode 3: Design of Steel Structures: Part 1.1—General Rules and Rules for Buildings*. PKN: Warsaw, Poland, 2004.

94. Autodesk Robot Structural Analysis Professional

95. Rhino/Grasshopper. Available online: <https://www.rhino3d.pl/grasshopper>
(accessed on 19 November 2024).

9. SPIS RYSUNKÓW

Rysunek 1. Panteon w Rzymie (27 p.n.e) a) całość budynku, b) kopuła wewnątrz (dostęp 20.11.2024).....	16
Rysunek 2. Crystal Palace w Londynie (1851) a) całość budynku; b) wnętrze budynku (dostęp 26.11.2024).....	17
Rysunek 3. Pawilon wybudowany z okazji Wystawy Światowej w Barcelonie (1929) a) całość budynku; b) wnętrze pawilonu (dostęp 20.11.2024).....	18
Rysunek 4. Stadion olimpijski w Monachium (1972) a) całość stadionu; b) wnętrze stadionu (dostęp 20.11.2024).....	18
Rysunek 5. Dach zielony w apartamentowcu Star Tower (dostęp 01.12.2024).....	19
Rysunek 6. Największy budynek w Europie wydrukowany w 3D (dostęp 01.12.2024).....	20
Rysunek 7. Stadion Narodowy Herzog&De Meuron w Pekinie (2008) (dostęp 20.11.2024).....	21
Rysunek 8. London Aquatics Centre w Londynie (2011/2012) (dostęp 20.11.2024).....	21
Rysunek 9. Heydar Aliyev Center, Baku, Azerbejdżan (2012) (dostęp 20.11.2024).....	22
Rysunek 10. Schemat blokowy [Opracowanie własne].....	32
Rysunek 11. Elementy geometryczne i oznaczenia użyte do kształtowania pierwszej siatki wielościennej a) zasadnicze elementy sieci, b) pierwsza siatka modelu [Załącznik A1].....	34
Rysunek 12. Cztery kolejne siatki zaprojektowanej sieci referencyjnej [Załącznik A1].....	35
Rysunek 13. Dwie kolejne siatki ustawione w dwóch prostopadłych kierunkach: a) pierwszy kierunek, b) dwa kolejne kierunki [Załącznik A1].....	36
Rysunek 14. Cztery kolejne siatki zaprojektowanej sieci referencyjnej [Załącznik A1].....	36
Rysunek 15. Zaprojektowana sieć referencyjna a) konstrukcja pokryta ciągłą konstrukcją powłokową, b) konstrukcja pokryta dachem o nieciągłej konstrukcji powłokowej [Załącznik A1].....	37

