



Numéro d'ordre : 40274

Ecole doctorale Sciences Pour l'Ingénieur

THESE

en cotutelle avec l'Université de Technologie de Gdansk

présentée à

l'Université Lille 1 Sciences et Technologies

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université

Spécialité : Mécanique

par

Rafał PANKAU

Conception optimale des portiques
avec la prise en compte des problèmes de stabilité

Soutenue publiquement le 02 juin 2010
devant le jury composé de :

M. Krzysztof WOŹNICA

Mme Elżbieta URBAŃSKA-GALEWSKA

M. Mariusz PYRZ

M. Czesław SZYMCZAK

Rapporteur – Président

Rapporteur

Directeur de thèse

Co-directeur de thèse

POLITECHNIKA GDAŃSKA
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

UNIVERSITE LILLE 1
SCIENCES ET TECHNOLOGIES
Polytech'Lille

ROZPRAWA DOKTORSKA / THESE DE DOCTORAT

mgr inż. Rafał Pankau

**Optymalne projektowanie układów ramowych
z uwzględnieniem problemów stateczności**

**Conception optimale des portiques
avec la prise en compte des problèmes de stabilité**

Pracę wykonano w Politechnice Gdańskiej (Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska) oraz w Université Lille 1, Sciences et Technologies (Polytech'Lille) w ramach realizacji programu wspólnych doktoratów.

Podstawa prawna:

Umowa o wspólnym doktoracie mgr inż. Rafała Pankau zawarta pomiędzy Politechniką Gdańską i Uniwersytetem Nauk i Technologii Lille 1 w dn. 14.06.2005 r.

Le travail a été réalisé à l'Université de Technologie de Gdansk (Faculté de Génie Civil et d'Environnement) et à l'Université Lille 1, Sciences et Technologies (Polytech'Lille) dans le cadre de réalisation des thèses en cotutelle.

Base juridique :

Convention de co-tutelle de thèse de M. Rafal Pankau, signée par l'Université de Technologie de Gdansk et l'Université de Sciences et Technologie de Lille le 14.06.2005.

Promotorzy / Directeurs de thèse
Prof. dr hab. inż. Czesław Szymczak
Dr hab. inż. Mariusz Pyrz

Gdańsk, 2010

Dziękuję Promotorom za wsparcie,
przekazaną wiedzę, wyrozumiałość i cierpliwość.

Rafał Pankau

Abstrakt

Wykorzystanie stalowych ram portalowych w budownictwie jest bardzo powszechne. Inżynierowie w trakcie procesu projektowego dążą do zredukowania kosztów konstrukcji, a przez to kosztów całego przedsięwzięcia inwestycyjnego. Jednak złożoność problemu oraz brak odpowiednich narzędzi wspomagających proces optymalizacji, utrudnia efektywne wykorzystanie materiału. W niniejszej rozprawie wykorzystano algorytmy genetyczne w celu rozwiązania problemów optymalizacji stalowych ram portalowych.

W pierwszej części pracy rozpoznano problematykę projektowania ram portalowych oraz poczyniono założenia projektowe. Zapoznano się z europejskimi oraz polskimi normami projektowania konstrukcji stalowych oraz normami obciążeń. Na podstawie norm zbudowano procedury do wymiarowania przekrojów i elementów uwzględniające wszelkie niezbędne warunki, które muszą spełniać przekroje, elementy oraz ramy, aby mogły być wykorzystane w rzeczywistych konstrukcjach.

W dalszej części pracy przedstawiono wersję algorytmu genetycznego dostosowanego do optymalizacji układów ramowych. Stworzone procedury oraz algorytm genetyczny wykorzystane zostały do opracowania (zaprogramowania) aplikacji komputerowej zawierającej moduły obliczeń statycznych, obliczeń stateczności, wymiarowania oraz optymalizacji.

Wykorzystując stworzoną aplikację, sformułowano i rozwiązano problemy optymalizacji stalowych ram portalowych zgodnie z normami europejskimi, a następnie zgodnie z polskimi normami projektowania. W przypadku norm europejskich przyjęto, iż optymalizowane ramy składają się z elementów o przekrojach monosymetrycznych lub z elementów o przekrojach bisymetrycznych. W przypadku norm polskich rozważano ramy składające się z elementów o przekrojach bisymetrycznych. Przeanalizowano 96 przykładów ram, różniących się geometrią oraz obciążeniami.

Na podstawie przeprowadzonej analizy sformułowano wnioski i zalecenia dotyczące optymalnego kształtowania ram portalowych. Wyniki zestawiono w formie tabel oraz wykresów, a przedstawione rezultaty mogą być wykorzystywane przez inżynierów w realnych problemach projektowych.

Abstract

The use of portal frames in building engineering is very common. Engineers, during the design process, aim to reduce the costs of the structure and because of that the whole investment. However complexity of the problem and lack of proper tools assisting the optimisation process, hamper the effective using of material. To solve the problem of optimization of steel portal frames the genetic algorithms were used in hereby thesis.

In the first part of dissertation the problems of steel portal frames design were analysed and design assumptions were done. European and Polish codes for steel structures design and standards for loads got acquainted.

On the basis of standards, procedures for dimensioning of sections and elements were built taking into account all essential conditions which sections, elements and frames must fulfil so that they can be used in real structures.

In further part of dissertation the version of the genetic algorithm adapted for the optimization of frame structures was presented.

Created procedures and the genetic algorithm were used for creating (programming) of computer application containing modules of static calculations, calculations of stability, dimensioning and optimization.

Using the created application, optimization of steel portal frames problems were stated and solved in accordance with European standards, afterwards in accordance with Polish standards. In case of European standards it was assumed that frames being optimized were made of elements with monosymmetrical or bisymmetrical sections. In case of Polish standards frames made of elements with bisymmetrical sections were considered. There were 96 examples of frames differing in geometry or loads analyzed.

According to carried out analysis conclusions and recommendations were made concerning optimal forming of portal frames. Results are collected in tables and graphs which can be used by civil engineers in real design cases.

Spis treści:

Abstrakt	7
Abstract	8
Spis treści:	9
1. Wprowadzenie	11
1.1. Wstęp	11
1.2. Geneza i teza pracy	13
1.3. Przegląd literatury	14
1.4. Cel i zakres pracy	17
2. Projektowanie ramy portalowej	20
2.1. Charakterystyka procesu projektowania konstrukcji ramowej	20
2.2. Założenia projektowe analizy ram	22
2.2.1. Geometria ram, konstrukcja dachu i rodzaj poszycia	23
2.2.2. Obciążenia	25
2.2.2.1. Obciążenia wg Norm Europejskich (Eurokod)	25
2.2.2.2. Obciążenia wg Polskich Norm	26
2.2.3. Schematy statyczne	27
2.2.4. Wpływ deformacji na siły wewnętrzne	28
2.2.5. Węzły ram	28
2.2.6. Sytuacje (metody) projektowania	29
2.2.7. Stateczność ogólna	30
2.3. Projektowanie elementów składowych zgodnie z EC-3	31
2.3.1. Klasyfikacja przekrojów	31
2.3.2. Stateczność lokalna	32
2.3.3. Normowe warunki nośności	33
2.3.3.1. Nośność przekrojów	33
2.3.3.2. Nośność prętów	36
2.3.4. Normowe warunki użyteczności	37
2.4. Projektowanie elementów składowych zgodnie z PN	38
2.4.1. Klasyfikacja przekrojów	38
2.4.2. Stateczność lokalna	38
2.4.3. Normowe warunki nośności	39
2.4.3.1. Nośność przekrojów	39
2.4.3.2. Nośność prętów	41
2.4.4. Normowe warunki użyteczności	42
2.5. Analiza porównawcza metod projektowania wg PN-90/B-03200 oraz EC-3	42
3. Metody optymalizacji	47
3.1. Problem optymalizacji	47
3.2. Przegląd metod optymalizacji	50
3.3. Wybór metody optymalizacji konstrukcji ramowej	52
4. Algorytm genetyczny	54
4.1. Wstęp	54
4.2. Kodowanie i dekodowanie	56
4.3. Sposób tworzenia populacji bazowej	57
4.4. Ocena środowiska – funkcja przystosowania	57
4.5. Preselekcja	59
4.6. Krzyżowanie	62
4.7. Mutacja	64
4.8. Sukcesja	65
4.9. Kryterium zakończenia obliczeń	66

5. Projektowanie ram stalowych zgodnie z PN-90/B-03200 / Eurokod-3 z wykorzystaniem AG	67
5.1. Opis procesu projektowego	67
5.1.1. Projektowanie tradycyjne (pracownia projektowa)	67
5.1.2. Projektowanie z zastosowaniem AG	69
5.2. Opis problemu optymalizacji	71
5.3. Implementacja komputerowa	72
5.3.1. Struktura programu optymalizacji z zastosowaniem AG	73
5.3.2. Struktura programu dla projektowania według PN-90/B-03200 / Eurokod-3	75
6. Optymalizacja ram zgodnie z EC-3	78
6.1. Sformułowanie problemu optymalizacji	78
6.1.1. Monosymetryczne przekroje elementów składowych ram	78
6.1.2. Bisymetryczne przekroje elementów składowych ram	82
6.2. Rozwiązanie problemu	84
6.2.1. Dobór parametrów	85
6.2.1.1. Dobór sposobu oceny środowiska	87
6.2.1.2. Dobór liczebności populacji	89
6.2.1.3. Dobór metody preselekcji	90
6.2.1.4. Dobór metody krzyżowania	91
6.2.1.5. Dobór parametrów operatora mutacji	93
6.2.1.6. Dobór metody sukcesji	94
6.2.2. Wyniki optymalizacji ram	95
6.2.2.1. Wyniki dla przekrojów monosymetrycznych elementów składowych ram	96
6.2.2.2. Wyniki dla przekrojów bisymetrycznych elementów składowych ram	99
6.2.3. Analiza wyników optymalizacji ram	100
6.2.3.1. Przekroje monosymetryczne elementów składowych ram	100
6.2.3.2. Przekroje bisymetryczne elementów składowych ram	114
7. Optymalizacja ram zgodnie z PN	118
7.1. Sformułowanie problemu optymalizacji	118
7.2. Rozwiązanie problemu	120
7.2.1. Wyniki optymalizacji	120
7.2.2. Analiza wyników	121
8. Podsumowanie i plany dalszych prac	124
8.1. Metodologia projektowania z zastosowaniem AG	124
8.2. Wykorzystanie AG w projektowaniu ram zgodnie z EC-3	125
8.2.1. Ramy składające się z elementów o przekrojach monosymetrycznych (RMO)	126
8.2.2. Ramy składające się z elementów o przekrojach bisymetrycznych (RBI)	127
8.3. Wykorzystanie AG w projektowaniu ram zgodnie z PN	128
8.4. Plany dalszych prac	129
Bibliografia	131
Załącznik A – wyniki optymalizacji RMO zgodnie z EC-3	139
Załącznik B – wyniki optymalizacji RBI zgodnie z EC-3	176
Załącznik C – wyniki optymalizacji RBI zgodnie z PN	185
Załącznik D – aktywność ograniczeń dla RMO (optymalizacja zgodnie z EC-3)	190
Załącznik E – aktywność ograniczeń dla RBI (optymalizacja zgodnie z EC-3)	194
Załącznik F – aktywność ograniczeń dla RBI (optymalizacja zgodnie z PN)	197

1. Wprowadzenie

1.1. Wstęp

Problemy optymalizacji dotyczą znakomitej większości czynności, które wypełniają nasze codzienne życie, dotyczą one również działalności inżynierskiej. Inżynieria z definicji jest działalnością polegającą na projektowaniu, konstrukcji, modyfikacji i utrzymaniu efektywnych kosztowo rozwiązań dla praktycznych problemów, z wykorzystaniem wiedzy naukowej oraz technicznej. Działalność ta wymaga rozwiązywania zagadnień różnej natury oraz skali. Bardziej ogólnie, inżynieria zajmuje się również rozwojem technologii. W ściślejszym (systemowym) sensie, inżynieria to używanie właściwości materii, energii oraz obiektów abstrakcyjnych dla tworzenia konstrukcji, maszyn i produktów, przeznaczonych do wykonywania określonych funkcji lub rozwiązania określonego problemu.

Inżynier wykorzystuje wyobraźnię i doświadczenie, umiejętność oceny i rozumowanie, stosując świadomie własną wiedzę do projektowania, tworzenia, eksploatacji i usprawnienia użytecznych maszyn oraz procesów (np. inżynieria procesów produkcji, inżynieria środowiska, bioinżynieria).

Z inżynierskiego punktu widzenia staramy się wykorzystać posiadane zasoby w sposób najbardziej wydajny (optymalny), jednocześnie zwracając uwagę na pewne uwarunkowania i ograniczenia, które nas dotyczą. Dzisiejsze realia ekonomiczne oraz ciągła i wszechobecna konkurencja, wymagają od nas tego, aby nie poprzestawać na osiągnięciu wyniku satysfakcjonującego, lecz dążyć do uzyskania wyniku najlepszego z możliwych. Przemysł motoryzacyjny, lotniczy, chemiczny, elektronika, budownictwo,

ekonomia, to przykłady dziedzin, w których konieczne jest używanie narzędzi optymalizacji w celu dostarczenia najlepszego rozwiązania i produktu. Optymalne rozwiązania czynią produkt lub usługę konkurencyjną (cenowo i jakościowo), co z kolei pozwala umacniać pozycję rynkową, daje możliwości rozwoju przedsiębiorstwom i koncernom, a w trudnych czasach dzięki najlepszemu (optymalnemu) produktowi umożliwia przetrwanie na rynku.

Metody optymalizacji cechują się tym, że są zazwyczaj bardzo ogólne. Zastosowanie optymalizacji w praktyce wymaga specyficznego podejścia, uzależnionego od charakterystyk rozważanego problemu i zamierzonego celu. Należy zatem zwrócić szczególną uwagę na sformułowanie problemu optymalizacji odpowiednio dobierając proporcje pomiędzy projektowaniem i analizą. Zmiany tych proporcji zwłaszcza w przypadku projektowania konstrukcji inżynierskich (np. konstrukcji stalowych), wpływają w istocie na efekt końcowy, który jest mierzony terminowością wykonania zadania oraz poprawnością merytoryczną, w tym również jakością rozwiązań. W trakcie procesu projektowania tworzy się system i dokonuje się niezwykle ważnych wyborów dotyczących chociażby takich zagadnień jak: typ konstrukcji, narzucona geometria, rodzaje elementów i ich usytuowanie. W trakcie analizy dokonuje się sprawdzenia odpowiedzi systemu (naprężenia w konstrukcji, deformacje itp.) poddanego oddziaływaniom wejściowym. W związku z powyższym, aby rozwiązać rzeczywisty, inżynierski problem optymalizacji, niezbędna jest odpowiednia metoda rozwiązania problemu optymalizacji, która odpowiednio wykorzystana pozwoli oszczędzić koszty (czas, materiał, itp.) i jednocześnie zaproponować najbardziej efektywne rozwiązanie.

Optymalizacja jest narzędziem bardzo użytecznym i dzisiaj niemal niezbędnym. Metody optymalizacji z powodzeniem używane są w zagadnieniach inżynierskich od wielu lat. Należy jednak pamiętać o tym, że nawet najlepsze narzędzia optymalizacji nie zastąpią projektanta, osoby która dzięki swojej wiedzy, doświadczeniu, wyczuciu i inteligencji potrafi stworzyć odpowiedni system i sprawdzić jego przydatność oraz otrzymane wyniki, bowiem tylko wtedy efekt może być wykorzystany w praktyce. Metody optymalizacji skracają proces projektowania, podnoszą jego jakość i dają projektantom i inżynierom czas, który można wykorzystać na kreatywną pracę. Optymalizacja jest w dzisiejszych czasach bardzo efektywnym narzędziem wspomagającym projektowanie.

1.2. Geneza i teza pracy

Pomysł na podjęcie problematyki optymalizacji konstrukcji ramowych, zrodził się podczas praktyki w pracowni projektowej realizującej projekty konstrukcji metalowych, w której to wiele godzin poświęcano analizowaniu schematów statycznych konstrukcji i procedurze optymalizowania przekrojów poszczególnych elementów. Chcąc zaprojektować optymalną, ekonomiczną konstrukcję, bez stosowania metod optymalizacji, należy liczyć się z tym, iż to właśnie analiza pochłonie znaczną część czasu i energii przeznaczonych na wykonanie projektu. Prowadzi to do obniżenia jakości końcowego opracowania graficznego, które dodatkowo niejednokrotnie poddawane jest modyfikacji w trakcie realizacji zadania projektowego i na które brakuje przeważnie czasu. Niska jakość projektu, a także błędy (w części graficznej), prowadzą z kolei do niedokładnego odwzorowania przyjętych założeń konstrukcyjnych, schematu statycznego, utrudnień podczas produkcji i montażu, co może w rezultacie zniweczyć dzieło. Wprowadzając usprawnienia w postaci wykorzystania metod optymalizacji jako narzędzia wspomagającego projektowanie można nie tylko skrócić czas potrzebny na analizę, ale także uzyskać lepsze wyniki prowadzące do konstrukcji zoptymalizowanej.

Szczególnym typem konstrukcji, dobrze odzwierciedlającym problematykę opisaną powyżej, są ramy portalowe. Tego typu konstrukcji używa się bardzo często w jednoprzestrzennych obiektach halowych o rozpiętości do około 30m i wysokości do około 12m. Optymalne projektowanie stalowych ram portalowych stanowi niezmiennie w każdym projekcie wyzwanie, polegające na odpowiednim podziale ramy na elementy, umiejętnym dobraniu sztywności poszczególnych elementów (mają na uwadze dystrybucję sił wewnętrznych oraz warunki stateczności globalnej) oraz odpowiednim dobraniu kształtów przekrojów. Wszystkie zmienne projektowe należy dobrać w trakcie analizy tak, aby w rezultacie otrzymać konstrukcję o możliwie małej wadze, a tym samym najniższym koszcie, który w przypadku tego typu konstrukcji stanowi większość kosztów całej konstrukcji stalowej obiektu. Producenci oprogramowania wspomagającego projektowanie nie oferują w chwili obecnej odpowiednich narzędzi optymalizacji, które mogłyby znacznie skrócić czas poświęcany analizie.

Główną tezę pracy sformułowano następująco:

Zastosowanie odpowiednich metod optymalizacji umożliwia efektywne projektowanie konstrukcji stalowych (zgodnie z Europejskimi i Polskimi normami projektowania oraz z uwzględnieniem warunków utraty stateczności lokalnej i globalnej), poprzez skrócenie czasu projektowania, zmniejszenie kosztów obliczeń komputerowych oraz zmniejszenie kosztów zaprojektowanej konstrukcji. Algorytmy genetyczne (należące do metod optymalizacji probabilistycznej) są efektywnym narzędziem do optymalnego projektowania konstrukcji metalowych i mogą być efektywnie i skutecznie wykorzystywane w praktyce optymalnego projektowania ram portalowych z uwzględnieniem niezbędnych warunków i ograniczeń.

1.3. Przegląd literatury

Tematyka badawcza dotycząca optymalizacji nie tylko ram stalowych, ale również innego rodzaju konstrukcji stalowych jest tematyką aktualną, interesującą wielu badaczy. Świadczą o tym specjalistyczne sesje kongresów i konferencji z dziedziny optymalizacji, poświęcane regularnie optymalizacji konstrukcji prętowych i ramowych, optymalnemu wymiarowaniu czy poszukiwaniu najbardziej odpowiednich kształtów i topologii. Jako przykład można tutaj wymienić: Sympozjum Międzynarodowego Stowarzyszenia Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej IUTAM (Gutkowski, Bauer, 1994), organizowane regularnie co dwa lata światowe kongresy optymalizacji konstrukcji WCSMO-1 (First World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization, 28.05-02.06.1995, Goslar, Niemcy) – Olhoff, Rozvany (Edycja WCSMO-1); WCSMO -2 (1997, Zakopane, Polska) - Gutkowski, Mróz (Edycja WCSMO-2); WCSMO-3 (17.05-21.05.1999, Buffalo, Nowy Jork, USA); WCSMO-4 (04.06-08.06.2001, Dalian, Chiny); WCSMO-5 (19.05-23.05.2003, Lidio di Jesolo – Wenecja, Włochy); WCSMO-6 (30.05-05.06.2005, Rio de Janeiro, Brazylia); WCSMO-7 (21.05-25.05.2007, Seul, Korea); WCSMO-8 (01.06-05.06.2009, Lizbona, Portugalia) oraz wiele innych.