Rysunek 16. Zaprojektowana sieć referencyjna, pierwsza sieć okapowa wraz z pierwszą złożoną strukturą budynku: a) widok z przodu, b) widok z tyłu, c) widok z góry [Załącznik A1].....	43
Rysunek 17. Zaprojektowana sieć referencyjna, druga sieć okapowa wraz z drugą złożoną strukturą budynku: a) widok z przodu, b) widok z tyłu, c) widok z góry [Załącznik A1].....	43
Rysunek 18. Zaprojektowana sieć referencyjna, trzecia sieć okapowa wraz z trzecią złożoną strukturą budynku: a) widok z przodu, b) widok z tyłu, c) widok z góry [Załącznik A1].....	44
Rysunek 19. Główne kroki w kształtowaniu wielościennej sieci referencyjnej i powierzchni Γ i powierzchni odniesienia ω są następujące: a) pierwszy czworościan Γ_{11} z Γ , b) pierwszy ortogonalny pasek Γ_{1j} zawierający drugi czworościan Γ_{12} z Γ , c) drugi ortogonalny pasek Γ_{i1} zawierający kolejny czworościan Γ_{21} z Γ , d) powierzchnia odniesienia ω_r i czworościan ukośny Γ_{22} z Γ [Załącznik A4].....	47
Rysunek 20. Etapy kształtowania całej konstrukcji budynku Σ : a) referencyjna sieć wielościenne Γ , b) sieć B_v i powierzchnia odniesienia ω , c) konstrukcja dachu powłokowego Ω [Załącznik A4].....	48
Rysunek 21. Metodologia badania opracowana wspólnie z promotorem [Załącznik A4].....	49
Rysunek 22. Zaprojektowana sieć referencyjna Γ i sieć okapowa B_v podstawowego złożonego budynku Σ : a) widok z przodu, b) widok z boku, c) widok z góry, d) widok aksonometryczny [Załącznik A4].....	51
Rysunek 23. Zaprojektowana sieć referencyjna Γ i sieć okapowa B_{vd1} pierwszej złożonej pochodnej, struktura nieciągła Σ_{d1} : a) widok z przodu, b) widok z boku, c) widok z góry, d) widok aksonometryczny [Załącznik A4].....	56
Rysunek 24. Sieć referencyjna Γ i sieć okapowa B_{vd2} drugiej złożonej pochodnej, struktura nieciągła Σ_{d2} : a) widok z przodu, b) widok z boku, c) widok z góry, d) widok aksonometryczny [Załącznik A4].....	59

Rysunek 25. Schemat przedstawiający: a) prostokątną, b) prostokątną trapezową ramę płaską składającą się z jednogąźziowych słupów P_{s1} i P_{s2} , pasów górnych i dolnych P_{gi} i P_{di} oraz stężeń ukośnych P_{ki} [Załącznik A2].....	63
Rysunek 26. Cztery typy kombinacji obciążeń stosowane do optymalizacji rozważanych układów ram poprzecznych: a) obciążenie pionowe skierowane w dół (odpowiadające obciążeniu użytkowemu), b) obciążenie normalne (odpowiadające obciążeniu wiatrem), c) pierwsze asymetryczne obciążenie pionowe (odpowiadające obciążeniu użytkowemu), d) drugie asymetryczne obciążenie pionowe (odpowiadające obciążeniu użytkowemu) [Załącznik A2].....	65
Rysunek 27. Trzy zależności występujące pomiędzy wartościami badanych wskaźników wytrzymałości przekroju W_{sk} obliczonymi dla słupów P_{s1} , P_{s2} , pasa dolnego P_d , a nachyleniem n_d dźwigarów kratowych: a) wartości bezwzględne W_{sk} , b) względne przyrosty W_{sk} [Załącznik A2].....	68
Rysunek 28. Zależność współczynnika obciążenia krytycznego φ_{cr} od nachylenia n_d dźwigarów [Załącznik A2].....	68
Rysunek 29. Schematy badanych ram płaskim: a) prostokątna rama podstawowa K_{b0} , b) rama pochodna prostokątno-trapezowa K_g , c) rama trapezowa K_{ce} , d) odwrócona rama pochodna trapezu K_{ci} [Załącznik A3].....	70
Rysunek 30. Cztery rodzaje obciążeń przyłożonych do każdej z badanych konfiguracji ramy: a) obciążenie pionowe skierowane w dół, b) obciążenie skierowane w górę prostopadle do pasa dźwigara, c) niesymetryczne obciążenie pionowe, d) niesymetryczne obciążenie pionowe przyłożone do konfiguracji niesymetrycznej [Załącznik A3].....	72
Rysunek 31. Trzy linie P_{s1} , P_{s2} i P_d prezentujące trzy zależności zachodzące pomiędzy wartościami wskaźników wytrzymałości przekroju sprężystego S_{mod} obliczone dla zoptymalizowanych przekrojów badanych słupów P_{s1} i P_{s2} i pasa dolnego P_d , a nachyleniem n_g symulowanych dźwigarów kratowych: a) wartości bezwzględne S_{mod} , b) względne przyrosty ΔS_{mod} [Załącznik A3].....	77
Rysunek 32. Zależność między współczynnikiem obciążenia krytycznego i nachyleniem dźwigara [Załącznik A3].....	78
Rysunek 33. Zależności między różnicą h w wysokości P_{s1} oraz P_{s2} słupów K_{gi} i przemieszczenie dwóch wybranych połączeń ramy: a) skrajne przemieszczenie poziome węzła 2 należącego do P_{s1} , b) skrajne ugięcie dźwigara kratowego (przemieszczenie węzła 5 górnego pasa) [Załącznik A3].....	78