W literaturze spotyka się całe monografie poświęcone optymalizacji konstrukcji stalowych, a jedną z bardziej znanych jest monografia Farkas i Jarmai, (2003), w której autorzy opisują występujące zagadnienia i możliwości ich rozwiązania. Należy jednak wymienić również inne prace, takie jak: Hemp (1973), Brandt (1977), Brandt (1978),

Stark, Nicholls (1979), Majid (1981), Farkas (1984), Mikulski (1999), Ostwald (2005), w których optymalne projektowanie kratownic i ram zajmuje ważne miejsce.

Poszukiwanie optymalnego, kształtu konstrukcji budowlanych lub jej elementów, celem osiągnięcia minimalnego kosztu to cel bardzo wielu prac, których szczegółowy przegląd znacznie wykracza poza ramy tego opracowania. Wspomnieć jednak można np. artykuły: Chróścielewski, Szymczak (1987), Kallassy, Marcelin (1997) – traktujące o optymalizacji płyt. Publikacje Kincaid (1993), Pyrz (1990a), Pyrz (1990b), Pyrz (1995), Pyrz (1996), Pyrz, Zawidzka (2000), Gero et al. (2005), Rajan (1995), Błachowski, Gutkowski (2008), Bojczuk, Mróz (1999), Jendo, Paczkowski (1993) – opisują optymalizację układów kratownicowych (złożonych z prętów obciążonych siłami normalnymi), często wykorzystywanych jako przykład testowy algorytmów optymalizacyjnych. Prace Kolka, Szymczak (1984), Mikulski, Szymczak (1986), Bochenek (1987), Żochowski (1983), Saka (1991), Egner, Życzkowski (2003), Farkas, Jarmai (1995), Gierliński, Mróz (1981) poświęcone zostały optymalizacji i optymalnemu projektowaniu elementów prętowych (prętów pojedynczych), natomiast May, Balling (1992), Jarmai, Farkas (1999), Gero et al. (2006) przedstawiają rozwiązania problemów optymalizacji różnego typu konstrukcji inżynierskich.

Problem poszukiwania rozwiązań optymalnych dla konstrukcji ramowych poruszany jest również w znacznej liczbie artykułów opublikowanych w czasopiśmie branżowych, lub przy okazji konferencji. Najstarszym odnalezionym artykułem poświęconym optymalizacji ram na jaki natrafił autor niniejszej rozprawy, jest praca Michell (1904), zatem problem optymalizacji konstrukcji ramowych interesował naukowców już od dawna.

W problematyce optymalizacji konstrukcji ramowych stosowane są różnego rodzaju metody, uwzględniające specyfikę zagadnienia i obecność zmiennych dyskretnych. Do pierwszych artykułów poświęconych optymalizacji ram zaliczyć należy prace: Farkas, Szabo (1980), Gutkowski et al. (1986), w których autorzy przeszukują metodami kombinatorycznymi możliwe rozwiązania w poszukiwaniu najlepszego wariantu ramy przestrzennej złożonej z kształtowników katalogowych lub spawanych. Podobne zagadnienie rozpatrywano również w pracy Huang, Arora, (1997). W pracy Gang Li et al. (1999) zastosowano technikę wielopoziomowej dekompozycji i rozwiązywano mniejsze problemy odpowiednimi dla takich problemów metodami (np. metodą przeszukiwania). Optymalizacji poddano wielopoziomową ramę stalową. W artykule Hernandez (2005), zastosowano metodę poszukiwań jednokierunkowych,

a optymalizacji poddano ramy parterowe wielonawowe. W pracy Isenberg et al. (2002), optymalizowane konstrukcje to kilkupiętrowe ramy stalowe o prostokątnych przekrojach elementów, a wykorzystano metodę iteracyjną opartą na metodzie deterministycznej (mnożników Lagrange'a). W przypadkach wymienionych wyżej, ze względu na ograniczenia wykorzystywanych metod, nie uwzględniono wszystkich ograniczeń normowych, optymalizowaną konstrukcję uproszczono i zmniejszono liczbę zmiennych projektowych (zmiana sztywności co jedną kondygnację, przekrój bisymetryczny lub jedynie przekroje walcowane bisymetryczne). W rezultacie ograniczenia metody i duża ilość czasu niezbędna do wykonania obliczeń powodują, iż należy szukać metod dużo bardziej wydajnych i odpowiednich do sformułowanego w problemie optymalizacji.

Optymalizację kosztów lub masy konstrukcji ramowej prowadzi się również z uwagi na inne kryteria, na przykład połączenia podatne słupów z belkami, w problemach sejsmicznych. To główny cel grupy opracowań do której należą min.: Hayalioglu, Degertekin (2005), Nizar Bel Hadj et al. (2009), Kameshki, Saka (2001), Simoes (1996). W opracowaniach tych autorzy skupiają się na rozwiązaniu problemu optymalizacji konstrukcji poddanych obciążeniom sejsmicznym (najczęściej wielokondygnacyjnych ram stalowych) oraz na znalezieniu optymalnych przekrojów, zazwyczaj z katalogów profili walcowanych.

Przegląd literatury pozwolił odnaleźć również grupę artykułów o tematyce zbliżonej do analizowanej w niniejszej pracy. Różnią się one jednak wyraźnie (w stosunku do niniejszej pracy) normą do projektowania, kompleksowością zastosowanych ograniczeń normowych, przyjętym rodzajem przekrojów elementów (walcowane, spawane), czy wreszcie przydatnością do wykorzystania w realnych problemach inżynierskich. Do tej grupy można zaliczyć opracowanie Saka (2003), w którym optymalizowane ramy mają przekroje walcowane i konstrukcję odmienną od przyjętej w niniejszej pracy (ramy wielopiętrowe), zaś obciążenia nie są zgodne z odpowiednimi normami do projektowania. W rezultacie wyniki nie mogą być wykorzystane w realnych problemach projektowania. W opracowaniu Kravanja, Zula (2010), optymalizacji poddano przekroje ramy parterowej oraz rozstawy osiowe ram. Geometria ramy oraz zastosowana norma, wg której skonstruowano ograniczenia są podobne do przyjętych w niniejszej pracy, lecz rodzaje profili (tutaj walcowane HEA) są odmienne, co wymuszone jest również ograniczeniami metody jaką użyto w tym opracowaniu. Efektem jest „optymalna rama”, która przy rozpiętości 24m charakteryzuje się wskaźnikiem zużycia stali na poziomie 45

kg na m² rzutu hali, a efekt taki można uzyskać w dużo krótszym czasie bez stosowania metod optymalizacji. W pracy Chen, Hu (2008) optymalizacji poddano parterowe ramy portalowe złożone z elementów o zbieżnych pasach. Założono słupy bez zmian przekrojów pasów, bez zmian grubości środnika oraz założono rygle bez zmian przekrojów pasów ani grubości środnika (ograniczenie ilości zmiennych projektowych). Nie opisano jednak konstrukcji ścian i dachu hali (co ma wpływ na warunki stateczności globalnej słupów i rygla), natomiast obciążenia nie są zgodne z odpowiednimi normami projektowania. Ograniczenia sformułowano na podstawie chińskich wytycznych technicznych, lecz aby wynik mógł być wykorzystany w rzeczywistych budowlach należałoby sformułować wszystkie ograniczenia zgodnie z odpowiednimi normami. Należy wspomnieć również o pracy Guerlement et al. (2001) – w której zajęto się optymalizacją ramy portalowej składającej się z profili walcowanych HEB oraz Jenkins (1992) – dotyczącej optymalizacji ramy bez wykorzystania ograniczeń normowych.. Przydatność w/w opracowań do bezpośredniego wykorzystania w realnym problemie inżynierskim takim jak optymalne projektowanie ram portalowych jest niewielka.

Podsumowując przegląd literatury, należy stwierdzić, iż trudno napotkać prace, które traktują o realnym zagadnieniu projektowym mającym na celu rozwiązanie problemu optymalizacji stalowych ram złożonych z elementów spawanych, obliczanych zgodnie z europejskimi (EC) lub polskimi (PN) normami. Piśmiennictwo w tym zakresie obejmuje konstrukcje dużo bardziej uproszczone (przekroje walcowane, mała liczba zmiennych projektowych, mała liczba ograniczeń) od przyjętej w niniejszej pracy, a wyniki są trudne do adaptacji przez inżynierów. Jednym z celów niniejszej pracy staje się zatem wypełnienie luki pomiędzy teorią a praktyką poprzez zaproponowanie praktycznej metodologii optymalizacji ram portalowych, stworzenie oprogramowania oraz tablic, a także sformułowanie wytycznych, które będą mogły być wykorzystane w realnych zagadnieniach inżynierskich.

1.4. Cel i zakres pracy

Tematyka pracy dotyczy optymalnego projektowania ram portalowych z uwzględnieniem stateczności lokalnej i globalnej oraz zgodnie z normami europejskimi lub polskimi. W przedstawionej rozprawie szczególny nacisk położony został na aspekt wykorzystania metod optymalizacji do rozwiązania rzeczywistych

problemów inżynierskich. Istotną będzie zatem analiza efektywności zaproponowanych procedur oraz zachowanie realiów praktyki projektowej.

Do podstawowych celów postawionych w pracy należy zaliczyć:

- stworzenie procedur wymiarujących konstrukcje stalowe zgodnie z Polskimi (PN) oraz Europejskimi (EC) normami, uwzględniających również problemy niestateczności lokalnej (przekrojów) i globalnej (prętów),
- sformułowanie problemu optymalizacji ram portalowych: określenie kryteriów, zmiennych projektowania i ograniczeń zgodnych z odpowiednimi normami,
- opracowanie metody optymalizacji rozważanych konstrukcji, wykorzystującej algorytmy genetyczne i stworzenie algorytmu dopasowanego do analizowanego problemu optymalnego projektowania,
- stworzenie zintegrowanego środowiska projektowania, grupującego moduły obliczeń statycznych, moduł do obliczeń stateczności oraz moduł wymiarowania,
- uzyskanie wyników przydatnych do bezpośredniego wykorzystania w projektowaniu konstrukcji realnych obiektów, oraz porównanie optymalnych konstrukcji z konstrukcjami projektowanymi w sposób „tradycyjny” (bez użycia procedur optymalizacyjnych).

W pierwszej części pracy (rozdział 2) przedstawiono problematykę projektowania ram portalowych wg norm (PN-EN 1991) / (PN-90/B-03200). Szczególną uwagę zwrócono na: określenie warunków brzegowych dla układu konstrukcyjnego oraz warunków brzegowych dla elementów, zdobycie pełnej wiedzy na temat projektowania konstrukcji stalowej zgodnie z Europejskimi oraz Polskimi normami do projektowania (również z normami obciążeń), wyselekcjonowania warunków, które musi spełniać konstrukcja z uwagi na stan graniczny nośności (SGN) oraz stan graniczny użytkowalności (SGU) oraz na stworzenie i sprawdzenie (na podstawie dostępnej literatury) procedur do wymiarowania przekrojów i prętów.

Dwa następne rozdziały dotyczą problematyki optymalizacji. W pierwszej kolejności (rozdział 3) przedstawiono wprowadzenie do zagadnień optymalizacji oraz dokonano przeglądu istniejących metod optymalizacji numerycznej, proponując algorytm genetyczny do rozwiązania problemu. W rozdziale 4 omówiono szczegółowo algorytm genetyczny (AG) oraz przedstawiono główne procedury i operatory tej metody.

Przedstawiona wersja AG została wykorzystana do opracowania (zaprogramowania) aplikacji komputerowej (w języku FORTRAN-90), zgodnie z zasadami programowania zalecanymi w pracy Trykozko (1999). W rozdziale 5 przedstawiono schemat działania programu komputerowego, opisując wszystkie moduły (obliczenia statyczne w celu wyznaczenia sił wewnętrznych i przemieszczeń oraz innych charakterystycznych parametrów jak np. miejsca zerowania się momentów, obliczenia stateczności celem wyznaczenia sił krytycznych dla elementów ściskanych) oraz procedury wymiarujące i sprawdzające konstrukcję.

W rozdziałach 6 i 7 sformułowano problem optymalizacji, przedstawiono otrzymane rozwiązania oraz analizę wyników. W rozdziale 6 przedstawione zostały obliczenia przeprowadzone dla obciążeń i procedur wymiarowania zgodnie z normami europejskimi, natomiast w rozdziale 7 przedstawiono podejście odpowiadające polskim normom. Szczegółowe wyniki obliczeń numerycznych zamieszczono w załącznikach.

Końcowy rozdział (rozdział 8) pracy poświęcony jest wnioskowi, ocenom oraz perspektywom dalszych badań.

Załączniki zamieszczone po spisie literatury zawierają szczegółowe wyniki numerycznych przykładów obliczeniowych.

2. Projektowanie ramy portalowej

2.1. Charakterystyka procesu projektowania konstrukcji ramowej

Przedmiotem rozważań jest stalowa, parterowa rama portalowa. Schemat statyczny to rama portalowa o słupach przegubowo połączonych z fundamentami. Słupy oraz rygiel są podparte pośrednio w kierunku prostopadłym do płaszczyzny ramy za pomocą tężników i stężeń ściennych oraz za pomocą płatwi i stężeń połaciowych. Przykład takiej konstrukcji przedstawiono na poniższym rysunku (rys. 2.1).



Rys. 2.1 Przykładowa konstrukcja parterowej ramy portalowej

Ramy tego typu stosowane są często w budownictwie halowym, zatem powinny być projektowane, wykonywane i kwalifikowane jako poprawnie wykonane w oparciu o przedmiotowe normy do projektowania oraz wykonawstwa i odbioru. Konstrukcje tego typu są popularne, ponieważ ich wykonanie przy pomocy odpowiednich linii spawalniczych (wyposażonych w półautomaty spawalnicze prowadzone wózkami) nie

nastęcza zbyt wielu problemów technicznych, a przy tym jest stosunkowo (w porównaniu do konstrukcji kratownicowych) mało czasochłonne. Materiał z jakiego wykonywane są ramy to stal niestopowa lub niskostopowa, której parametry wytrzymałościowe i fizykochemiczne narzucone są odpowiednimi normami. Orientacyjny koszt wykonania jednego kilograma tego typu konstrukcji wynosi w zależności od wytwórni od 5 do 10 zł (dane z roku 2009) i zawiera koszty: materiałów, robocizny, powłoki malarskiej lub metalicznej, transportu i montażu.

Proces projektowania konstrukcji wymaga od projektanta podjęcia szeregu decyzji mających na celu:

- przyjęcie układu konstrukcyjnego
- przyjęcie schematu statycznego,
- przyjęcie kształtu elementów,
- przyjęcie liczby styków warsztatowych,
- przyjęcie liczby styków montażowych i maksymalnej długości elementu wysyłkowego,
- przyjęcie gatunku stali wykorzystanej do produkcji konstrukcji,
- wybór rodzaju wykorzystywanych profili,
- wybór procedury wymiarowania w odniesieniu do norm przedmiotowych.

Powyższe decyzje mają decydujący wpływ na ostateczny projekt. Decyzje te mają również zasadnicze znaczenie w przypadku optymalizacji i wpłyną na optymalne rozwiązanie problemu. Wpływ ten zależy od przyjętego kryterium i będzie w zależności od tego czy rozważamy minimalizację zużycia materiału, kosztów wykonawstwa oraz kosztów montażu lub wszystkich tych kryteriów jednocześnie.

Kompletny proces analizy konstrukcji, powinien zawierać wszystkie czynności (decyzje) wymienione wyżej. Niektóre z nich wymagają „jedynie” doświadczenia oraz wiedzy projektanta i nie ma potrzeby kilkukrotnego powtarzania poszczególnych etapów, celem zoptymalizowania rozwiązania. Zaliczyć do nich można: przyjęcie liczby styków warsztatowych, przyjęcie liczby styków montażowych i maksymalnej długości elementu wysyłkowego, przyjęcie gatunku stali, rodzaj wykorzystywanych profili oraz przyjęte procedury sprawdzające. Pozostaje lista czynności, które w wielu przypadkach tradycyjnego projektowania powtarza się kilkukrotnie (proces iteracji). Począwszy od przyjęcia układu konstrukcyjnego, którego zmiana powoduje konieczność powtórzenia pozostałych etapów, przez przyjęcie schematu statycznego, do przyjęcia kształtu

elementów i przekrojów. Realizacja wszystkich tych czynności może być jednakże poddana pełnej lub częściowej automatyzacji, a optimum znalezione dużo szybciej.

Najprostsza pod względem liczby założeń projektowych jest optymalizacja przekroju. Podyktowane jest to tym, że optymalizacja przekroju (pod względem określonego kryterium) nie wymaga praktycznie żadnej wiedzy o ustroju konstrukcyjnym, schemacie statycznym, czy jakichkolwiek warunkach brzegowych. Potrzebne są jedynie wartości sił przekrojowych oraz wiedza z zakresu wytrzymałości materiałów. Przykładem zadań optymalizacyjnych może być np. poszukiwanie przekroju o najmniejszej powierzchni, o najmniejszym obwodzie (optymalizacja kosztów powłoki malarskiej), bądź też o najmniejszej powierzchni i obwodzie.

Aby optymalizować cały element, należy posiadać dane dotyczące np.: długości wyboczeniowych, długości elementu, rozkładu obciążenia i jego położenia względem przekroju, ewentualnych rozwiązań konstrukcyjnych zabezpieczających element prętowy przed utratą stateczności globalnej (np.: blacha trapezowa przy zwichrzeniu), warunków brzegowych oraz rodzaju połączeń z innymi elementami lub węzłami.

Optymalizacja całego układu konstrukcyjnego, wymaga największej ilości danych oraz obliczeń. Przedstawiony w p.1.3 przegląd literatury prezentuje różnorodność kryteriów optymalizacji i metod rozwiązywania. W ogólnym przypadku optymalizacja konstrukcji prętowej jest zagadnieniem bardzo skomplikowanym, związanym z problematyką optymalizacji nieliniowej (stateczność, nieliniowości geometryczne) oraz obecnością mieszanych zmiennych projektowych ciągłych i dyskretnych. Rozwiązanie tego typu zadań wymaga zastosowania odpowiednich metod optymalizacji.

2.2. Założenia projektowe analizy ram

Założenia projektowe dla rozpatrywanych ram portalowych, przyjęto na podstawie przeglądu sposobów modelowania i konstruowania układów ramowych, a także na podstawie doświadczenia autora w projektowaniu konstrukcji metalowych i żelbetowych.

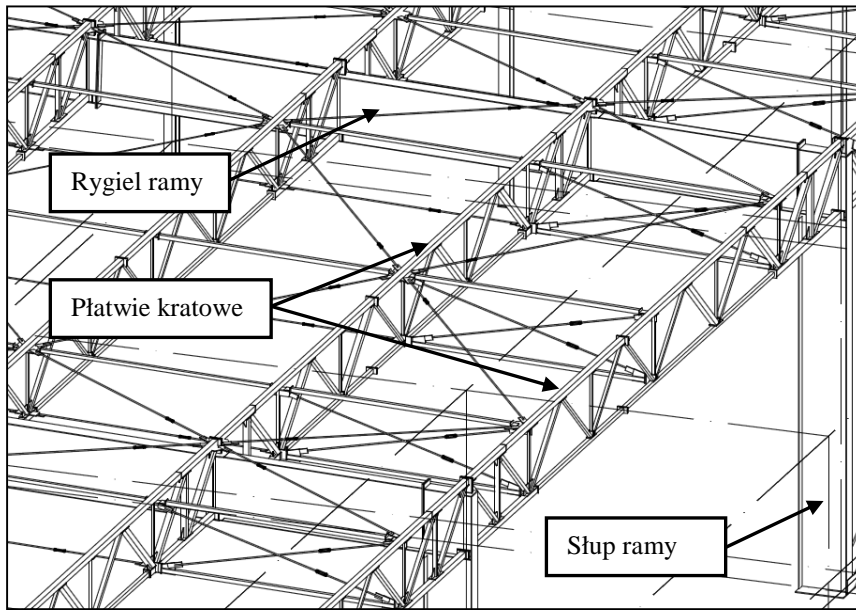
2.2.1. Geometria ram, konstrukcja dachu i rodzaj poszycia

Optymalizowane konstrukcje to konstrukcje ramowe o pionowych słupach i ryglach o małym spadku (do 5%) załamanych w kalenicy znajdującej się w środku rozpiętości rygla. Przyjęto, że słupy są połączone z fundamentami w sposób zapewniający swobodę obrotu pręta (połączenie przegubowe). Rozwiązanie takie jest stosowane w większości przypadków, ponieważ pozwala zmniejszyć wymiary fundamentów oraz ograniczyć liczbę elementów niezbędnych do połączenia konstrukcji stalowej (ramy portalowej) z żelbetową (fundament).

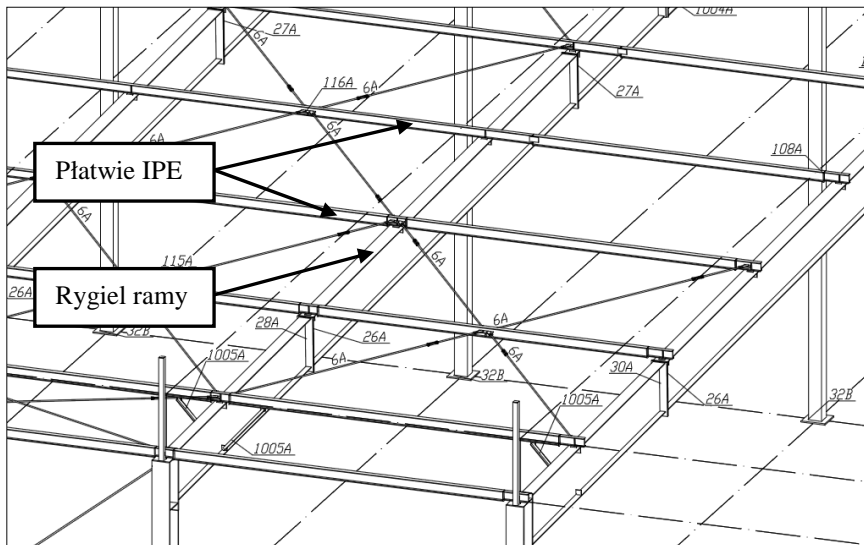
Konstrukcja dachu spoczywająca na ramach to płatwie pełnościenne (dwuteowniki walcowane) lub kratownicowe. Płatwie pełnościenne stosuje się w przypadku niewielkich rozstawów ram (do około 6 m), natomiast płatwie kratownicowe stosuje się, gdy odległości pomiędzy ramami są większe (np. 9 m, 12 m). Do obliczeń przyjęto założenie, iż płatwie mają ciężar wskaźnikowy wynoszący 7 kg w przeliczeniu na m² rzutu dachu, a wartość ta wynika z doświadczenia projektowego. Przykładową konstrukcję ramy wraz z płatwiami kratowymi lub pełnościennymi pokazano na rysunkach 2.2 oraz 2.3. Poszycie dachu to blacha trapezowa (przyjęto ciężar blachy trapezowej równy 12 kg / m² rzutu dachu), na której spoczywa wełna mineralna o grubości 20 cm. Cała przegroda zabezpieczona jest przed wpływami atmosferycznymi membraną wodoodporną PCV lub podwójną warstwą papy termozgrzewalnej.

Poszycie ścian stanowią płyty z rdzeniem poliuretanowym o grubości 8cm. Płyty pracują w układzie poziomym (mocowane bezpośrednio do słupów ram i do słupów pośrednich w przypadkach gdy rozstaw ram jest większy od 6 m) lub w układzie pionowym (mocowane do rygli ściennych, które znajdują się na poziomie tężników ściennych).

Parametry opisane powyżej spotyka się w większości projektowanych i realizowanych obiektów. Różnice jakie można zaobserwować to: ciężar konstrukcji dachu (większy w przypadku płatwi zaprojektowanych nieoptymalnie), nieznacznie większy lub mniejszy ciężar blachy trapezowej (w założeniach przyjęto wartość leżącą po stronie bezpiecznej), różne poszycia dachu, w których jako uzupełnienie wełny mineralnej wykorzystuje się również styropian jako materiał tańszy, różne rodzaje płyt warstwowych, w których jako rdzeń wykorzystuje się tańszy styropian lub wełnę mineralną.



Rys. 2.2 Przykładowa konstrukcja dachu – płatwie kratowe spoczywające na konstrukcji ramy



Rys. 2.3 Przykładowa konstrukcja dachu – płatwie pełnościenne (profile walcowane IPE) spoczywające na konstrukcji ramy

2.2.2. Obciążenia

Celem niniejszego rozdziału jest zestawienie wartości obciążeń odpowiadających poszczególnym elementom konstrukcyjnym oraz elementom poszycia oraz dobranie odpowiednich współczynników bezpieczeństwa. Założono, że rozpiętość hali będzie większa od jej wysokości, powierzchnia ścian będzie większa niż 10 m^2 , wysokość hali nie przekroczy 12 m, długość hali jest większa od jej szerokości, a budynek usytuowany jest w terenie otwartym z nielicznymi przeszkodami.

Zestawienie obciążeń stworzono dla obiektów znajdujących się w pierwszej strefie wiatrowej (Polska) oraz w drugiej i trzeciej strefie śniegowej (Polska). Przyjmując takie założenie dotyczące obciążeń zapewnia się aktualność otrzymanych wyników optymalizacji dla około 80% obszaru Polski.

2.2.2.1. Obciążenia wg Norm Europejskich (Eurokod)

Zgodnie z Europejskimi Normami, obciążenia należy dobrać wg Eurokodu 1 (Oddziaływania na konstrukcje):

- Część 1-1 (PN-EN 1991-1-1) Oddziaływania ogólne. Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach;
- Część 1-3 (PN-EN 1991-1-3) Oddziaływania ogólne. Obciążenie śniegiem;
- Część 1-4 (PN-EN 1991-1-4) Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru.

Kombinacje obciążeń, a także współczynniki bezpieczeństwa należy stworzyć i dobrać w oparciu o reguły zawarte w normie (PN-EN 1990).

Na podstawie wyżej wymienionych norm, przyjmując stany graniczne nośności dotyczące utraty równowagi statycznej konstrukcji lub jakiegokolwiek jej części (EQU) oraz zniszczenia wewnętrznego lub nadmiernego odkształcenia konstrukcji lub elementów konstrukcji (STR), zgodnie z (PN-EN 1990) sporządzono zestawienie obciążeń działających na ramę i pokazano je w Tablicy 2.1.

Tablica 2.1 Zestawienie obciążeń wg Norm Europejskich

Rodzaj obciążenia	Wartość charakterystyczna	Współczynnik bezpieczeństwa	Wartość obliczeniowa
	[kN/m ²]	[-]	[kN/m ²]
Ciężar konstrukcji dachu – płatwie kratowe lub pełnościennie	0,07	1,35	0,095
Ciężar blachy trapezowej	0,10	1,35	0,162
Ciężar wełny mineralnej – gr. 20cm	0,30	1,35	0,405
Ciężar membrany dachowej lub papy termozgrzewalnej 2x	0,10	1,35	0,135
Śnieg (Polska, strefa III, do 300m nad poziomem morza), Śnieg (Polska, strefa II), Współcz. kształtu dachu – 0,8	0,96 0,72	1,50	1,440 1,080
Wiatr (strefa I), D=0,8, E=-0,5 , H=I=-0,6 (5°), Ce(6m)=2, Ce(9m)=2,2, Ce(12m)=2,4	0,50 0,55 0,60	1,50	Zależy od konfiguracji
Instalacje powieszzone do dachu	0,50	1,50	0,750

2.2.2.2. Obciążenia wg Polskich Norm

Zgodnie z Polskimi Normami, obciążenia należy dobrać wg:

- (PN-82/B-02001), Obciążenia budowli. Obciążenia stałe.
- (PN-82/B-02010), Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie śniegiem.
- (PN-82/B-02011), Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem.

Kombinacje obciążeń, a także współczynniki bezpieczeństwa należy przyjąć w oparciu o reguły zawarte w normie (PN-82/B-02000, Obciążenia budowli. Zasady ustalania wartości).

Na podstawie wyżej wymienionych norm sporządzono zestawienie obciążeń działających na ramę i pokazano je w Tablicy 2.2.

Tablica 2.2 Zestawienie obciążeń wg Norm Polskich

Rodzaj obciążenia	Wartość charakterystyczna	Współczynnik bezpieczeństwa	Wartość obliczeniowa
	[kN/m ²]	[-]	[kN/m ²]
Ciężar konstrukcji dachu – płatwie kratowe lub pełnościennie	0,07	1,10	0,077
Ciężar blachy trapezowej	0,10	1,10	0,132
Ciężar wełny mineralnej – gr. 20cm	0,30	1,30	0,390
Ciężar membrany dachowej lub papy termozgrzewalnej 2x	0,10	1,30	0,130
Śnieg (Polska, strefa III, do 300m nad poziomem morza), Śnieg (Polska, strefa II), Współcz. kształtu dachu – 0,8	0,96 0,72	1,50	1,440 1,080
Wiatr (strefa I), D=0,8, E=-0,5 , H=I=-0,6 (5°), Ce(6m)=2, Ce(9m)=2,2, Ce(12m)=2,4	0,50 0,55 0,60	1,50	Zależy od konfiguracji
Instalacje powieszzone do dachu	0,50	1,50	0,750

2.2.3. Schematy statyczne

Płaskie schematy statyczne mogą być z powodzeniem stosowane w przypadku obiektów nieskomplikowanych. Wśród zalet można wymienić: stosunkowo łatwe wyznaczenie sił przekrojowych, nawet bez użycia programów, duża czytelność układu i schematu statycznego całej konstrukcji, możliwość szybkiego wprowadzenia zmian w przekrojach i przeprowadzenia kolejnej iteracji, małe prawdopodobieństwo popełnienia błędu (wprowadzenia błędnego przekroju, przypadkowego zamocowania, błędnego przyłożenia obciążeń).

Przestrzenne schematy statyczne powinny być stosowane w przypadku obiektów niesymetrycznych lub z dodatkowymi czynnikami mogącymi zaburzyć schemat statyczny (jego czytelność, symetrię geometryczną, symetrię obciążeń itp.).

Zaletami takiego podejścia są: możliwość prześledzenia „wędrówki sił” i wyłapania ewentualnego ich spiętrzenia, wyeliminowanie możliwości pominięcia zjawiska powodującego powstawanie dużych sił w elementach, w których nie były one przewidziane, możliwość szybkiego globalnego zaprojektowania konstrukcji (przy użyciu odpowiednio szybkich komputerów i odpowiednio niezawodnych programów).

W niniejszej pracy, do celów wyznaczania sił wewnętrznych, wykorzystywane będą układy płaskie, jako łatwiejsze w modyfikacji i pozwalające pominąć ewentualne zaburzenia spowodowane innymi elementami konstrukcyjnymi. W przyszłych badaniach planowane jest podjęcie tematyki modelowania oraz analizy układów przestrzennych.

2.2.4. Wpływ deformacji na siły wewnętrzne

W teorii I rzędu obowiązuje założenie, iż deformacje układu są niewielkie, a ich wpływ pomijalnie mały na siły przekrojowe (rozkład i wielkość). Obowiązuje zasada zeszywnienia.

Teoria I rzędu znajduje zastosowanie przy rozwiązywaniu układów ramowych niepodatnych na efekty II rzędu tj. ram parterowych. Norma Eurokod-3 oraz niemiecka, dopuszcza stosowanie teorii I rzędu, gdy przyrost sił przekrojowych wyznaczonych według teorii II rzędu jest mniejszy niż 10%. Również polska norma (PN-90/B-03200) dopuszcza obliczanie sił wewnętrznych wg teorii I rzędu w przypadku ram jednokondygnacyjnych.

W teorii II rzędu obowiązują te same równania odkształceń (dla małych ugięć), oraz zależności między odkształceniami a siłami wewnętrznymi jak w teorii I rzędu, natomiast równania równowagi należy zestawiać dla elementu odkształconego (co wymaga obliczeń iteracyjnych).

W niniejszej pracy wyznaczanie sił wewnętrznych będzie przeprowadzane z zastosowaniem teorii I rzędu, co daje odpowiednio dokładne wartości tych sił, a jednocześnie pozwoli skrócić czas potrzebny na obliczenia.

2.2.5. Węzły ram

Połączenia sztywne, powinny być konstruowane w taki sposób, aby ich zachowanie nie wpływało na rozkład sił wewnętrznych w układzie, ani na przemieszczenia układu. Nośność obliczeniowa połączenia sztywnego powinna być większa niż nośność przekrojów elementów dochodzących, a w komentarzu Pałkowski (1999) do PN-90/B-03200 oraz w Eurokodzie-3 umieszczono zalecenia, aby nośność ta była większa o 20% od nośności plastycznej łączonych elementów (w takim przypadku nie jest konieczne sprawdzanie połączenia w kwestii dostatecznej zdolności do obrotu). Wówczas ewentualny przegub plastyczny powstanie poza węzłem.

Połączenia zapewniające możliwość obrotu pręta w węźle (przegubowe) nie powinny przenosić znacznych momentów, które mogłyby niekorzystnie wpłynąć na układ lub elementy konstrukcji. Wskazane jest, aby węzły takie przenosiły możliwie jak najmniejsze momenty, co prowadzi do zachowania czytelności schematu statycznego i pracy układu w sposób przewidziany. Według komentarza Pałkowski (1999) do PN-90/B-03200 oraz Eurokodu-3 nośność połączenia przegubowego powinna być mniejsza od 25% nośności plastycznej elementu dochodzącego.

Połączenia podatne to takie, które nie spełniają założeń dla połączeń sztywnych lub przegubowych. Ich nośność powinna być nie mniejsza niż siły działające na węzeł, ale może być mniejsza niż nośność elementów dochodzących.

Przyjęto, iż wszystkie węzły będą obliczane jako sztywne lub przegubowe, co wiąże się z przyjęciem odpowiedniej konstrukcji węzłów.

2.2.6. Sytuacje (metody) projektowania

Na podstawie literatury (Biegus (1997), DIN 18800, PN-EN 1991-1-3) wyróżniono trzy możliwe sytuacje metody projektowania ram:

- Sprężysto – sprężysta
- Sprężysto – plastyczna
- Plastyczno – plastyczna

W przypadku analizy sprężysto – sprężystej, wyznaczenie sił przekrojowych, reakcji i przemieszczeń, przeprowadza się na podstawie analizy liniowo – sprężystej. Sprawdzenie nośności elementów przeprowadza się w sprężystym zakresie wyężenia materiału.

W analizie sprężysto – plastycznej wyznaczenie sił przekrojowych, reakcji i przemieszczeń, przeprowadza się również na podstawie analizy liniowo – sprężystej wyężenia ustroju. Sprawdzenie nośności elementów przeprowadza się z uwzględnieniem plastycznego wyężenia materiału.

W metodzie plastyczno – plastycznej dopuszcza się powstanie tzw. przegubów czynnych oraz redystrybucję sił wewnętrznych w konstrukcji, przy czym przekroje muszą być odpowiednio krępe, a materiał sprężysto-plastyczny. Nośność elementów sprawdza się również z uwzględnieniem plastycznego wyężenia materiału. Obliczanie i projektowanie konstrukcji z uwzględnieniem plastycznej rezerwy nośności dopuszczają normy: Eurokod-3, polska, brytyjska i niemiecka.

W praktyce inżynierskiej zazwyczaj unika się wyznaczania sił wewnętrznych przy założeniu uplastycznienia przekrojów i redystrybucji sił wewnętrznych z uwagi na fakt, iż zagadnienie przemieszczeń konstrukcji staje się zagadnieniem skomplikowanym, a spełnienie warunków normowych dotyczących przemieszczeń jest niepewne. Rzadkością jest również wykorzystywanie plastycznej nośności przekrojów spawanych z blach, co w przypadku przekrojów blachownicowych o smukłych ściankach praktycznie nie powoduje wzrostu nośności przekroju. W związku z powyższym w niniejszej pracy przyjęto metodę sprężysto-sprężystą.

2.2.7. Stateczność ogólna

Stateczność ram parterowych zgodnie z (PN-EN 1993-1-1) można sprawdzać:

- Wyłącznie za pomocą analizy globalnej
- Częściowo za pomocą analizy globalnej i częściowo poprzez indywidualne sprawdzenia stateczności elementów
- Wyłącznie poprzez indywidualne sprawdzenia stateczności elementów, przyjmując odpowiednie długości wyboczeniowe, ustalone dla globalnej formy utraty stateczności

W przypadku analizy globalnej, analizuje się konstrukcję złożoną z prętów rzeczywistych (z wprowadzonymi imperfekcjami). W związku z tym faktem zakłada się, że pręt i układ prętów już w stanie nieobciążonym posiadają imperfekcje wynikające z: odchyłek od założonego kształtu geometrycznego, niejednorodności materiału, niezerowego, początkowego stanu naprężeń, niedokładności punktu przyłożenia siły; które są zsumowane i przedstawione w postaci krzywizn początkowych o zadanych amplitudach. Dla tak przygotowanej geometrii konstrukcji przeprowadza się analizę statyczną z uwzględnieniem wpływu tych przemieszczeń na siły wewnętrzne, przeprowadza się także analizę nośności granicznej konstrukcji z imperfekcjami.

W przypadku częściowej analizy globalnej, przeprowadza się analizę statyczną z uwzględnieniem wpływu przemieszczeń na siły wewnętrzne, natomiast analizę stateczności elementów składowych przeprowadza się jak dla prętów idealnych poszukując punktu bifurkacji ścieżki równowagi statycznej opisywanego pręta (siły krytycznej i postaci wyboczenia).

Analizę statyczną wg teorii I rzędu, przeprowadza się dla konstrukcji złożonej z prętów idealnych. W takim przypadku poszukiwane są punkty bifurkacji ścieżki równowagi statycznej układów konstrukcyjnych (w tym przypadku ram) i na podstawie tej analizy otrzymuje się siły krytyczne układów, a co za tym idzie, długości wyboczeniowe poszczególnych elementów ramy.

Zgodnie z (PN-90/B-03200) stateczność poszczególnych elementów konstrukcji sprawdza się w oparciu o krzywe wyboczeniowe. Współczynniki wyboczeniowe oblicza się w zależności od parametrów imperfekcji i odpowiadających im krzywych wyboczeniowych, a także w zależności od współczynnika długości wyboczeniowej. Współczynnik długości wyboczeniowej słupów oblicza się na podstawie stopnia podatności węzłów (górnego i dolnego).

W niniejszej pracy przyjęto, iż zarówno w przypadku obliczeń stateczności przeprowadzanych wg (PN-EN 1993-1-1), jak i obliczeń przeprowadzanych wg (PN-90/B-03200), wyznaczane będą współczynniki długości wyboczeniowej, a na ich podstawie siły krytyczne układów.

Obliczenia współczynników wyboczeniowych ram, w których słupy i rygle składają się z kilku elementów o różnej geometrii (i sztywności), przeprowadzono Bezpośrednią Metodą Przemieszczeń (BMP) (Branicki (1999)), stosując element belkowy wg teorii II rzędu (uwzględnienie wpływu siły normalnej na sztywność giętą). Dla każdej ramy w pierwszym kroku obliczano siły wewnętrzne i definiowano elementy ściskane, następnie wykorzystując wzory transformacyjne tworzą macierz sztywności konstrukcji w zależności od sił osiowych. Przyrównanie wyznacznika tak stworzonej macierzy sztywności do 0, pozwala wyznaczyć siły krytyczne układu i współczynniki wyboczeniowe jego poszczególnych prętów.

2.3. Projektowanie elementów składowych zgodnie z EC-3

2.3.1. Klasyfikacja przekrojów

Zarówno w przypadku projektowania wg EC-3 jak i wg PN-90/B-03200 przyjęto klasyfikację przekrojów mającą na celu określenie stopnia odporności elementu na zjawiska miejscowej utraty stateczności w stanach sprężystym i plastycznym. Obie normy definiują poszczególne klasy identycznie, lecz różnią się jeśli chodzi o smukłości graniczne ścianek dla poszczególnych klas przekrojów.