- Rysunek 34.** Linie T_{in} i T_{out} przedstawiają odpowiednio zależności między wskaźnikami wytrzymałości przekroju S_{mod} przekrojów poprzecznych kolumn, konfiguracjami odwróconego trapezu K_{cer} i konfiguracjami trapezowego K_{ci} oraz nachyleniem n_c tych kolumn: a) wartości bezwzględne wskaźników wytrzymałości przekroju S_{mod} , b) względne przyrosty ΔS_{mod} [Załącznik A3].....79
- Rysunek 35.** Linie T_{in} i T_{out} przedstawiają zależności między wskaźnikami wytrzymałości przekroju S_{mod} przekrojów ukośnych dźwigara odpowiednio w konfiguracjach odwróconego trapezu K_{cer} i trapezowego K_{ci} oraz nachylenie n_c ich kolumn: a) wartości bezwzględne S_{mod} , b) względne przyrosty ΔS_{mod} [Załącznik A3].....79
- Rysunek 36.** Dwie zależności współczynnika obciążenia krytycznego na nachyleniu kolumny n_c obliczonym dla konfiguracji odwróconego trapezu K_{cer} – linia T_{out} i konfiguracji trapezowej K_{ci} – linia T_{in} [Załącznik A3].....80
- Rysunek 37.** Schematy dwóch typów płaskich ram prętowych: konfiguracja o podstawie prostokątnej i konfiguracja o podstawie trapezowej prostokątnej [Załącznik A5].....82
- Rysunek 38.** Schematy różnych trzech typów badanych ram płaskich składających się z jednogłazowych słupów P_{s1} i P_{s2} , dźwigarów z równoległymi pasami P_{gi} i P_{di} oraz krzyżulców typu V P_{ki} : a) układ prostokątny, b) odwrócony układ trapezowy, c) układ trapezowy [Załącznik A5].....83
- Rysunek 39.** Kombinacje obciążeń rozważanych poprzecznych układów ram nośnych: a) obciążenie pionowe skierowane w dół, b) obciążenie pionowe skierowane w górę, c) asymetryczne obciążenie pionowe [Załącznik A5].....84
- Rysunek 40.** Linie W_n i Z_n pokazujące zależność pomiędzy wielkością wskaźników wytrzymałości przekroju W_{sk} przekrojów poprzecznych odwróconych trapezów konfiguracji K_{pj} ($j=1-4$) – linia W_n i trapezów konfiguracji K_{pj} ($j=5-8$) – linia Z_n , a nachyleniem n_b tych kolumn: a) bezwzględne wartości wskaźnika W_{sk} , b) względne przyrosty wskaźnika wytrzymałości przekroju W_{sk} [Załącznik A5].....88
- Rysunek 41.** Linie W_n i Z_n pokazujące trendy pomiędzy wielkością wskaźników wytrzymałości przekroju W_{sk} przekrojów poprzecznych odwróconych przekrojów trapezowych K_{pj} ($j=1-4$) – Trend W_n lub trapezowych konfiguracji K_{pj} ($j=5-8$) – trend Z_n , a nachyleniem przekrojów poprzecznych: a) bezwzględne wartości W_{sk} , b) względne przyrosty W_{sk} [Załącznik A5].....89