Przekroje klasy 1 (plastycznie sztywne) mogą osiągnąć nośność uogólnionego przegubu plastycznego (przegubu czynnego), przy czym w stanie pełnego uplastycznienia wykazują zdolność do obrotu umożliwiającą pełną redystrybucję momentów w ustroju konstrukcyjnym. W przypadku pełnego uplastycznienia, naprężenia w całym przekroju osiągają granicę plastyczności, a przekrój zachowuje niezmienną kształtu.

Przekroje klasy 2 (plastycznie półsztywne) mogą osiągnąć nośność uogólnionego przegubu plastycznego, lecz wskutek miejscowej niestateczności ścianek w stanie plastycznym, wykazują ograniczoną zdolność do obrotu, uniemożliwiając tym samym redystrybucję momentów w ustroju konstrukcyjnym.

Przekroje klasy 3 (sprężyste sztywne), charakteryzują się tym, że ich nośność jest ograniczona początkiem uplastycznienia strefy ściskanej. Mogą natomiast wystąpić naprężenia plastyczne w strefie rozciąganej.

Przekroje klasy 4 (cienkościenne), charakteryzują się tym, że ich nośność wyczerpuje się wcześniej od wystąpienia w przekroju naprężeń równych wytrzymałości stali. Przekroje te są wrażliwe na miejscową utratę stateczności już w stanie sprężystym. Nośność przekroju determinuje wielkość naprężeń krytycznych (stan krytyczny) lub początek uplastycznienia ściskanych elementów przekroju, podtrzymujących wybocone lokalnie ścianki (stan nadkrytyczny).

Jak zauważono w trakcie dłużej praktyki inżynierskiej, zdecydowana większość optymalnych przekrojów blachownicowych (spawanych z blach) przyjmowanych na belki lub słupy ram, to przekroje klasy trzeciej i czwartej. W związku z powyższym, a także w związku z założeniem przyjętym w rozdziale 2.2.6., w procedurach optymalnego projektowania elementów (zawartych w stworzonym oprogramowaniu), nie będą brane pod uwagę dodatkowe zalety przekrojów klas pierwszej i drugiej (rezerwa plastyczna nośności przekroju).

2.3.2. Stateczność lokalna

W Eurokodzie-3 wprowadzono pojęcie przekroju efektywnego i w odróżnieniu od PN-90/B-03200 zrezygnowano ze współczynników niestateczności lokalnej ścianek (rozdział 2.4.2.) przy ich ścinaniu bądź ściskaniu, na rzecz efektywnych cech przekroju (A_{eff} - efektywne pole przekroju przy ściskaniu, W_{eff} - efektywny wskaźnik wytrzymałości przekroju przy zginaniu).

Dodatkowym zjawiskiem, jakie należy uwzględnić jest tzw. efekt szerokiego pasa (nierównomierność dystrybucji naprężeń normalnych w pasie, która zależy od szerokości pasa przekroju dwuteowego, rozpiętości elementu, jego lokalizacji w konstrukcji oraz rozkładu sił wewnętrznych w elemencie), który należy brać pod uwagę wyznaczając efektywne cechy przekroju.

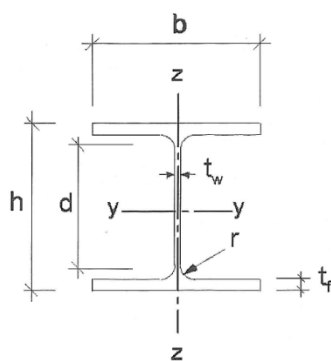
Należy pamiętać, że dla przekrojów klasy 4, w przypadku pasów elementów dwuteowych stosunek naprężeń w dolnym pasie do naprężeń w pasie górnym oblicza się na podstawie cech przekroju brutto (ewentualnie z uwzględnieniem efektu szerokiego pasa), natomiast wyznaczając stosunek naprężeń w środku, przyjmuje się pole przekroju środka brutto i efektywne pole przekroju pasa ściskanego.

2.3.3. Normowe warunki nośności

Warunki nośności podzielono na nośności przekrojów, uwzględniające niestateczność lokalną ścianek (półek i środka) oraz na nośności prętów, uwzględniające niestateczność globalną (zwichrzenie, wyboczenie).

2.3.3.1. Nośność przekrojów

Na rysunku 2.4 przedstawiono parametry geometryczne i układ osi przyjęty w (PN-EN 1993-1-1).



Rysunek 2.4 Wymiary i osie dwuteownika zgodnie z (PN-EN 1993-1-1)

Przekrój spełniający poniższe warunki nośności, można uważać za zaprojektowany zgodnie z Eurokodem-3:

- nośność przy ścinaniu, normowy warunek (6.17, PN-EN 1993-1-1):

$$V_{Ed} / V_{b,Rd} \leq 1 \quad (2.1)$$

gdzie: V_{Ed} – obliczeniowa siła poprzeczna, $V_{b,Rd}$ – obliczeniowa nośność przekroju przy ścinaniu z uwzględnieniem niestateczności lokalnej środnika przy ścinaniu,

- nośność przy zginaniu z uwzględnieniem ścinania, normowy warunek (6.12, PN-EN 1993-1-1):

$$M_{Ed} / M_{c,Rd} \leq 1 \quad (2.2)$$

gdzie: M_{Ed} – obliczeniowy moment zginający, $M_{c,Rd}$ – obliczeniowa nośność przekroju przy zginaniu z ewentualnym uwzględnieniem efektu szerokiego pasa i niestateczności ścianek ściskanych oraz z uwzględnieniem ścinania (zredukowana nośność obliczeniowa przekroju, ustalona przy założeniu, że w polu czynnym przy ścinaniu występuje zredukowana granica plastyczności),

- nośność przy rozciąganiu, normowy warunek (6.5, PN-EN 1993-1-1):

$$N_{Ed} / N_{t,Rd} \leq 1 \quad (2.3)$$

gdzie: N_{Ed} – obliczeniowa siła normalna (rozciągająca), $N_{t,Rd}$ – obliczeniowa nośność przekroju przy rozciąganiu z uwzględnieniem efektu szerokiego pasa (o ile zachodzi),

- nośność przy ściskaniu, normowy warunek (6.9, PN-EN 1993-1-1):

$$N_{Ed} / N_{c,Rd} \leq 1 \quad (2.4)$$

gdzie: N_{Ed} – obliczeniowa siła normalna (ściskająca), $N_{c,Rd}$ – obliczeniowa nośność przekroju przy ściskaniu z uwzględnieniem efektu szerokiego pasa

(o ile zachodzi) oraz niestateczności lokalnej ścianek (półek lub średnika o smukłości jak dla klasy 4),

- nośność przy zginaniu z siłą podłużną (rozciągającą), normowy warunek (6.44, PN-EN 1993-1-1):

$$(N_{Ed}/N_{t,Rd}) + ((M_{Ed} + dM_{Ed})/M_{c,Rd}) \leq 1 \quad (2.5)$$

gdzie: N_{Ed} , $N_{t,Rd}$, zgodnie ze wzorem (2.3), M_{Ed} , $M_{c,Rd}$, zgodnie ze wzorem (2.2), dM_{Ed} – dodatkowy moment zginający wynikający z przesunięcia względem odpowiedniej osi, środka ciężkości przekroju współpracującego przy równomiernym ściskaniu

- nośność przy zginaniu z siłą podłużną (ściskającą), normowy warunek (6.44, PN-EN 1993-1-1):

$$(N_{Ed}/N_{c,Rd}) + ((M_{Ed} + dM_{Ed})/M_{c,Rd}) \leq 1 \quad (2.6)$$

gdzie: N_{Ed} , $N_{c,Rd}$, zgodnie ze wzorem (2.4), M_{Ed} , $M_{c,Rd}$, zgodnie ze wzorem (2.2), dM_{Ed} – dodatkowy moment zginający wynikający z przesunięcia względem odpowiedniej osi, środka ciężkości przekroju współpracującego przy równomiernym ściskaniu,

- stateczność pasa przy smukłym średniku, normowy warunek (8.1, PN-EN 1993-1-5) powinien być spełniony, aby zapobiec wyboczeniu pasa ściskanego w płaszczyźnie średnika.

$$h_w/t_w \leq k \cdot (E/f_y) \cdot \sqrt{A_w/A_{fc}} \quad (2.7)$$

gdzie: h_w , t_w – wysokość, grubość średnika, A_w – pole przekroju średnika, A_{fc} – efektywne pole przekroju pasa, k – parametr, f_y , E – granica plastyczności, moduł Younga dla stali.

Warunki (2.2), (2.5), (2.6), należy sprawdzić oddzielnie dla przekrojów na obu końcach pręta tylko w przypadku, gdy wartości obliczeniowych momentów zginających na obu końcach się różnią.

2.3.3.2. Nośność prętów

W przypadku projektowania prętów (elementów wydzielonych z układu), należy sprawdzić poniższe warunki nośności określone w Eurokodzie-3:

- nośność wydzielonego elementu ściskanego (z uwzględnieniem niestateczności globalnej – wyboczenia giętnego lub skrętnego), normowy warunek (6.46, PN-EN 1993-1-1):

$$N_{Ed} / (\min(\chi_y, \chi_z) \cdot N_{c,Rd}) \leq 1 \quad (2.8)$$

gdzie: N_{Ed} , $N_{c,Rd}$, zgodnie ze wzorem (2.4), χ_y – współczynnik wyboczenia względem osi większego momentu bezwładności, χ_z – współczynnik wyboczenia względem osi mniejszego momentu bezwładności,

- nośność przy zginaniu względem osi większego momentu bezwładności ($y - y$) ze względu na zwichrzenie, normowy warunek (6.54, PN-EN 1993-1-1):

$$M_{Ed} / (\chi_{LT} \cdot M_{c,Rd}) \leq 1 \quad (2.9)$$

gdzie: M_{Ed} , $M_{c,Rd}$, zgodnie ze wzorem (2.2), χ_{LT} – współczynnik zwichrzenia,

- nośność elementu ściskanego i zginanego z uwzględnieniem wyboczenia (względem osi większego momentu bezwładności ($y - y$)) i zwichrzenia, normowy warunek (6.61, PN-EN 1993-1-1):

$$N_{Ed} / (\chi_y \cdot N_{c,Rd}) + k_{yy} \cdot (M_{Ed} + dM_{Ed}) / (\chi_{LT} \cdot M_{c,Rd}) \leq 1 \quad (2.10)$$

gdzie: N_{Ed} , $N_{c,Rd}$, zgodnie ze wzorem (2.4), χ_y , zgodnie ze wzorem (2.8), M_{Ed} , $M_{c,Rd}$, zgodnie ze wzorem (2.2), χ_{LT} , zgodnie ze wzorem (2.9), dM_{Ed} , zgodnie ze wzorem (2.6), k_{yy} oznacza współczynnik interakcji,

- nośność elementu ściskanego i zginanego z uwzględnieniem wyboczenia (względem osi mniejszego momentu bezwładności ($z - z$)) i zwichrzenia, normowy warunek (6.62, PN-EN 1993-1-1):

$$N_{Ed} / (\chi_z \cdot N_{c,Rd}) + k_{zy} \cdot (M_{Ed} + dM_{Ed}) / (\chi_{LT} \cdot M_{c,Rd}) \leq 1 \quad (2.11)$$

gdzie: N_{Ed} , $N_{c,Rd}$, zgodnie ze wzorem (2.4), χ_z , zgodnie ze wzorem (2.8), M_{Ed} , $M_{c,Rd}$, zgodnie ze wzorem (2.2), χ_{LT} , zgodnie ze wzorem (2.9), dM_{Ed} , zgodnie ze wzorem (2.6), k_{zy} jest współczynnikiem interakcji.

Współczynniki interakcji wyznaczono na podstawie wzorów zawartych w załączniku B normy (PN-EN 1993-1-1).

2.3.4. Normowe warunki użytkowalności

Każda konstrukcja oprócz warunków nośności, musi spełniać jednocześnie warunki użytkowalności narzucone przez odpowiednie normy. Zgodnie z (PN-EN 1993-1-1) konstrukcja stalowa ramy powinna spełniać warunki:

- maksymalnych przemieszczeń poziomych:

$$\delta_H \leq H / 150 \quad (2.12)$$

gdzie: δ_H – przemieszczenie poziome konstrukcji pod wpływem obciążeń charakterystycznych, a H – wysokość ramy w okapie

- maksymalnych przemieszczeń (ugięć) pionowych:

$$\delta_V \leq L_R / 250 \quad (2.13)$$

gdzie: δ_V – przemieszczenie pionowe konstrukcji pod wpływem obciążeń charakterystycznych i L_R – rozpiętość rygla ramy.

2.4. Projektowanie elementów składowych zgodnie z PN

2.4.1. Klasyfikacja przekrojów

Zgodnie z zapisami w rozdziale 2.3.1. wyodrębnia się cztery klasy przekrojów, których opis zawarto w rozdziale 2.3.1.

2.4.2. Stateczność lokalna

Zgodnie z (PN-90/B-03200) przekrój poddany oddziaływaniu naprężeń normalnych można projektować w:

- stanie krytycznym, wówczas nośność przekroju jest determinowana utratą stateczności jednej ze ścianek (ścianki o największej smukłości),
- stanie nadkrytycznym ograniczonym, wówczas dopuszcza się pracę ścianek nawet po utracie stateczności, lecz nośność przekroju jest determinowana nośnością krytyczną ścianki podpierającej ściankę pracującą w stanie nadkrytycznym,
- stanie nadkrytycznym, wówczas dopuszcza się pracę wszystkich ścianek w stanie nadkrytycznym.

Projektowanie w stanie nadkrytycznym dopuszczalne jest w przypadku, gdy elementy konstrukcji są obciążona statycznie.

Nośność w stanie krytycznym i w stanie nadkrytycznym, określa się tylko dla przekroju klasy 4, a więc wrażliwego na miejscową utratę stateczności. Pozostałe przekroje klas: 1, 2 i 3, nie są wrażliwe na lokalną utratę stateczności.

Nośność przekroju w stanie krytycznym oblicza się dla stanu, w którym występują naprężenia powodujące utratę stateczności dowolnego elementu płytowego będącego składową przekroju. Innymi słowy, zakłada się, że nośność przekroju jest wyczerpana z chwilą, w której jedna (lub więcej) ze ścianek elementu utraci stateczność.

Nośność przekroju w stanie nadkrytycznym oblicza się uwzględniając znany doświadczalny efekt wzrostu obciążenia krytycznego płyty w obszarze pokrytycznym (pobifurkacyjne wzmocnienie płyty). Uwzględnienie tego efektu w obliczeniach przyczynia się do bardziej ekonomicznego projektowania konstrukcji stalowych. Według Pałkowski (1999), przyrost nośności normowej na zginanie może wynieść nawet 65%.

Oprócz utraty stateczności od naprężeń normalnych, części przekroju mogą ulec lokalnemu wyboczeniu w wyniku działania naprężeń stycznych. Zjawisko to zostanie uwzględnione w obliczeniach poprzez współczynnik redukujący nośność przekroju z uwagi na utratę stateczności jego ścianek składowych.

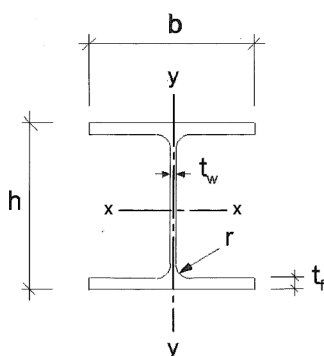
W odpowiednich przypadkach (przekroje klasy czwartej), będzie prowadzona analiza z wykorzystaniem nośności nadkrytycznej przekrojów.

2.4.3. Normowe warunki nośności

Podobnie jak w przypadku obliczeń zgodnie z EC, warunki nośności podzielono na nośności przekrojów, uwzględniające niestateczność lokalną ścianek (półek i środniczka) przy ściskaniu / zginaniu i / lub ścinaniu, oraz na nośności prętów, uwzględniające niestateczność globalną (zwichrzenie, wyboczenie).

2.4.3.1. Nośność przekrojów

Na rysunku 2.5 przedstawiono parametry geometryczne i układ osi przyjęty w (PN-90/B-03200). W porównaniu do EC zmianie ulega nazewnictwo osi.



Rysunek 2.5 Wymiary i osie dwuteownika zgodnie z (PN-90/B-03200)

Przekrój spełniający poniższe warunki nośności, można uważać za zaprojektowany zgodnie z polskimi normami (PN):

- nośność przy ścinaniu, normowy warunek (47, PN-90/B-03200):

$$V / V_R \leq 1 \quad (2.14)$$

gdzie: V – obliczeniowa siła poprzeczna, V_R – obliczeniowa nośność przekroju przy ścinaniu z uwzględnieniem niestateczności lokalnej środnika przy ścinaniu,

- nośność przy zginaniu z uwzględnieniem ścinania, normowy warunek (45, 46, PN-90/B-03200):

$$M / M_{R,V} \leq 1 \quad (2.15)$$

gdzie: M – obliczeniowy moment zginający, $M_{R,V}$ – obliczeniowa nośność przekroju przy zginaniu z ewentualnym uwzględnieniem niestateczności ścianek ściskanych oraz z uwzględnieniem ścinania (zredukowana nośność obliczeniowa przekroju, ustalona przy założeniu, że w polu czynnym przy ścinaniu występuje zredukowana granica plastyczności),

- nośność przy rozciąganiu, normowy warunek (31, PN-90/B-03200):

$$N / N_{Rt} \leq 1 \quad (2.16)$$

gdzie: N – obliczeniowa siła normalna (rozciągająca), N_{Rt} – obliczeniowa nośność przekroju przy rozciąganiu,

- nośność przy ściskaniu, normowy warunek (33, PN-90/B-03200):

$$N / N_{Rc} \leq 1 \quad (2.17)$$

gdzie: N – obliczeniowa siła normalna (ściskająca), N_{Rc} – obliczeniowa nośność przekroju przy ściskaniu z uwzględnieniem niestateczności lokalnej ścianek (pótek lub środnika o smukłości jak dla klasy 4).

W przedstawionej liście warunków, pominięto warunek normowy dotyczący środka w złożonym stanie naprężeń. Warunek ten obejmuje dodatkowo siły skupione obciążające środek; które w ramach z racji wprowadzenia reakcji przez żebra nie występują.

2.4.3.2. Nośność prętów

W przypadku projektowania prętów (elementów wydzielonych z układu), należy sprawdzić poniższe warunki nośności określone w [PN-90/B-03200]:

- nośność wydzielonego elementu ściskanego (z uwzględnieniem niestateczności globalnej – wyboczenia giętnego lub skrętnego), normowy warunek (39, PN-90/B-03200):

$$N / (\min(\varphi_x, \varphi_y) \cdot N_{Rc}) \leq 1 \quad (2.18)$$

gdzie: N , N_{Rc} , zgodnie ze wzorem (2.17), φ_x – współczynnik wyboczenia względem osi większego momentu bezwładności, φ_y – współczynnik wyboczenia względem osi mniejszego momentu bezwładności,

- nośność przy zginaniu względem osi większego momentu bezwładności ($x - x$) ze względu na zwichrzenie, a także z uwzględnieniem siły normalnej normowy warunek (54, PN-90/B-03200):

$$N / N_{Rc} + M / (\varphi_L \cdot M_R) \leq 1 \quad (2.19)$$

gdzie: M , zgodnie ze wzorem (2.15), M_R – nośność obliczeniowa przekroju przy zginaniu z ewentualnym uwzględnieniem niestateczności ścianek ściskanych, φ_L – współczynnik zwichrzenia,

- nośność elementu ściskanego i zginanego z uwzględnieniem wyboczenia (względem osi większego momentu bezwładności ($x - x$)) i zwichrzenia, normowy warunek (58, PN-90/B-03200):

$$N / (\varphi_x \cdot N_{Rc}) + \beta \cdot (M) / (\varphi_L \cdot M_R) \leq 1 - \Delta_i \quad (2.20)$$

gdzie: N , N_{Rc} , zgodnie ze wzorem (2.17), φ_x , zgodnie ze wzorem (2.18), M , M_R , φ_L , zgodnie ze wzorem (2.19), β – współczynnik interakcji, Δ_i – składnik poprawkowy (według wzoru empirycznego, uwzględniający efekty II rzędu),

- nośność elementu ściskanego i zginanego z uwzględnieniem wybożenia (względem osi mniejszego momentu bezwładności ($y - y$)) i zwichrzenia, normowy warunek (58, PN-90/B-03200):

$$N / (\varphi_y \cdot N_{Rc}) + \beta \cdot (M) / (\varphi_L \cdot M_R) \leq 1 - \Delta_i \quad (2.21)$$

gdzie: N , N_{Rc} , zgodnie ze wzorem (2.17), φ_y , zgodnie ze wzorem (2.18), M , M_R , φ_L , zgodnie ze wzorem (2.19), β – współczynnik interakcji, Δ_i – składnik poprawkowy (według wzoru empirycznego, uwzględniający efekty II rzędu).