Rysunek 42. Zależność współczynnika obciążenia krytycznego φ od nachylenia nb słupów obliczone dla: odwróconych konfiguracji trapezowych K_{pj} ($j=1$ do 4) - linia W_n oraz dla konfiguracji trapezowych K_{pj} ($j=5$ do 8) - linia Z_n [Załącznik A5].....	90
Rysunek 43. Metodologia badania [Opracowanie własne][Załącznik A6].....	92
Rysunek 44. Trzy rodzaje badanych ram: a) podstawowa ze sztywnym podparciem słupa, b) rama pochodna ze sztywnymi połączeniami podpór słupów, c) rama pochodna z przegubowymi połączeniami podpory słupa [Załącznik A6].....	93
Rysunek 45. Stan graniczny nośności: a) K_{omb1} z asymetrycznym obciążeniem wiatrem ścian szczytowych i symetrycznym obciążeniem śniegiem dachu, b) K_{omb10} z symetrycznym obciążeniem wiatrem na ścianach bocznych i symetrycznym obciążeniem śniegiem na dachu [Załącznik A6].....	101
Rysunek 46. Stan graniczny użyteczności: a) K_{omb7} ze skorygowanym obciążeniem wiatrem szczytów i dachu oraz obciążeniem śniegiem całego dachu, b) K_{omb16} z pełnym obciążeniem wiatrem szczytów i dachu oraz skorygowanym obciążeniem dachu śniegiem [Załącznik A6].....	102
Rysunek 47. Zależność pomiędzy k /sztywnością podpory słupa, a σ maksymalnymi naprężeniami występującymi w a) słupach, b) dolnych pasach analizowanych ram [Załącznik A6].....	105
Rysunek 48. Zależność pomiędzy elastycznością c podpory słupa, a σ maksymalnymi naprężeniami występującymi w a) słupie, b) dolnym pasie dźwigara [Załącznik A6].....	106
Rysunek 49. Zależność pomiędzy sztywnością k podpory słupa, a maksymalnym przemieszczeniem poziomym górnych połączeń słupa [Załącznik A6].....	107
Rysunek 50. Zależność pomiędzy elastycznością c podpory słupa, a maksymalnym przemieszczeniem poziomym wierzchołka słupa analizowanych ram [Załącznik A6].....	107
Rysunek 51. Zależność między sztywnością k podpory słupa, a wskaźnikiem wytrzymałości przekroju S_{mod} przekroju poprzecznego słupa [Załącznik A6].....	108
Rysunek 52. Zależność między elastycznością c podpory słupa, a wskaźnikiem wytrzymałości przekroju S_{mod} przekroju poprzecznego słupa [Załącznik A6].....	109
Rysunek 53. Zależność między sztywnością k , a kątem obrotu f podpory słupa [Załącznik A6].....	109
Rysunek 54. Dwie linie przedstawiające zależność pomiędzy sztywnością k podparcia słupa, a wskaźnikiem wytrzymałości S_{mod} przekroju poprzecznego słupa: a) Line1 - linia	

uzyskana na podstawie symulowanych modeli i ich charakterystyk dyskretnych; b) Line2 - trzysegmentowa linia z danym równaniem analitycznym przybliżającym linię Line1 [ZałącznikA6].....110

Rysunek 55. Wartości parametrów konfiguracyjnych zastosowanego programu optymalizacyjnego Galapagos (a), wymyślonych obiektów opracowanych w programie Rhino/Grasshopper, w tym kontenera dokładności, przeprowadzającego proces optymalizacji (b), interfejsu wyświetlającego aktualne wyniki i postęp przeprowadzonego procesu optymalizacji (c).....112