Element, który spełnia warunki nośności przekrojów, oraz warunki nośności prętów, jest zaprojektowany zgodnie z normą i może być zastosowany w rzeczywistej konstrukcji.

2.4.4. Normowe warunki użyteczności

Zgodnie z (PN-90/B-03200) konstrukcja stalowa ramy powinna spełniać warunki zapisane w rozdziale 2.3.4. wzory (2.12), (2.13) Wartości dopuszczalnych przemieszczeń pionowych i poziomych są identyczne jak w przypadku (PN-EN 1993-1-1).

2.5. Analiza porównawcza metod projektowania wg PN-90/B-03200 oraz EC-3

Na potrzeby niniejszej pracy stworzono procedury do wymiarowania przekrojów i elementów zgodnie z (PN-EN 1993-1-1), lub zgodnie z (PN-90/B-03200).

W przypadku procedur wymiarowania zgodnych z (PN-EN 1993-1-1), procedury z powodu stosunkowo „świeżej” normy do wymiarowania, sprawdzono i zweryfikowano w oparciu o dostępną literaturę i artykuły. W przypadku literatury bazowano na pozycji Bródka, Broniewicz (2001). Dodatkowo wspierano się artykułami zamieszczanymi w literaturze fachowej: Kozłowski et al. (2008), Giżejowski et al. (2008a), Giżejowski et al. (2008b).

W przypadku procedur wymiarowania zgodnych z (PN-90/B-03200), jako sprawdzenie służyły programy komercyjne dostępne na rynku i sprawdzone przez wiele biur konstrukcyjnych w Polsce.

Szczegółowa analiza norm PN-90/B-03200 i Eurokodu-3, prowadzi do wniosku, iż zasada obliczania nośności przekrojów i prętów jest podobna w obu normach. Nie mniej jednak zauważono pewne rozbieżności, które wpłyną na końcowy wynik optymalizacji rozważanych konstrukcji. W tabelicy 2.3 przedstawiono szczegółowe porównanie założeń i procedur, które obrazuje różnice pomiędzy omawianymi normami do projektowania.

Tabela 2.3 Różnice proceduralne w rozpatrywanych normach

Wg PN-90/B-03200	Wg Eurokodu-3
1. Wytwarzanie i montaż są zgodne z PN-B-06200:1997	1. Wytwarzanie i montaż są zgodne z EN 1090 oraz spełnione są warunki EN 1990
2. f_d – wytrzymałość obliczeniowa stali. Tej wartość używa się do określania nośności przekrojów ($f_d < f_y$)	2. f_y – nominalna wartość granicy plastyczności. Tę wartość używa się do określania nośności przekrojów ($f_y > f_d$)
3. Nie występuje tzw. efekt szerokiego pasa	3. Należy uwzględnić tzw. efekt szerokiego pasa, poprzez zastosowanie tzw. szerokości współpracującej
4. Oznaczenia osi to $x-x$ względem większego momentu bezwładności i $y-y$ względem mniejszego, z to oś pręta	4. Oznaczenia osi to $y-y$ względem większego momentu bezwładności i $z-z$ względem mniejszego, x to oś pręta
5. Wytrzymałość stali $[f_d]$ jest stopniowana dla trzech zakresów grubości blach – do 16mm, do 40mm i powyżej 40mm	5. Wytrzymałość stali $[f_y]$ jest stopniowana dla dwóch grubości blach – do 40mm i powyżej 40mm
6. Maksymalna grubość stosowanych blach to 100mm	6. Maksymalna grubość stosowanych blach to 80mm
7. $E=205$ GPa, $G=80$ GPa	7. $E=210$ GPa, $G=81$ GPa
8. Przy sprawdzaniu klas przekrojów b – szerokość, t – grubość ścianki	8. Przy sprawdzaniu klas przekrojów c – szerokość, t – grubość ścianki

<p>9. $\varepsilon^2 = 215/f_d$</p> <p>10. Klasy przekrojów zdefiniowane identycznie</p> <p>11. Graniczne smukłości klas średnika ściskanego to 33ε, 39ε, 42ε</p> <p>12. Graniczne smukłości klas średnika zginanego (w dwuteownikach bisy metrycznych) to 66ε, 78ε, 105ε</p> <p>13. Graniczne smukłości dla ściskania i zginania średnika niższe niż wg normy europejskiej, a wzory prostsze</p> <p>14. W przypadku sprawdzania smukłości w elementach spawanych (blachownice), grubość spoiny nie wpływa na zmniejszenie smukłości</p> <p>15. Naprężenia oznaczone „-” to ściskanie</p> <p>16. Naprężenia w pasie to naprężenia na krawędzi przekroju</p> <p>17. Smukłość przy której nie wstępuje niestateczność lokalna ścianek wynosi $\lambda p_- = 0,75$ (dla średników i dla półek)</p> <p>18. Szerokości efektywne (przy całkowitym ściskaniu) dla średnika większe (do 10%) a dla półek większe (do 2%) niż wg normy europejskiej (EC)</p> <p>19. Szerokości efektywne (przy czystym zginaniu) dla średnika są mniejsze (do 20%) niż wg EC.</p> <p>20. Charakterystykę przekroju efektywnego liczymy dla przekroju brutto obciążonego momentem (bez uwzględnienia zjawiska szerokiego pasa)</p>	<p>9. $\varepsilon^2 = 235/f_{dy}$</p> <p>10. Klasy przekrojów zdefiniowane identycznie</p> <p>11. Graniczne smukłości klas średnika ściskanego to 33ε, 38ε, 42ε</p> <p>12. Graniczne smukłości klas średnika zginanego (w dwuteownikach bisy metrycznych) to 72ε, 83ε, 124ε</p> <p>13. Graniczne smukłości dla ściskania i zginania średnika wyższe niż wg normy polskiej, a wzory bardziej złożone</p> <p>14. W przypadku sprawdzania smukłości w elementach spawanych (blachownice), grubość spoiny wpływa na zmniejszenie smukłości</p> <p>15. Naprężenia oznaczone „+” to ściskanie</p> <p>16. Naprężenia w pasie to naprężenia w płaszczyźnie środkowej pasa</p> <p>17. Smukłość przy której nie wstępuje niestateczność lokalna ścianek wynosi $\lambda p_- = 0,673$ dla średników i $\lambda p_- = 0,748$ dla półek</p> <p>18. Szerokości efektywne (przy całkowitym ściskaniu) dla średnika mniejsze (do 10%) a dla półek mniejsze (do 2%) niż wg normy polskiej (PN)</p> <p>19. Szerokości efektywne (przy czystym zginaniu) dla średnika są większe (do 20%) niż wg PN.</p> <p>20. Charakterystykę efektywną dla pasów liczymy dla przekroju brutto jak dla czystego ściskania (z uwzględnieniem zjawiska szerokiego pasa), a dla średnika dla przekrojów efektywnych pasów</p>
---	---

<p>21. Smukłość porównawcza to 84ε</p> <p>22. Przy obliczaniu nośności na ścinanie, żebra mogą ograniczać panel jeżeli mają odpowiednią sztywność (nie przewiduje się żeber podatnych)</p> <p>23. Nie występuje warunek wyboczenia pasa w płaszczyźnie smukłego środka</p> <p>24. Do nośności środka na ścinanie nie wlicza się nośności niewyłożonych pasów</p> <p>25. W przypadku smukłych ścianek przekroju, dostępne są stany: nośności nadkrytycznej i nadkrytycznej ograniczonej</p> <p>26. Ograniczenie smukłości środka wynika z dopuszczanych smukłości z uwagi na zakresy krzywych niestateczności</p> <p>27. Współczynniki wyboczeniowe oblicza się na podstawie smukłości względnej i krzywych wyboczeniowych (występują różnice pomiędzy PN i EC we wzorach na krzywe niestateczności)</p> <p>28. Występują różnice pomiędzy PN, a EC, w podejściu dotyczącym obliczeń nośności elementu poddanego ścisaniu i zginaniu</p>	<p>jak dla czystego zginania. Niektóre źródła mówią tylko o przekroju efektywnym pasa ściskanego.</p> <p>21. Smukłość porównawcza to 93,9ε</p> <p>22. Przy obliczaniu nośności na ścinanie istotny jest rodzaj żeber (sztywne podatne), które ograniczają wymiary panelu</p> <p>23. Występuje warunek wyboczenia pasa w płaszczyźnie smukłego środka</p> <p>24. Do nośności środka na ścinanie można wliczać nośność niewyłożonych pasów</p> <p>25. W przypadku smukłych ścianek przekroju, dostępny jest tylko stan nadkrytyczny</p> <p>26. Ograniczenie smukłości środka wynika z warunku nośności (niestateczności) smukłego środka</p> <p>27. Współczynniki wyboczeniowe oblicza się na podstawie smukłości względnej i odpowiednich krzywych niestateczności</p> <p>29. Występują różnice pomiędzy EC, a PN, w podejściu dotyczącym obliczeń nośności elementu poddanego ścisaniu i zginaniu</p>
---	---

Na podstawie zestawienia w Tablicy 2.3 można spodziewać się różnic pomiędzy nośnością przekrojów i elementów obliczanych zgodnie z polskimi normami, a nośnością przekrojów i elementów obliczanych zgodnie z normami europejskimi.

W związku z punktami: 5, 7, 11, 12, 13, 14, 19, 24; opisanymi w tablicy 2.3, należy oczekiwać wzrostu nośności przekrojów i elementów obliczanych zgodnie z (PN-EN 1993) w stosunku do nośności przekrojów i elementów obliczanych zgodnie z (PN-90/B-03200). W związku z punktami: 5, 21, 22; opisanymi w tablicy 2.3, oraz niższymi współczynnikami zwiększającymi obciążenia (rozdział 2.2.2., tablice 2.1 oraz 2.2.), można spodziewać się pewnej „rekompensaty” w nośności przekrojów elementów obliczanych zgodnie z (PN-90/B-03200).

Niniejsza praca pozwoli odpowiedzieć na pytanie, czy wprowadzenie norm europejskich do projektowania, w zastępstwie normy polskiej, spowoduje zwiększenie ciężaru projektowanych konstrukcji ramowych, czy też jego zredukowanie.

3. Metody optymalizacji

3.1. Problem optymalizacji

Zagadnieniom optymalizacji konstrukcji poświęconych jest wiele pozycji literatury, czasopism, a także konferencji i kongresów. Jednymi z pierwszych polskich opracowań są monografia Brandta (1977) oraz Brandt (1978). Nowsze pozycje to np. książki Farkasa (1984), Mikulskiego (1999). W ostatnich latach pojawiło się szereg publikacji poświęconych zastosowaniom praktycznym metod optymalizacji np. Ostwald (2005).

Stowarzyszenie ISSMO (International Society for Structural and Multidisciplinary Optimization) organizuje co dwa lata światowy kongres (WCSMO – World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization) poświęcony zagadnieniom optymalizacji, o którym wspomniano w Rozdziale 1. Spośród sesji na WCSMO, od lat znaczące miejsce zajmują sesje poświęcone optymalizacji konstrukcji prętowych.

Rozwiązanie większości praktycznych inżynierskich problemów optymalizacji możliwe jest, dzięki metodom optymalizacji i komputerom, ponieważ ich odpowiednie połączenie daje możliwość przeanalizowania wielu opcji (projektów) w stosunkowo krótkim czasie. Optymalizacja numeryczna polega na racjonalnym przeszukiwaniu możliwych rozwiązań i znajdowaniu optymalnego rozwiązania odpowiadającego danym kryteriom. Parametry projektu które mogą się zmieniać w trakcie poszukiwania optymalnego rozwiązania nazywamy zmiennymi projektowymi. Proces projektowania może być zdefiniowany jako proces poszukiwania i znajdowania pewnej charakterystyki systemu, którą powiązać też można ze wskaźnikiem jakości rozwiązania nazywanym funkcją celu lub kryterium. Znalezione rozwiązanie może zostać zaakceptowane jeżeli spełnia wszelkie ograniczenia jakie nałożono na system.

W trakcie optymalizacji numerycznej zmienne projektowe są tak modyfikowane aby uzyskać minimalną lub maksymalną wartość funkcji celu, przy jednoczesnym spełnieniu wszystkich ograniczeń.

Znakomita większość problemów inżynierskich formułowana jest jako problemy minimalizacji wymagające spełnienia pewnych ograniczeń. Przykładem takiego sformułowania z ograniczeniami może być właśnie problem znalezienia minimalnego ciężaru (objętości) konstrukcji stalowej spełniającej jednocześnie ograniczenia w postaci warunków nośności i warunków użytkowalności.

Problem optymalizacji z ograniczeniami można wyrazić w ogólnej postaci:

$$\text{minimalizacja } F(\mathbf{x}) \quad (3.1)$$

przy ograniczeniach nierównościowych:

$$g_i(\mathbf{x}) \leq 0 \quad i=1, \dots, m \quad (3.2)$$

oraz przy ograniczeniach równościowych:

$$h_j(\mathbf{x}) = 0 \quad j=1, \dots, k \quad (3.3)$$

gdzie: $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ – jest wektorem kolumnowym zmiennych projektowych, będących liczbami rzeczywistymi, F – jest funkcją celu (wyrażającą np. masę lub koszt w przypadku problemu optymalizacji konstrukcji stalowej), g – ograniczenia nierównościowe, (np. warunki nośności przekrojów, elementów), h – ograniczenia równościowe (np. równania równowagi statycznej).

Możemy również zapisać problem w innej formie:

$$\text{minimalizacja } F(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in \Omega \quad (3.4)$$

gdzie:

$$\Omega = \{\mathbf{x}: g \leq 0, h = 0\} \quad (3.5)$$

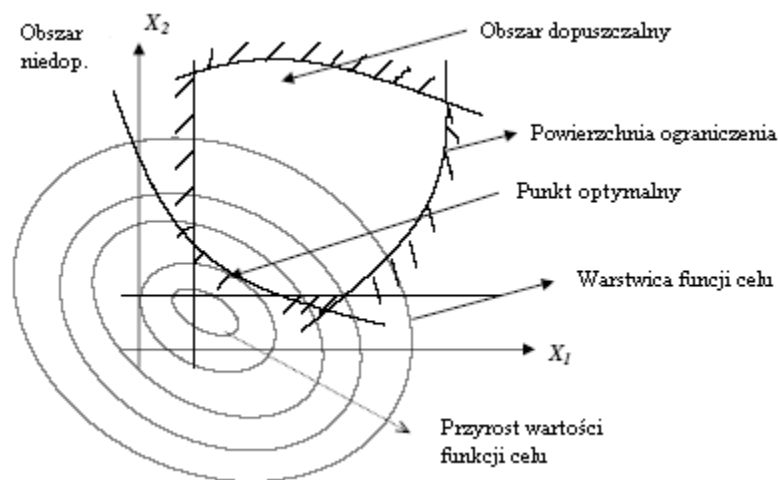
gdzie: Ω jest obszarem dopuszczalnym wyznaczonym przez ograniczenia.

Przestrzeń projektowa, lub przestrzeń zmiennych projektowych może być rozpatrywana jako n – wymiarowa przestrzeń kartezjańska, której każda oś reprezentuje jedną zmienną projektową x_i ($i = 1, \dots, n$). Punkt w przestrzeni projektowej, to punkt reprezentujący jedno rozwiązanie projektowe, dopuszczalne lub niedopuszczalne. Aby rozwiązanie projektowe było dopuszczalne, wartości zmiennych projektowych muszą być tak dobrane aby spełnić wszystkie wymagania narzucone w danym projekcie, nazywane ograniczeniami.

Ograniczenia dzielą się na dwie główne grupy. Pierwsza z nich to ograniczenia dotyczące zachowania się systemu (naprężenia, przemieszczenia), natomiast druga to ograniczenia dotyczące zmiennych projektowych (ograniczenia wymiarów, geometrii, np. z uwagi na dostępność, możliwości transportu itp.).

Wartości zmiennych projektowych tworzących zestaw wektorów zmiennych projektowych \mathbf{x} spełniających równania $g_i(\mathbf{x}) = 0$, tworzą powierzchnię nazywaną powierzchnią graniczną. Powierzchnia graniczna dzieli przestrzeń projektową na dwie części: w pierwszej $g_i(\mathbf{x}) < 0$, w drugiej $g_i(\mathbf{x}) > 0$. Rozwiązania projektowe (punkty w przestrzeni projektowej), spełniające $g_i(\mathbf{x}) = 0$, spełniają ograniczenia $g_i(\mathbf{x})$ krytycznie. Rozwiązania znajdujące się w przestrzeni gdzie $g_i(\mathbf{x}) > 0$, są rozwiązaniami niedopuszczalnymi i nieakceptowanymi, w przeciwieństwie do tych znajdujących się w przestrzeni gdzie $g_i(\mathbf{x}) < 0$, które są rozwiązaniami dopuszczalnymi, akceptowanymi.

W przypadku ogólnym może występować wiele akceptowalnych punktów w przestrzeni projektowej (rozwiązań projektowych), a naszym celem jest wybranie najlepszego z wielu. Konieczne jest stworzenie kryterium pozwalającego porównać rozwiązania dopuszczalne i wybranie najlepszego z nich. Takie kryterium lub wskaźnik jakości rozwiązania nazywane funkcją celu lub kosztów problemu optymalizacji. Jeżeli w zagadnieniu występuje jednocześnie kilka funkcji celu, mówimy o problemie optymalizacji wielokryterialnej. Podobnie jak w przypadku ograniczeń możliwe jest stworzenie powierzchni (warstwicy) w przestrzeni projektowej, odpowiadających różnym wartościom funkcji celu. Jeśli w przestrzeni projektowej naszkicujemy powierzchnie (warstwice) funkcji celu wspólnie z powierzchniami ograniczeń, wówczas punkt optymalny (rozwiązanie optymalne), można znaleźć graficznie jak pokazano na rysunku (3.1).



Rysunek 3.1 Funkcja celu, ograniczenia i punkt optymalny w przestrzeni 2 zmiennych projektowych (x_1, x_2)

Można zauważyć, iż dla problemu z dwiema zmiennymi projektowymi, punkt optymalny można szybko odnaleźć, a tym samym rozwiązać problem. Jeżeli liczba zmiennych projektowych jest większa wówczas rozwiązanie problemu wymaga zastosowania narzędzi matematycznych i/lub numerycznych. Należy również zaznaczyć, że rozwiązanie problemu może okazać się bardzo skomplikowane w przypadku zadań optymalizacji nieliniowej, skomplikowanych ograniczeń i charakteru przestrzeni projektowej (np. występowanie zmiennych dyskretnych). Dalsza część rozdziału 3 przedstawia przegląd i uzasadnienie wyboru metody optymalizacji stosowanej w niniejszej pracy.

3.2. Przegląd metod optymalizacji

Literatura z dziedziny optymalizacji jest bardzo bogata i obejmuje monografie ogólne oraz niezliczone artykuły w specjalistycznych czasopismach takich jak: „Multidisciplinary and Structural Optimization”, „Structural Optimization”, „Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences”, „International Journal for Numerical Methods in Engineering”, „Computers and Structures”, „Structural Engineering and Mechanics” i innych. Tematyka optymalnego projektowania konstrukcji poruszana jest od dawna, a wśród wydanych w języku polskim monografii wspomnieć tutaj należy o: Findeisen et al. (1977), Brandt (1977), Brandt (1978), Stark, Nicholls (1979), Majid (1981), Stachurski, Wierzbicki (1999). Wśród artykułów dotyczących metod

optymalizacji wyróżnić należy na artykuły przeglądowe np.: Arora, Huang (1994), Bauer (1994), Thanedar, Vanderplaats (1995), Pham, Karaboga (2000).

W niniejszym rozdziale przedstawiono przegląd metod optymalizacji, które mogą być przydatne do rozwiązywania problemów inżynierskich, a przede wszystkim układów prętowych z zadanymi warunkami brzegowymi.

W przypadku optymalizacji układów ramowych, należy się spodziewać, iż będą to problemy programowania nieliniowego. Wynika to nie tyle z postaci funkcji celu, która często jest funkcją liniową zmiennych projektowych, ale z postaci funkcji ograniczeń, które to w przypadkach optymalizacji konstrukcji inżynierskich są zwykle funkcjami nieliniowymi.

Głównymi metodami rozwiązywania problemów nieliniowych optymalizacji są:

- metody graficzne
- metody analityczne
- metody komputerowe sekwencyjne
- metody niesekwencyjne (np. oparte na algorytmach genetycznych lub sieciach neuronowych)

Metody graficzne oraz analityczne nie będą przydatne w rozwiązaniu postawionego problemu, z uwagi na ich ograniczenia dotyczące liczby zmiennych projektowych, czy też postaci ograniczeń.

Metody komputerowe (klasyczne oraz sekwencyjne), charakteryzują się tym, iż musi być przyjęty punkt początkowy, następnie generowane są kolejne przybliżenia rozwiązania (ciąg punktów), do momentu, gdy spełniony jest warunek zakończenia obliczeń.

Metody komputerowe można podzielić ze względu na rząd algorytmu, czyli stopień pochodnych minimalizowanej funkcji, który jest wykorzystywany do obliczeń. Na podstawie literatury (Szymczak (1998), Stachurski, Wierzbicki (1999)) wyróżniono:

- algorytmy rzędu zerowego, bezgradientowe (korzystają tylko z wartości funkcji)
- algorytmy rzędu pierwszego, gradientowe (pochodne rzędu pierwszego)
- algorytmy rzędu drugiego, gradientowe (korzystające z hesjanu minimalizowanej funkcji, a więc pochodnych rzędu drugiego).

Niektóre z opisanych metod komputerowych są stosowane w przypadku solverów, w różnego typu programach komputerowych, również komercyjnych (Excel, Mathcad). Najczęściej spotykane i stosowane to metoda gradientów sprzężonych oraz Newtona.

Matematyczne podstawy metod gradientowych rzędu pierwszego i drugiego przedstawione zostały między innymi w Stachurski, Wierzbicki (1999) oraz w Stachurski (2009). Ich stosowanie jest korzystne i efektywne głównie w przypadku problemów ciągłych.

Metoda systematycznego poszukiwania może być z powodzeniem stosowana w przypadku, gdy zmienne projektowe są zdyskretyzowane, a więc zawierają się w jakimś przedziale, który dzieli na skończoną ilość części. Metoda polega na sprawdzeniu wszystkich możliwych kombinacji zmiennych projektowych i wybraniu tej, która spełnia wszystkie ograniczenia, a wartość funkcji celu jest najmniejsza. Metodę tą zalicza się do komputerowych (bezgradientowych) i w istocie tylko za pomocą komputera można próbować rozwiązać realne problemy optymalizacji. Postanowiono jednak wyróżnić tę metodę, gdyż inny jakościowo jest tutaj warunek zakończenia obliczeń – sprawdzenie wszystkich kombinacji przekrojów. Poza tym metoda odznacza się dużą prostotą zarówno w implementacji jak i teorii potrzebnej do jej zrozumienia.

W ostatnim czasie dużym zainteresowaniem cieszą się metody bazujące na algorytmach ewolucyjnych, genetycznych lub sieciach neuronowych. Metody oparte na algorytmach genetycznych wykorzystują mechanizmy doboru naturalnego oraz prawa dziedziczności. Obowiązuje tutaj również ewolucyjna zasada przeżycia najlepiej przystosowanych. Metoda polega na analizowaniu rozwiązań kolejnych populacji, spośród których poszukujemy najlepszych osobników reprezentujących propozycję rozwiązania. Metoda oparta na sieciach neuronowych polega na stworzeniu sztucznych sieci neuronowych, poddanie ich uczeniu rozwiązywania określonych klas problemów, a następnie wykorzystywaniu tak przygotowanej sieci do rozwiązywania problemów optymalizacji (Dhingra, Rao (1992), Szewczyk, Hajela (1993), Pham, Karaboga (2000)).

3.3. Wybór metody optymalizacji konstrukcji ramowej

Ograniczenia dotyczące zastosowań metody graficznej oraz metod analitycznych opartych na koncepcji mnożników Lagrange'a, eliminują ich wykorzystanie praktyczne w rozważanym problemie. Rozważano zatem wykorzystanie komputerowej metody systematycznego poszukiwania, ze względu na jej zalety. Niestety długi czas obliczeń dyskwalifikuje tę metodę jako możliwą do wykorzystania w realnych problemach. W przypadku problemu optymalizacji jednego tylko przekroju dwuteowego

(monosymetrycznego), dla którego możliwych jest (na podstawie przyjętych zakresów zmienności grubości, wysokości oraz szerokości średnicy i półek) około 16 miliardów ($1,6 \cdot 10^{10}$) różnych wyborów dyskretnych, czas rozwiązywania problemu (przeszukiwania przestrzeni projektowej wynosi około 40 minut (komputer klasy PC, procesor 1,5 GHz). W rozważanych problemach ilość dyskretnych wyborów wynosi np. $4,26 \cdot 10^{47}$ (szacowany czas obliczeń metodą systematycznego przeszukiwania to $3,24 \cdot 10^{43}$ lat!), co zmusza do poszukiwania innych, dużo bardziej wydajnych metod optymalizacji,. Postanowiono jednak wykorzystać metodę systematycznego poszukiwania do sprawdzenia metody ostatecznie wybranej do optymalizacji konstrukcji. Dodatkowo zdecydowano się na sprawdzenie działania solverów (procedur deterministycznych) wbudowanych w programy komercyjne, również traktując te narzędzia jako sposób sprawdzenia metody opisywanej poniżej.

Metody iteracyjne I i II rzędu stanowią kolejną propozycję, którą należy wziąć pod uwagę w przypadku rozważanego problemu. Dostrzeżono jednak dwa poważne utrudnienia dotyczące ich wykorzystania w rozważanym zagadnieniu. Pierwszym jest niezwykle skomplikowana implementacja numeryczna, wymagająca obliczeń gradientów funkcji celu (niejednokrotnie zawierającej dodatkowo nieliniowe ograniczenia związane z zagadnieniami stateczności) lub ich drugich pochodnych. Druga przeszkoda jest obecność dyskretnych zmiennych decyzyjnych (opisujących geometrię przekrojów oraz geometrię ramy) które sprawiają, że problem staje się dyskretny (nieciągły) a korzystanie z pochodnych staje się problematyczne.

W związku z powyższym, szczególną uwagę poświęcono metodom probabilistycznym opartym na algorytmach genetycznych, których zalety zostały dostrzeżone w ostatnich latach. Rozwój technologii informatycznych pozwala na ich implementacje do rozwiązywania coraz bardziej złożonych zagadnień. Metody oparte na Algorytmach Genetycznych (AG) będą przedmiotem dalszych rozważań.

4

4. Algorytm genetyczny

4.1. Wstęp

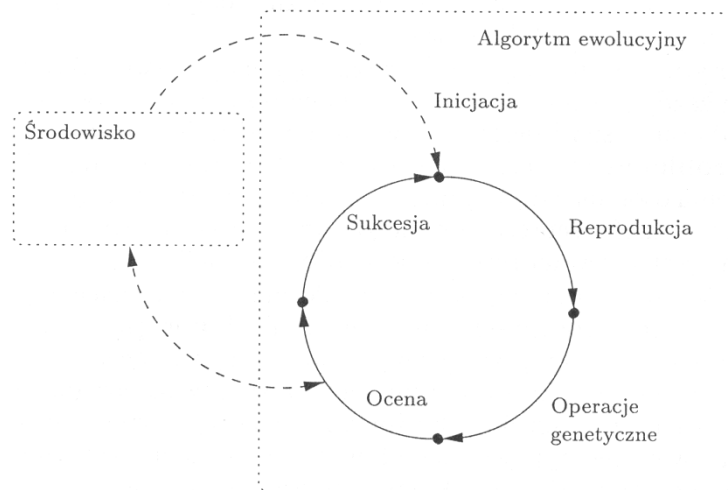
Algorytmy genetyczne (AG) są to algorytmy probabilistyczne, które podczas przeszukiwania obszaru dopuszczalnego w celu wyszukania najlepszego rozwiązania problemu optymalizacji, naśladują pewne procesy naturalne takie jak „dziedziczenie i darwinowską walkę o przeżycie” (Michalewicz (1997)).

Do opisu AG stosuje się słownictwo zapożyczone z genetyki. Zestaw rozpatrywanych wektorów projektowych nazywamy populacją, pojedynczy wektor zmiennych projektowych nazywany jest osobnikiem lub genotypem (często również chromosomem), a pojedyncza komórka wektora zmiennych projektowych to gen. Każdy chromosom definiuje jedno rozwiązanie zadania (uzyskiwane po odcodowaniu chromosomu) nazywane fenotypem.

Jednymi z pierwszych opracowań na temat algorytmów ewolucyjnych była publikacja Holland’a (1975) oraz monografia Goldberga (1989), które opisywały podstawy algorytmów genetycznych. Algorytmy w krótkim czasie stały się bardzo popularne co zaowocowało kolejnymi pozycjami literatury takimi jak książki Davis (1991), Koza (1992), Michalewicz (1992) i Bäck (1995). W ostatniej dekadzie algorytmy genetyczne zostały z powodzeniem wykorzystane w różnych zagadnieniach inżynierskich, opublikowano setki artykułów, a na półkach księgarń pojawiły się kolejne pozycje literatury, z których niektóre to: Dasgupta, Michalewicz (1997), Miettinen et al. (1999), (Michalewicz, Fogel (2000), Gen, Cheng (2000), Pham, Karaboga (2000), a z pozycji w języku polskim Arabas (2001) i Osyczka (2002).

Jak wspomniano wcześniej, algorytm genetyczny przeszukuje i przetwarza populację osobników (każdy osobnik to jedna propozycja rozwiązania problemu, jeden zestaw zmiennych projektowych). Populacja podlega symulowanej ewolucji poprzez wykorzystanie metod nacisku selektywnego (preselekcja, sukcesja), oraz operatorów genetycznych (krzyżowanie, mutacja). W każdym następnym pokoleniu lepsze rozwiązania reprodukują się, natomiast gorsze wymierają, przy czym do oceny rozwiązań służy funkcja celu (oceny).

Działanie algorytmu genetycznego sprowadza się do wykonywania pętli przedstawionej na rysunku 4.1. W przedstawionej pętli następują po sobie: reprodukcja – preselekcja (wraz z operatorami genetycznymi modeluje rozmnażanie – materiał genetyczny rodziców jest przekazywany potomstwu), operacje genetyczne (polegające na losowej modyfikacji genotypów poszczególnych osobników), ocena środowiska, sukcesja – postselekcja. W wyniku działania operatorów genetycznych powstaje populacja potomna, która jest poddawana ocenie środowiska, po czym następuje sukcesja – tworzy się nowa populacja bazowa (może ona zawierać osobniki z poprzedniej populacji bazowej jak i z populacji potomnej).



Rysunek 4.1 Schemat algorytmu genetycznego (Arabas (2001))

Przedstawiony powyżej rysunek przedstawia ogólnie przyjętą zasadę działania algorytmu genetycznego (schemat algorytmu ewolucyjnego), ale nie jedyną. W literaturze spotyka się również inne schematy działania opisywanych algorytmów (Goldberg (2003)).

Do pełnego zdefiniowania i rozwiązania numerycznego przykładu optymalizacji, konieczne jest określenie:

- kodowania fenotypu – wybór rodzaju genotypu,
- tworzenia populacji bazowej,
- wyboru ocena środowiska,
- sposobu doboru osobników do reprodukcji – inicjacja (preselekcja),
- operacji genetycznych – mutacja i krzyżowanie,
- doboru osobników do populacji potomnej – sukcesja (postselekcja),
- zdefiniowanie warunku zakończenia obliczeń,
- oceny algorytmu.

Dalsza część Rozdziału 4, poświęcona jest przeglądowi sposobów kodowania, oceny środowiska, selekcji oraz operatorów genetycznych. Główny nacisk położono na elementy szczególnie przydatne do rozwiązania rozważanego problemu optymalizacji konstrukcji metalowych.

4.2. Kodowanie i dekodowanie

Wybór rodzaju genotypu polega na przyjęciu sposobu reprezentacji chromosomu. Algorytm genetyczny pierwotnie został rozpowszechniony z zastosowaniem kodowania binarnego, gdzie chromosom jest n - elementowym wektorem genów, z których każdy jest zerem lub jedyneką. Na Rysunku 4.2 przykładowo przedstawiono chromosom (składający się z 26 genów) opisujący geometrię dwuteownika bisymetrycznego o wysokości średnika 500 mm, szerokości półek 200 mm, grubości średnika 10mm i grubości półek 16 mm.

1|1|1|1|1|0|1|0|0|1|1|0|0|1|0|0|0|1|0|1|0|1|0|0|0|0

Rysunek 4.2 Reprezentacja chromosomu w przypadku kodowania binarnego

Preferencja kodowania binarnego wynika z zasady „minimalnego alfabetu”, a także innych korzystnych cech. W praktyce występują jednak pewne trudności związane z przejściem z kodowania binarnego na kodowanie dziesiętne.

Na podstawie literatury (Jenkins (2002)) stwierdzono, że kodowanie dziesiętne może być całkiem wygodne, a szczególnie sposób polegający na dyskretyzacji zakresu każdej zmiennej i opisaniu każdego dyskretnego wyboru (w obszarze jednej zmiennej) inną liczbą. Innymi słowy, zakres każdej zmiennej byłby opisany liczbą dyskretnych wyborów. Taki właśnie sposób kodowania zdecydowano się wybrać i stosować do dalszych rozważań, a prezentacja chromosomu przedstawionego na Rysunku 4.2 zmieni się na przedstawioną poniżej, w której chromosom składa się z 4 genów (Rysunek 4.3).

500|200|10|16

Rysunek 4.3 Chromosom w przypadku kodowania dziesiętnego

W przypadku kodowania dziesiętnego, pomija się krok, w którym należy zakodować lub zdekodować genotyp i utworzyć z niego odpowiednio genotyp (ciąg liczb opisujących np. geometrię elementu) lub fenotyp (np. geometrię przekroju).

4.3. Sposób tworzenia populacji bazowej

Populację bazową tworzy się losując pewną liczbę osobników z całego zbioru. Należy w tym miejscu zdefiniować liczbę losowanych osobników, oraz metodę losowania. Jeśli chodzi o liczbę osobników w populacji bazowej to wartość tą powinno się dobierać w zależności od rozwiązywanego zadania. Wartości poszczególnych genów w chromosomie będą losowane niezależnie od siebie, z rozkładu jednostajnego na przedziale $[0.0001,1]$.

4.4. Ocena środowiska – funkcja przystosowania

Ograniczenia funkcyjne problemu optymalizacji (3.2) oraz (3.3), pomimo, że ograniczają przestrzeń poszukiwań (tworząc obszar dopuszczalny), mogą stanowić pewne utrudnienie z punktu widzenia realizacji procesu przeszukiwania. Wymagają one zatem specjalnych metod ich uwzględnienia (Arabas (2001)).

Najbardziej rozpowszechnionymi są metody funkcji kary (Davydov, Sigal (1972)), (Cai, Thierauf (1993)), (Shin Dong KU et al. (1990)). Polegają one na utworzeniu nowej funkcji celu oraz eliminacji ograniczeń. Nowa funkcja tworzona jest poprzez

włączenie ograniczeń do funkcji celu (koncepcja funkcji kary). W zależności od sposobu modyfikacji funkcji celu i włączenia do niej ograniczeń, wspomniane metody można podzielić na dwie podstawowe kategorie:

- wewnętrzną funkcję kary,
- zewnętrzną funkcję kary.

W przypadku koncepcji funkcji kary wewnętrznej, zmodyfikowana funkcja celu (funkcja przystosowania), przybiera postać:

$$F_w(\mathbf{x}, r) = F(\mathbf{x}) - r \cdot \sum [g_j(\mathbf{x})]^{-1} \quad (4.1)$$

gdzie: $g_j(\mathbf{x})$ – ograniczenia funkcyjne, r – parametr kary, $F(\mathbf{x})$ – pierwotna funkcja celu (np. objętość konstrukcji). W przypadku problemów inżynierskich, cenną zaletą koncepcji funkcji kary wewnętrznej (nazywanej też funkcją barierową) jest fakt, że każde rozwiązanie znajduje się w obszarze dopuszczalnym, a co za tym idzie, jest możliwe do wykorzystania w realnych problemach inżynierskich. Pewne problemy numeryczne mogą powstawać przy zbliżaniu się do punktu optymalnego (mianownik dąży do zera), co ogranicza zdolność algorytmu do otrzymania rozwiązań bliskich lub równych optymalnym.

W przypadku koncepcji funkcji kary zewnętrznej, zmodyfikowana funkcja celu (funkcja przystosowania), przybiera ogólną postać:

$$F_z(\mathbf{x}, r) = F(\mathbf{x}) + r \cdot \sum [G_j(\mathbf{x})]^\alpha \quad (4.2)$$

gdzie:

$$G_j(\mathbf{x}) = \max [0, g_j(\mathbf{x})-1] \quad (4.3)$$

gdzie: $g_j(\mathbf{x})$ – ograniczenia, r – parametr, α – parametr, $F(\mathbf{x})$ – pierwotna funkcja celu. Przewagą koncepcji funkcji kary zewnętrznej jest fakt, że nie ogranicza obszaru poszukiwań do obszaru dopuszczalnego (rozwiązania nie spełniające ograniczeń nadal są oceniane) co zwiększa zdolność algorytmu do otrzymania rozwiązań bliskich lub równych optymalnym poprzez modyfikację osobników bliskich rozwiązaniu optymalnemu, w kolejnych pętlach algorytmu genetycznego.

Szczególnym przypadkiem metod opisanych powyżej jest koncepcja funkcji kary śmierci, polegająca na obliczeniu wartości przystosowania poszczególnych osobników (rozwiązań) zgodnie z zasadą zapisaną poniżej:

$$F_{ks}(\mathbf{x}) = F(\mathbf{x}) \quad (4.4)$$

w przypadku gdy wszystkie ograniczenia $g_j(\mathbf{x})$, są spełnione, lub:

$$F_{ks}(\mathbf{x}) = 0 \quad (4.5)$$

w przypadku gdy chociaż jedno z ograniczeń $g_j(\mathbf{x})$, nie jest spełnione. Tak stworzone funkcje przystosowania są spotykane w literaturze (Goldberg (2003)) i mają jedną wielką zaletę – są bardzo proste w implementacji komputerowej, lecz z drugiej strony eliminują rozwiązania niespełniające ograniczeń, co w przypadku rozwiązań znajdujących się bardzo blisko obszaru dopuszczalnego jest własnością negatywną.

Przedstawione powyżej funkcje: $F_w(\mathbf{x}, r)$, $F_z(\mathbf{x}, r)$, $F_{ks}(\mathbf{x})$, są w przypadku algorytmu genetycznego funkcjami przystosowania i wykorzystuje się je do oceny środowiska (poszczególnych osobników). Dobór odpowiedniej funkcji oraz parametrów powinien następować w drodze doświadczeń (zachowanie się algorytmu genetycznego z uwagi na zbieżność krzywej zbieżności – jakość algorytmu, oraz na końcową wartość funkcji celu dla rozwiązania optymalnego – jakość rozwiązania).

4.5. Preselekcja

W literaturze (Arabas (2001), Goldberg (2003)) najczęściej spotyka się następujące schematy preselekcji (nazywanej także reprodukcją):

- proporcjonalna (ruletkowa) i jej modyfikacje,
- rangowa wraz z modyfikacjami,
- turniejowa,
- progowa.