10. SPIS TABEL

Tabela 1. Zestawienie publikacji naukowych stanowiących rozprawę doktorską.....	13
Tabela 2. Wartości parametrów początkowych [<i>Załącznik A1</i>]	38
Tabela 3. Współrzędne wierzchołków W_{ABij} , W_{CDij} , W_{ADij} , W_{BCij} (dla $i, j = 1, 2$) podstawowej wielościennej sieci referencyjnej Γ_1 [<i>Załącznik A1</i>].....	39
Tabela 4. Początkowe współczynniki podziału określające pozycje punktów S_{Aij} , S_{Bij} , S_{Cij} , S_{Dij} i wierzchołków B_v pierwszej struktury Σ_1 dla $i, j = 1, 2$ [<i>Załącznik A1</i>].....	40
Tabela 5. Współrzędne punktów definiujących powierzchnię odniesienia ω_1 pierwszej struktury Σ_1 [<i>Załącznik A1</i>].....	41
Tabela 6. Współrzędne wierzchołków A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} , D_{ij} (dla $i, j = 1, 2$) siatki krawędzi okapu B_{v1} (i pierwszej struktury Σ_1) [<i>Załącznik A1</i>].....	42
Tabela 7. Współrzędne wierzchołków W_{ABij} , W_{CDij} , W_{ADij} , W_{BCij} (dla $i, j=1,2$) wielościennej sieci referencyjnej Γ_1 [<i>Załącznik A4</i>].....	52
Tabela 8. Dane początkowe – współczynniki podziału określające pozycje punktów S_{Aij} , S_{Bij} , S_{Cij} i S_{Dij} powierzchni referencyjnej ω_r dla $i, j=1,2$ [<i>Załącznik A4</i>].....	53
Tabela 9. Współrzędne wybranych punktów definiujących powierzchnię referencyjną ω_r dla $i, j=1,2$ [<i>Załącznik A4</i>].....	54
Tabela 10. Wartość współczynników podziału zastosowane do obliczenia współrzędnych wierzchołków podstawowej struktury Ω_1 dla $i, j=1,2$ [<i>Załącznik A4</i>].....	55
Tabela 11. Współrzędne wierzchołków A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} , D_{ij} (dla $i, j=1,2$) struktury podstawowej Ω_1 dla $i, j=1,2$ [<i>Załącznik A4</i>].....	55
Tabela 12. Wartości współczynników podziału definiujących współrzędne wierzchołków pierwszej struktury pochodnej Ω_{d1} dla $i, j=1,2$ [<i>Załącznik A4</i>].....	57
Tabela 13. Współrzędne wierzchołków A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} i D_{ij} (dla $i, j = 1, 2$) pierwszej pochodnej struktury Ω_{d1} [<i>Załącznik A4</i>].....	58
Tabela 14. Wartości współczynników podziału definiujących współrzędne wierzchołków drugiej struktury pochodnej Ω_{d2} dla $i, j = 1, 2$ [<i>Załącznik A4</i>].....	60
Tabela 15. Współrzędne wierzchołków A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} i D_{ij} (dla $i, j = 1, 2$) należących do drugiej struktury pochodnej Ω_{d2} . [<i>Załącznik A4</i>].....	61

Tabela 16. Podstawowe właściwości elementów dźwigara obliczone w wyniku procesu optymalizacji konfiguracji podstawowej K_b [Załącznik A2].....	66
Tabela 17. Naprężenia ściskające σ_c /rozciągające σ_r obliczone dla najbardziej naprężonych prętów należących do każdego typu konfiguracji pochodnych K_{pj} ($j=1-3$) [Załącznik A2].....	67
Tabela 18. Podstawowe właściwości elementów K_b wyliczone w procesie optymalizacji [Załącznik A3].....	73
Tabela 19. Naprężenia obliczone dla najbardziej obciążonych prętów należących do każdego typu konfiguracji pochodnych K_{gi} [Załącznik A3].....	74
Tabela 20. Naprężenia obliczone dla najbardziej obciążonych prętów należących do każdego typu konfiguracji pochodnych K_{ci} [Załącznik A3].....	75
Tabela 21. Naprężenia obliczone dla najbardziej obciążonych prętów należących do każdego typu konfiguracji pochodnych K_{ce} [Załącznik A3].....	76
Tabela 22. Podstawowe wielkości geometryczne i mechaniczne prętów każdego z czterech elementów obliczone na podstawie konfiguracji podstawowej K_b [Załącznik A5].....	86
Tabela 23. Naprężenia ściskające σ_c /naprężenia ścinające σ_r obliczone dla najbardziej obciążonych prętów każdego element pochodnej odwróconej konfiguracji trapezowej K_{pj} ($j=1-4$) [Załącznik A5].....	87
Tabela 24. Naprężenia ściskające σ_c /naprężenia ścinające σ_r obliczone dla najbardziej obciążonych prętów każdego element pochodnej konfiguracji trapezowej K_{pj} ($j=5-8$) [Załącznik A5].....	87
Tabela 25. Testowane konfiguracje ram z różnymi typami połączeń wsporczych [Załącznik A6].....	95
Tabela 26. Charakterystyki obciążenia symulowanych modeli [Załącznik A6].....	96
Tabela 27. Wartości obciążenia działającego na dach i ściany budynku dla każdej z rozpatrywanych kombinacji obciążeń [Załącznik A6].....	100
Tabela 28. Charakterystyki mechanicznych właściwości badanych konfiguracji ram charakteryzujących się stałymi przekrojami analogicznych elementów, bez optymalizacji przekrojów [Załącznik A6].....	103
Tabela 29. Charakterystyki: geometryczna i mechaniczna badanych konfiguracji ram o różnych przekrojach analogicznych elementów optymalizowanych ram [Załącznik A6].....	104

Tabela 30. Współczynniki trzech linii prostych biorących udział w procesie aproksymacji oraz współrzędne punktów przecięcia tych linii [*Załącznik A6*].....111

11. SPIS ZAŁĄCZNIKÓW

Załącznik A1: publikacja Abramczyk J., Chrzanowska K. : **Complex Building Forms Roofed with Transformed Shell Units and Defined by Saddle Surfaces** – Materials 2022, 15(24), 8942, wraz z kopią oświadczenia Współautora w sprawie wkładu w przygotowanie publikacji z dnia 31.01.2025.

Załącznik A2: publikacja Abramczyk J., Chrzanowska K. : **An Influence of Roof Lattice Girder Inclination on the Work of Structural Systems Supporting Shed Roof Sheeting** - Proceedings of CEE 2023, International Conference Current Issues of Civil Environmental Engineering Lviv-Košice-Rzeszów, wraz z kopią oświadczenia Współautora w sprawie wkładu w przygotowanie publikacji z dnia 31.01.2025.

Załącznik A3: publikacja Abramczyk J., Chrzanowska K., Bielak W. : **Impact of Inclination of Girders and Columns on the Effort and Stability of Flat Bar Frames** – Materials 2023, 16(18), 6284, wraz z kopią oświadczenia Współautorów w sprawie wkładu w przygotowanie publikacji z dnia 31.01.2025.

Załącznik A4: publikacja Abramczyk J., Chrzanowska K. : **Unconventional building forms roofed with innovative structures arranged on regular surfaces with the negative Gaussian curvature** – Budownictwo i Architektura 22/2023, 5-25, wraz z kopią oświadczenia Współautora w sprawie wkładu w przygotowanie publikacji z dnia 31.01.2025.

Załącznik A5: publikacja Chrzanowska K. : **An influence of column inclination on the work of plane bar structural systems supporting shed roof sheeting** - Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA.

Załącznik A6: publikacja Abramczyk J., Chrzanowska K.: **Impact of column support stiffness on the mechanical performance of flat structural systems supporting thin-walled folded roofs** - Materials 2025, 18(1), 67 wraz z kopią oświadczenia Współautora w sprawie wkładu w przygotowanie publikacji z dnia 31.01.2025.