We wszystkich powyższych schematach istotą reprodukcji jest własność, iż osobniki o większym stopniu przystosowania powinny być powielane z większym prawdopodobieństwem niż osobniki gorsze. Dzięki temu algorytm genetyczny jest ukierunkowany w stronę lepszych rozwiązań. Tendencja do poprawiania średniej

wartości przystosowania nazywa się naciskiem selektywnym. Ważne jest, aby zachować swoistą równowagę pomiędzy preferowaniem osobników o jak największej wartości funkcji przystosowania, przy jednoczesnym zachowaniu różnorodności populacji.

Schemat reprodukcji proporcjonalnej (ruletkowej) jest realizowany w następujących krokach:

- oblicza się wartości przystosowania poszczególnych osobników za pomocą wybranej funkcji przystosowania

$$F_p(\mathbf{x}) = [F_w(\mathbf{x}, r) \text{ lub } F_z(\mathbf{x}, r) \text{ lub } F_{ks}(\mathbf{x})] \quad (4.5)$$

- definiuje się zmienną losową – dla każdego osobnika z populacji bazowej określa się prawdopodobieństwo jego reprodukcji wg wzoru:

$$p_r(\mathbf{x}) = F_p(\mathbf{x}) / \sum F_p(\mathbf{x}) \quad (4.6)$$

Prawdopodobieństwo wylosowania osobnika jest wprost proporcjonalne do wartości jego przystosowania i wynosi dokładnie tyle jaki jest stosunek wartości przystosowania osobnika do sumy wartości przystosowań wszystkich osobników, co można zobrazować jako wycinek koła (ruletki).

W przypadku reprodukcji według rangi prawdopodobieństwo reprodukcji osobnika jest podane w sposób jawny, na podstawie jego rangi. Rangę określa się nadając osobnikowi numer w szeregu, w którym wszystkie osobniki są umieszczone według nierosnącej wartości funkcji przystosowania. Po określeniu rang należy wybrać (wybór dokonywany przez projektanta algorytmu) funkcję określającą prawdopodobieństwo reprodukcji (funkcja nie może być rosnąca wraz z numerem rangi), przy czym najczęściej jest spotykana liniowa funkcja, zatem prawdopodobieństwo wylosowania osobnika (jego reprodukcji) wynosi:

$$p_r(\mathbf{x}) = a + k \cdot (1 - (r(\mathbf{x}) / r_{max})) \quad (4.7)$$

gdzie: $r(\mathbf{x})$ – ranga chromosomu poszczególnego osobnika, r_{max} , - maksymalna wartość rangi dla wszystkich chromosomów, a , k – odpowiednio dobrane parametry.

W reprodukcji turniejowej stosuje się selekcję osobników do skopiowania w dwóch etapach. W pierwszym etapie wybiera się losowo z populacji pewną ilość osobników (losowanie ze zwracaniem lub bez zwracania), które w drugim etapie są poddawane ocenie (za pomocą funkcji przystosowania). Osobnik, który wygra turniej (osobnik z największą wartością przystosowania, jest kopiowany do populacji potomnej. Proces wyboru osobników trwa, aż do momentu wypełnienia populacji tymczasowej. Nacisk selektywny zależny jest od liczby osobników biorących udział w turnieju. W przypadku dwóch osobników w turnieju, reprodukcja turniejowa staje się szczególnym przypadkiem reprodukcji rangowej. Spotyka się pozycje literatury promujące reprodukcję turniejową (Yang, Soh (1997)).

Reprodukcja progowa jest szczególnym przypadkiem reprodukcji rangowej, a funkcja $p_r(\mathbf{x})$, ma postać progu w związku z czym prawdopodobieństwo reprodukcji określone jest wyrażeniami:

$$p_r(\mathbf{x}) = 1 / (\rho \cdot \mu) \quad (4.8)$$

w przypadku gdy: $0 \leq r(\mathbf{x}) \leq (\rho \cdot \mu)$ lub:

$$p_r(\mathbf{x}) = 0 \quad (4.9)$$

w przeciwnym przypadku.

Wartość ρ jest wskaźnikiem nacisku selektywnego (dobierana doświadczalnie), μ – liczebność populacji.

Należy mieć na uwadze, iż metoda doboru osobników do reprodukcji wpływa na liczebność populacji tymczasowej (poddawanej operacjom genetycznym), oraz na intensywność nacisku selektywnego. Odpowiedni rodzaj reprodukcji powinien być dobrany na drodze wielokrotnych prób i przykładów numerycznych.

4.6. Krzyżowanie

Operatory krzyżowania polegają na tworzeniu chromosomów potomnych poprzez składanie ich z wartości genów chromosomów rodzicielskich.

W wyniku krzyżowania może powstać różna liczba potomków (dwa lub jeden), w krzyżowaniu może również uczestniczyć różna liczba rodziców. W algorytmach genetycznych najczęściej przyjmuje się, że w krzyżowaniu biorą udział dwa osobniki rodzicielskie i otrzymujemy dwa osobniki potomne. Dla takich założeń zostaną przedstawione schematy krzyżowania opisane w niniejszym rozdziale.

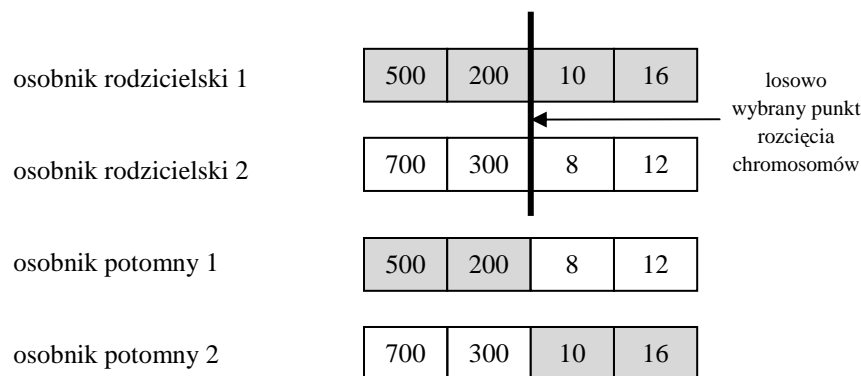
Poniżej omówiono najbardziej popularne operatory krzyżowania, a są nimi:

- operatory krzyżowania wymieniającego,
- operatory krzyżowania uśredniającego.

Operatory krzyżowania wymieniającego polegają na tworzeniu chromosomów potomnych poprzez składanie ich z genów osobników rodzicielskich poprzez „przetasowanie” wartości genów osobników rodzicielskich. Operatory te można wykorzystywać zarówno przy kodowaniu binarnym jak i rzeczywistoliczbowym. Wyróżnia się tutaj kilka rodzajów (metod) krzyżowania:

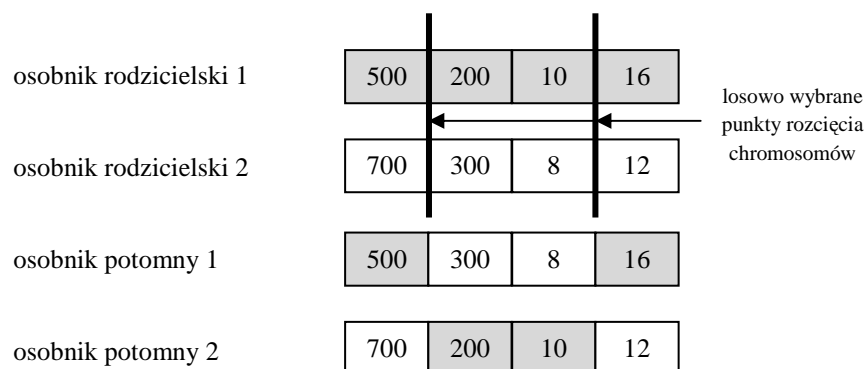
- jednopunktowe (operator obciążony),
- dwupunktowe (operator obciążony),
- dwupunktowe w wariacie zmodyfikowanym (operator obciążony),
- wielopunktowe (operator obciążony),
- równomierne (operator nieobciążony).

Krzyżowania jednopunktowe składa się z dwóch etapów. W pierwszym etapie losuje się (z rozkładem jednostajnym) liczbę ze zbioru $\{1,2,3,\dots,n-1\}$, gdzie n określa liczbę genów w chromosomie. Następnie w wylosowanym miejscu dokonuje się rozcięcia chromosomów obu osobników rodzicielskich i składa się część pierwszą chromosomu osobnika pierwszego z częścią drugą chromosomu osobnika drugiego oraz część drugą chromosomu osobnika pierwszego z częścią pierwszą chromosomu osobnika drugiego, co obrazuje poniższy schemat:



Rysunek 4.4 Schemat krzyżowania wymieniającego, jednopunktowego

Krzyżowanie dwupunktowe oraz wielopunktowe również składa się z dwóch etapów, różni się jednak liczbą losowanych miejsc, w których nastąpi rozcięcie chromosomu, a liczba ta musi być mniejsza lub równa od $n-1$. Poniżej przedstawiono schemat krzyżowania wielopunktowego (w tym przypadku dwa punkty rozcięcia):



Rysunek 4.5 Schemat krzyżowania wymieniającego, wielopunktowego

W przypadku krzyżowania wymieniającego, jedno lub wielopunktowego, nie jest spełniony postulat braku obciążeń, ponieważ nie wszystkie kombinacje genów, osiągalne przez wielokrotne krzyżowanie wymieniające, dadzą się wygenerować w jednym kroku krzyżowania (Arabas J., (2001)).

Wad operatorów krzyżowania wymieniającego, jedno lub wielopunktowego, pozbawiony jest operator krzyżowania równomiernego, w przypadku którego, chromosom potomny tworzony jest w następujący sposób:

- generowanie liczby losowej ξ z przedziału $(0,1)$

- porównanie, dla każdej pary genów w chromosomie, wygenerowanej liczby losowej ζ_i z parametrem p_e (przyjmowanym zazwyczaj jako 0,5)
- stworzenie chromosomów potomnych poprzez zamianę genów miejscami w przypadku gdy $\zeta_i < p_e$, oraz pozostawienie genów bez zamiany w przeciwnym przypadku, co obrazuje poniższy, przykładowy schemat:

osobnik rodzicielski 1	500	200	10	16
	$\zeta_1 < p_e$		$\zeta_3 < p_e$	
osobnik rodzicielski 2	700	300	8	12
osobnik potomny 1	700	200	8	16
osobnik potomny 2	500	300	10	12

Rysunek 4.6 Schemat krzyżowania wymieniającego, równomiernego

Operatory krzyżowania uśredniającego w przeciwieństwie do opisanych powyżej, oddziałują na wartość genów chromosomów poddawanych krzyżowaniu, a wartość genu chromosomów potomnych zawiera się pomiędzy wartościami genów chromosomów rodzicielskich. Wyróżnia się tutaj dwa główne warianty: podstawowy i alternatywny.

4.7. Mutacja

Operatory mutacji polegają na perturbacji wartości zmiennych niezależnych znajdujących się w chromosomie. Perturbacja ta polega na dodaniu pewnego wektora będącego realizacją n - wymiarowej zmiennej losowej ξ o założonym rozkładzie (najczęściej jako rozkłady prawdopodobieństwa są wykorzystywane rozkłady normalny i Cauchy’ego). Można założyć, iż mutacji będzie poddawany jeden gen lub kilka i w związku z tym operatory działają na jednym genie (mutacje jednopunktowe), lub wielu (mutacje wielopunktowe).

Chromosomy potomne poddawane mutacji tworzone są według następującego schematu:

- losowany jest numer genu ze zbioru $\{1,2,3,\dots,n\}$, który będzie poddawany mutacji, w przypadku mutacji jednopunktowej losuje się jeden gen, w

przypadku mutacji wielopunktowej losuje się tyle genów ile założono przy projektowaniu tego operatora

- dla wybranego genu (genów), losuje się liczbę losową z przedziału (0,1) i zmienia się wartość genu o wartość zmiennej losowej pomnożonej przez zakres zmienności modyfikowanego genu.

W przedstawionym poniżej przykładzie mutacji jednopunktowej założono, iż wylosowano do mutacji gen nr 1, zakres zmienności genu numer 1 jest określony w przedziale [300mm, 1200mm], oraz że liczba losowa określająca zakres mutacji równa jest 0,35.

osobnik przed mutacją	500	200	10	16
osobnik po mutacji	815	200	10	16

Rysunek 4.7 Schemat mutacji jednopunktowej

4.8. Sukcesja

Sukcesja (postselekcja) to etap w algorytmie genetycznym polegający na tworzeniu (na podstawie oceny środowiska) nowej populacji bazowej z populacji tymczasowej. Na tym etapie również można sterować naciskiem selektywnym, czyli faworyzować lepsze osobniki do następnej populacji bazowej.

Najczęściej spotyka się następujące typy sukcesji:

- sukcesja z całkowitym zastępowaniem (trywialna), jest podstawowym i najczęściej wykorzystywanym schematem, polega na tym, że nową populacją bazową staje się populacja potomna, ten rodzaj sukcesji nie wprowadza nacisku selektywnego,
- sukcesja z częściowym zastępowaniem jest nieco bardziej wyrafinowanym schematem sukcesji i polega na tym, że nowa populacja bazowa może zawierać osobniki z populacji potomnej i ze starej bazowej,
- sukcesja elitarna polega na tym, że do nowej populacji bazowej wybiera się najlepiej przystosowane osobniki z populacji starej bazowej i dodaje się do zbioru osobników potomnych. Ten rodzaj sukcesji ma poważną wadę związaną z „osiadaniem” algorytmu w obszarach przyciągania ekstremów lokalnych.

Wyjście z pułapki ewolucyjnej jest możliwe za pomocą operatorów mutacji. Liczebność elity jest parametrem odpowiadającym za skłonność algorytmu do osiadania i powinna być ona dobierana na podstawie prób dla konkretnych problemów optymalizacji.

4.9. Kryterium zakończenia obliczeń

Sformułowanie odpowiedniego kryterium zakończenia obliczeń jest zadaniem bardzo trudnym, gdyż zbieżność algorytmów genetycznych ma charakter asymptotyczny (Arabas J., (2001)). Można podzielić kryteria zakończenia obliczeń na dwie grupy:

- kryteria polegające na monitorowaniu wartości funkcji przystosowania osobników generowanych przez algorytm
- kryteria polegające na monitorowaniu zdolności algorytmu do eksploracji przestrzeni genotypów (co jest czynnikiem warunkującym odporność algorytmu na ekstrema lokalne).

Ocena algorytmu to przede wszystkim odpowiedź na pytania czy rozwiązanie jest do przyjęcia, czy czas obliczeń jest do przyjęcia oraz czy algorytm jest odporny na ekstrema lokalne. Dokładność rozwiązania można (przy założeniu, że funkcja celu jest mierzalna) ocenić przez odległość od poszukiwanego minimum, przybliżenie wartości funkcji celu w poszukiwanym minimum lub miarę zbioru poziomicowego otaczającego punkt optymalny znajdujący się w obszarze dopuszczalnym, lub blisko jego granic. Koszt symulacji (utożsamiany z czasem procesora) wiąże się z nakładem obliczeń potrzebnych do rozwiązania problemu.

5. Projektowanie ram stalowych zgodnie z PN-90/B-03200 / Eurokod-3 z wykorzystaniem AG

5.1. Opis procesu projektowego

W niniejszym rozdziale opisano schemat procesu projektowania spotykany w pracowniach projektowych. Zaproponowano również nowe podejście do optymalnego projektowania ram stalowych (z wykorzystaniem algorytmów genetycznych).

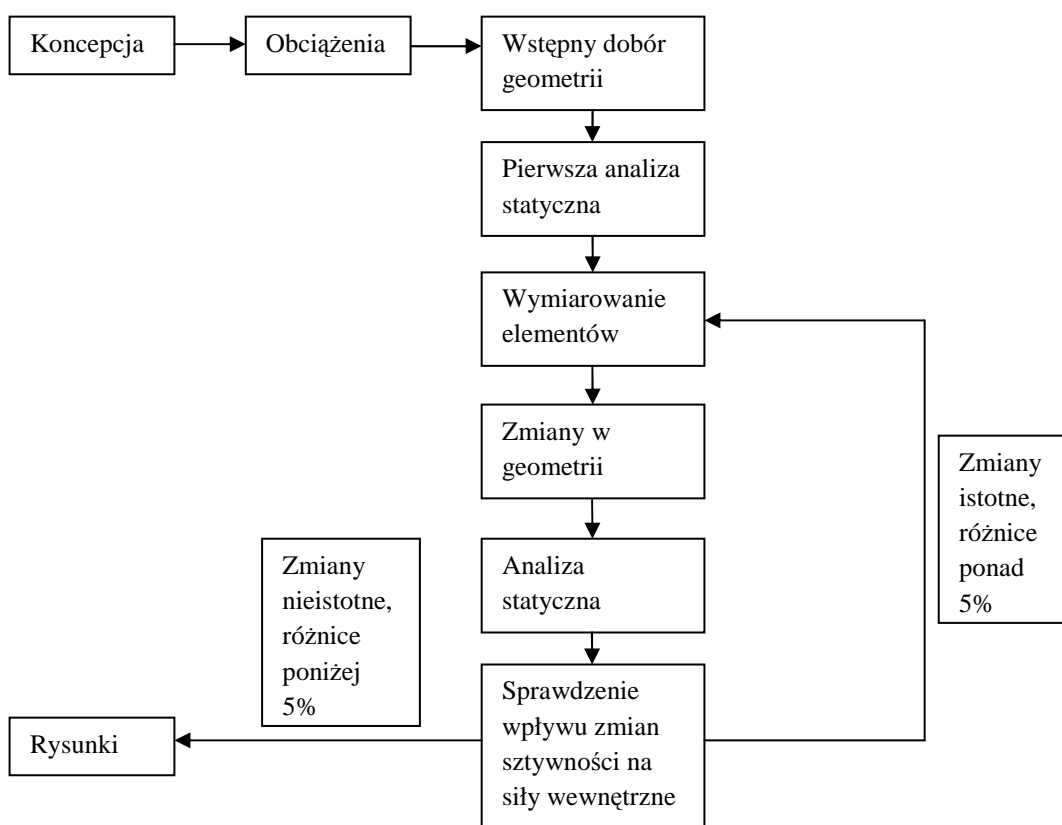
5.1.1. Projektowanie tradycyjne (pracownia projektowa)

W trakcie procesu projektowania konstrukcji ramowej można wyróżnić następujące fazy projektowania:

- koncepcja układu konstrukcyjnego i schematów statycznych w oparciu o dostarczone rysunki architektoniczne, wymagania techniczne i pożarowe,
- zebranie obciążeń w oparciu o przedmiotowe normy,
- wstępny dobór sztywności elementów składowych (np. słupów i rygli ram) dla wybranych schematów statycznych,
- analiza statyczna i uzyskanie sił wewnętrznych w poszczególnych elementach składowych (np. w słupach i ryglach ram),
- wymiarowanie poszczególnych elementów i zmiana ich geometrii celem spełnienia warunków nośności przekrojów i prętów, oraz celem zmniejszenia ich masy,

- wprowadzenie odpowiednich zmian sztywności w schematach statycznych i powtórne obliczenie sił wewnętrznych w poszczególnych elementach składowych, powtórne wymiarowanie poszczególnych elementów i zmiana ich geometrii celem spełnienia warunków nośności przekrojów i prętów,
- powtórzenie etapów wprowadzania zmian w sztywności oraz wymiarowania poszczególnych elementów składowych, aż do momentu gdy zmiany sztywności nie będą znacząco wpływały na zmiany sił wewnętrznych, a wszystkie warunki nośności przekrojów i prętów będą spełnione,
- rysunki konstrukcyjne

Powyższe fazy projektowania przedstawiono na rys. 5.1:



Rysunek 5.1 Schemat procesu projektowania konstrukcji ramowej (podejście tradycyjne)

W opisywanym procesie projektowym znaczną ilość czasu zajmuje poszukiwanie optymalnego rozwiązania tj. optymalnej geometrii przekrojów poszczególnych elementów składowych ram („optymalizacja ręczna”). Niestety nawet pomimo znacznego nakładu czasu pracy tak otrzymany wynik zazwyczaj znacznie odbiega od możliwego do uzyskania przy wykorzystaniu metod optymalizacji. Dodatkowo każda

zmiana przekroju elementu w trakcie procesu „ręcznej optymalizacji” pociąga za sobą zmiany w sztywności elementów, a co za tym idzie konieczność ponownej analizy statycznej i ponownego wymiarowania i poszukiwania możliwie optymalnego rozwiązania dla poszczególnych elementów.