12. STRESZCZENIE

Kształtowanie niekonwencjonalnych form i konstrukcji budynków stanowi jeden z ciekawszych obszarów współczesnej architektury i budownictwa. Tradycyjne rozwiązania coraz częściej zostają zastąpione przez innowacyjne. Wraz z rosnącym postępowaniem technologicznym, jak również dzięki wprowadzaniu nowych materiałów możliwe jest eksperymentowanie z formami, które wcześniej były niemożliwe do zrealizowania. Współczesne budynki i ich konstrukcje łączą estetykę z funkcjonalnością, przez co stają się integralną częścią środowiska, co pomaga w dostosowaniu tych budowli do zmieniających się warunków klimatycznych i społecznych.

Głównym celem pracy było opracowanie procedury kształtowania form i konstrukcji budynków, przy wykorzystaniu szczególnych właściwości geometrycznych i mechanicznych cienkościennych, trapezowych arkuszy fałdowych, przekształconych w powłokowe dachy. Pracę podzielono na sześć artykułów, w których analizowano kolejne zagadnienia.

Przeprowadzone badania pozwoliły utworzyć kilka ciekawych przykładów form niekonwencjonalnych budynków. Badania te mają charakter jakościowy, jak i ilościowy. Aby móc przeprowadzić symulacje komputerowe i analizę danych, użyto programu Robot Structural Analysis Professional. Utworzono algorytm, który wykorzystuje nową procedurę kształtowania złożonych form, przy możliwości zadania wierzchołków sieci referencyjnej. Algorytm ten przedstawiono na trzech przykładach, przy jednoczesnym zastosowaniu odpowiednich zależności współczynników podziału. Dokonano analizy wpływu zmian nachylenia wybranych elementów układów konstrukcyjnych ram (dźwigar kratowy, słupy) na pracę wytrzymałościową i stateczność tych układów. Obejmuje ona optymalizację przekrojów poprzecznych tych elementów. Dokonano analizy możliwości kształtowania niekonwencjonalnych form budynków składanych, w szczególności ich złożonych wielopłaszczyznowych fasad i wielopowłokowych dachów. Do tej analizy użyto języka programowania AutoLISP, zaprojektowanego dla edytora graficznego AutoCAD. Ostatecznie opracowano jednoparametrowy model ramy w oparciu o analityczny zapis zależności zaobserwowanych w trakcie badań.

13. ABSTRACT

The shaping of unconventional building forms and structures is one of the most interesting areas of contemporary architecture and construction. Traditional solutions are increasingly being replaced by innovative ones. With increasing technological progress, as well as with the introduction of new materials, it is possible to experiment with forms that were previously impossible. Modern buildings and their structures combine aesthetics with functionality, making them an integral part of the environment, which helps adapt these structures to changing climatic and social conditions.

The main objective of the work was to develop a procedure for shaping the forms and structures of buildings, using the special geometric and mechanical properties of thin-walled trapezoidal folded sheets, transformed into shell roofs. The work was divided into six articles, in which the following issues were analyzed.

The research carried out made it possible to create some interesting examples of unconventional building forms. The research is both qualitative and quantitative in nature. To be able to carry out computer simulations and data analysis, Robot Structural Analysis Professional software was used. An algorithm was created that uses a new procedure for shaping complex forms, with the ability to task the vertices of the reference network. The algorithm was presented using three examples, while applying the appropriate relationships of the partition coefficients. An analysis of the effect of changes in the inclination of selected elements of the structural systems of frames (lattice girder, columns) on the strength work and stability of these systems was carried out. It includes optimization of cross sections of these elements. An analysis was made of the possibilities of forming unconventional forms of folding buildings, in particular their complex multi-panel facades and multi-panel roofs. The AutoLISP programming language, designed for the AutoCAD graphics editor, was used for this analysis. Finally, a one-parameter frame model was developed based on an analytical record of the relationships observed during the study.