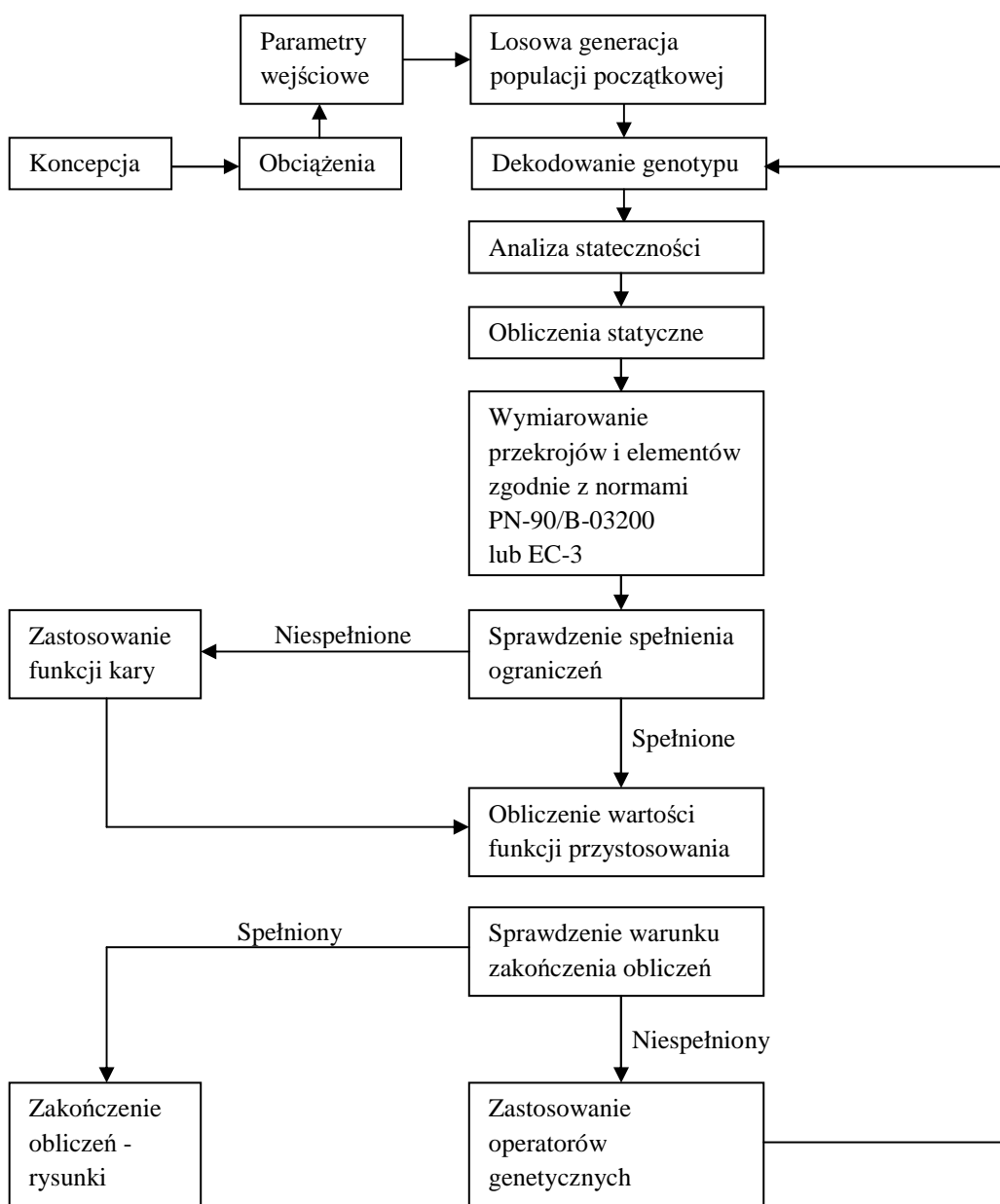
Takie, dalekie od innowacyjnego, podejście do projektowania konstrukcji stalowych powoduje, iż jest ono bardzo pracochłonne, koszty projektowania są wysokie, a optymalność wyników jest przypadkowa.

5.1.2. Projektowanie z zastosowaniem AG

W przypadku wykorzystania algorytmów genetycznych proces projektowania przedstawia się następująco:

- koncepcja układu konstrukcyjnego i schematów statycznych w oparciu o dostarczone rysunki architektoniczne, wymagania techniczne i pożarowe,
- zebranie obciążeń w oparciu o przedmiotowe normy,
- losowa generacja populacji początkowej, czyli generacja określonej liczby ram o różnych kształtach przekrojów poprzecznych poszczególnych elementów. Na tym etapie generowany jest ciąg liczb zwany genotypem,
- dekodowanie genotypu, czyli odczytanie z wygenerowanego losowo ciągu liczb odpowiednich informacji dotyczących poszczególnych ram,
- obliczenia statyczne poszczególnych ram i obliczenie sił wewnętrznych w elementach składowych słupów i rygla poszczególnych ram,
- analiza stateczności ram (wyznaczenie sił krytycznych w elementach ściskanych – głównie w słupach) Bezpośrednią Metodą Przemieszczeń (BMP) przy wykorzystaniu elementu belkowego i analizy II rzędu,
- wymiarowania przekrojów i elementów składowych ram przeprowadzane na podstawie odpowiednich norm do projektowania konstrukcji stalowych (PN-90/B-03200 lub Eurokod-3),
- sprawdzenie spełnienia ograniczeń tj. sprawdzenie czy wszystkie elementy składowe słupów i rygla poszczególnych ram, a także rama jako całość, spełniają normowe warunki nośności,
- obliczenie wartości funkcji przystosowania, czyli „wartości” ramy pod względem jej optymalności (masy), im mniejsza masa tym wartość przystosowania wyższa,

- sprawdzenie warunku zakończenia obliczeń, którym w większości przypadków jest warunek maksymalnej liczby iteracji,
- zastosowanie operatorów genetycznych (preselekcja, krzyżowanie, mutacja, postselekcja zwana sukcesją), które szerzej opisano w rozdziale 4, a strukturę programu opisano w rozdziale 5.3.1.
- powtórzenie czynności od dekodowania genotypu do operatorów genetycznych, aż do momentu gdy warunek zakończenia obliczeń będzie spełniony
- rysunki konstrukcyjne



Rysunek 5.2 Schemat procesu projektowania konstrukcji ramowej (podejście wykorzystujące algorytmy genetyczne)

Głównymi różnicami pomiędzy schematami na rysunkach 5.1 i 5.2 są:

- zastąpienie wymuszonej próby optymalizacji w podejściu tradycyjnym na rzecz optymalizacji z wykorzystaniem algorytmów genetycznych
- zastąpienie wymuszonej iteracji dotyczącej obliczeń statycznych oraz wymiarowania zautomatyzowaną pętlą algorytmu genetycznego.

Powyższe zmiany (różnice) skracają proces projektowania ramy stalowej z kilku godzin (dla jednego schematu) do kilku minut i w sposób znaczący wpływają na wydajność pracy projektanta.

5.2. Opis problemu optymalizacji

Optymalizacji poddano masę całej ramy złożonej z prętów pryzmatycznych. Rama obciążona jest reakcjami z płatwi (walcowanych lub kratowych). Słup ramy składa się z jednego lub kilku elementów w zależności od wysokości słupa, oraz decyzji projektanta. Rygiel ramy składa się z elementów wydzielonych płatwiami obciążającymi ramę. Pod siłą skupioną z płatwi stosuje się żebro usztywniające środnik, eliminując tym samym dodatkowe naprężenia w środniku od obciążenia siłą skupioną.

W związku z powyższym poszukiwana jest optymalna geometria przekrojów elementów składowych słupów i rygla, a co za tym idzie, optymalny rozkład sztywności w całej ramie. Celem optymalizacji jest minimalizacja objętości konstrukcji ramy.

Zmienne projektowe w opisywanym problemie to wymiary przekrojów poszczególnych elementów tj. wysokości, grubości środników słupów i rygli, szerokości, grubości pasów słupów i rygli (założono, iż przekroje mogą być bisymetryczne lub monosymetryczne).

Poszczególne przekroje i elementy muszą spełniać wszystkie warunki nośności opisane w rozdziale 2, a cała rama dodatkowo musi spełniać warunki normowe dotyczące przemieszczeń poziomych (przechyłów), oraz przemieszczeń pionowych. Opisane warunki nośności (odpowiadające SGN) i użyteczności (odpowiadające SGU) są w tym przypadku ograniczeniami projektowymi. Dodatkowymi ograniczeniami nałożonymi na kształt przekroju są ograniczenia związane z maksymalną smukłością ścianek, oraz dostępnością handlową grubości blach.

Rozważane zadanie należy do problemów optymalizacji nieliniowej przy ograniczeniach równościowych i nierównościowych, a zmienne decyzyjne mają charakter dyskretny. Skomplikowane ograniczenia a także obecność zmiennych

dyskretnych (których liczba może być znaczna w praktycznych przykładach) zdecydowanie uzasadnia wybór metody optymalizacji opartej na algorytmach genetycznych.

Optymalizację przeprowadzono przy zachowaniu pozostałych warunków narzuconych normami (PN-90/B-03200), (Eurokod-3) jak np.: wytrzymałość stali, parametry materiałowe, współczynniki długości wyboczeniowych itp.

Schemat przykładowej konstrukcji ramy pokazano na rysunku 6.3.

5.3. Implementacja komputerowa

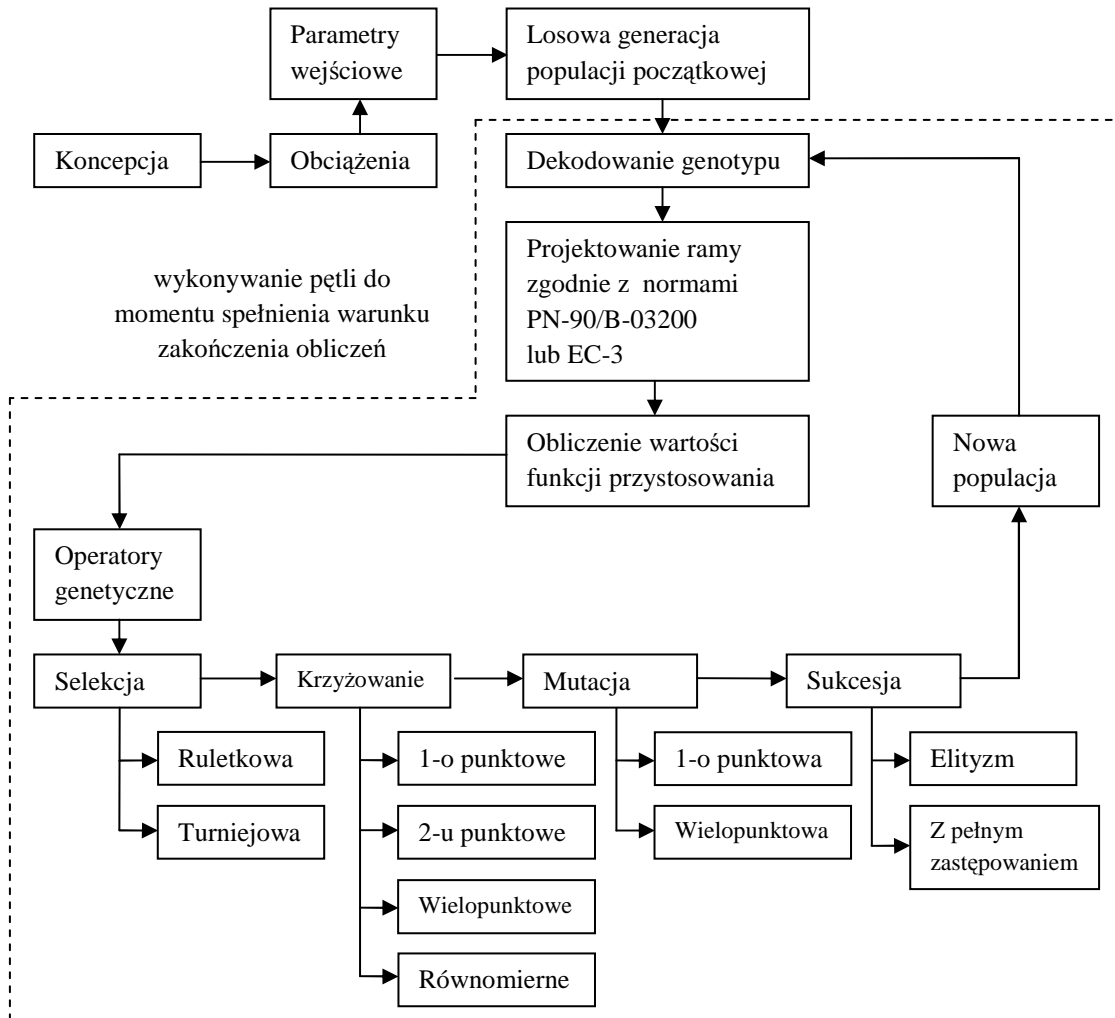
W ramach niniejszej pracy stworzono autorski program komputerowy służący do optymalizacji układów ramowych przy użyciu metody optymalizacji opartej na algorytmach genetycznych. Program stworzono przy użyciu języka programowania Fortran 90.

Program posiada moduł wymiarowania zgodnego z polską (aktualną na dzień dzisiejszy) normą do projektowania konstrukcji stalowych, a także z normą, która będzie obowiązywać od 2010 roku tj. Eurokodem – 3. W programie zakodowano również procedurę wyznaczania sił wewnętrznych przy użyciu bezpośredniej metody przemieszczeń, co pozwala na kompleksowe rozwiązanie opisywanego problemu. Program zawiera również moduł do wyznaczania sił krytycznych dla elementów ściskanych. Wykorzystano do tego celu BMP. Program wyszukuje pierwiastki odpowiednich równań i na ich podstawie oblicza siły krytyczne oraz długości wyboczeniowe prętów.

Stworzony program o nazwie GAAD (Genetic Algorithms Aided Design), po wyposażeniu go w przyjazny dla użytkownika interfejs, może być wykorzystany jako narzędzie inżynierskie wspomagające projektowanie konstrukcji stalowych.

5.3.1. Struktura programu optymalizacji z zastosowaniem AG

Strukturę programu komputerowego optymalizującego problem metodą opartą na algorytmach genetycznych przedstawiono na poniższym schemacie (rysunek 5.4).



Rysunek 5.4 Schemat procesu projektowania konstrukcji ramowej (podejście wykorzystujące algorytmy genetyczne)

Poniżej opisano poszczególne etapy schematu zamieszczonego na rysunku 5.4:

- etap koncepcji i zebrania obciążeń – jak w 5.1.1.
- moduł parametry wejściowe: definiuje niezbędne do działania algorytmu genetycznego dane, min.: liczebność populacji początkowej i potomnych, typ preselekcji, prawdopodobieństwo i sposób krzyżowania, prawdopodobieństwo i sposób mutacji, typ sukcesji
- moduł generacji populacji początkowej: tworzenie populacji początkowej polegające na wylosowaniu (z wykorzystaniem jednostajnego rozkładu

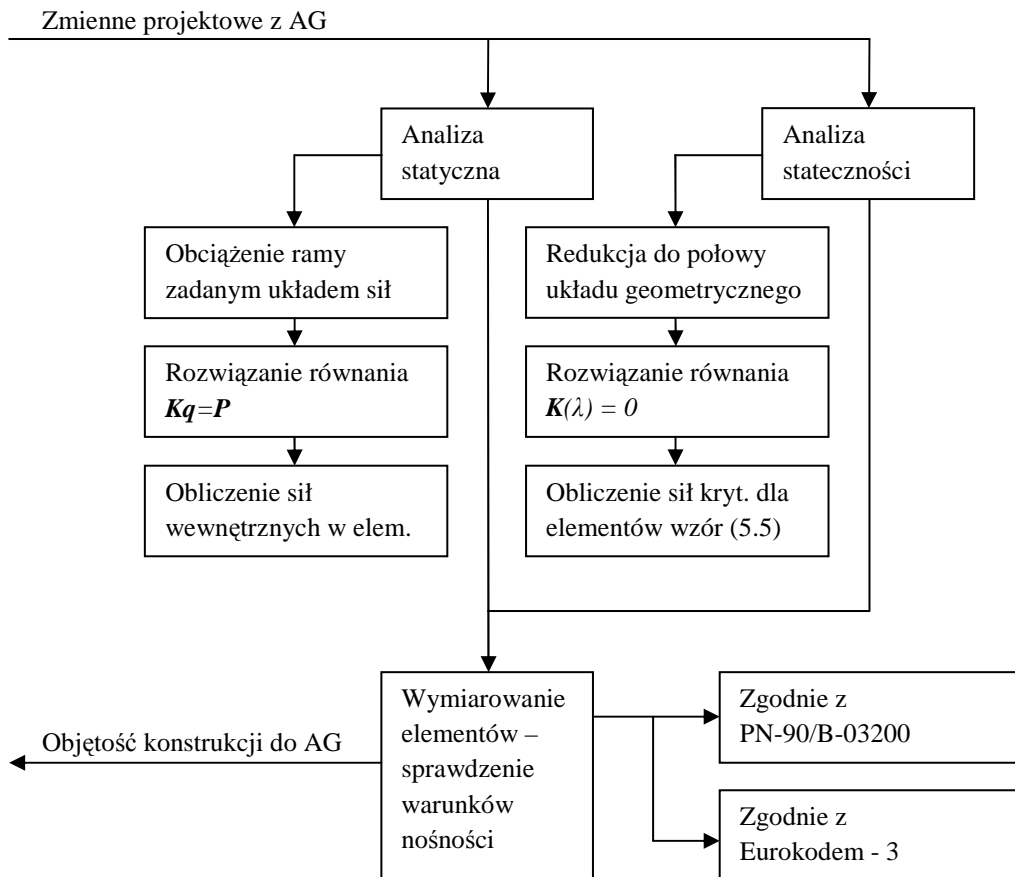
prawdopodobieństwa) spośród dostępnych możliwych (z uwagi na ograniczenia), osobników do populacji początkowej, w liczbie odpowiadającej liczebności populacji początkowej zdefiniowanej w module parametrów wejściowych

- moduł dekodowania genotypu: ma za zadanie zamianę ciągu liczb (kodowanie dziesiętne), na wielkości niezbędne do dalszych obliczeń tj.: wysokości środników słupów i rygła, grubości środników elementów składowych słupów i rygła, grubości i szerokości pasów elementów składowych słupów i rygła
- moduł projektowania ramy zgodnie z normami PN-90/B-03200 lub Eurokod-3 opisano w punkcie 5.3.2.
- moduł obliczania wartości funkcji przystosowania: oblicza wartość tej funkcji dla masy całej konstrukcji odpowiadającej poszczególnym osobnikom
- moduł selekcji: na podstawie wyliczonych wcześniej wartości przystosowania poszczególnych osobników w populacji w module tym następuje wybór osobników do dalszych operacji genetycznych, wybór ten może być dokonywany na drodze selekcji ruletkowej, turniejowej lub rangowej, dodatkowo można wykorzystać (lub nie) elityzm
- moduł krzyżowania: możliwe jest wykorzystanie jednego z następujących schematów: krzyżowanie jednopunktowe, krzyżowanie dwupunktowe, krzyżowanie wielopunktowe (ilość punktów krzyżowania jest losowana przez program), lub krzyżowanie uśredniające. Prawdopodobieństwo krzyżowania określone jest w module parametry wejściowe
- moduł mutacji: prawdopodobieństwo mutacji określono w module parametry wejściowe i dla takiego prawdopodobieństwa przeprowadzony jest proces mutacji jednopunktowej (dla losowo wybranego genu) lub wielopunktowej dla każdego genu oddzielnie
- moduł sukcesji: zdecydowano się na zrezygnowanie z nacisku selektywnego na tym etapie algorytmu i wykorzystano sukcesję z pełnym zastępowaniem

Schemat na rysunku 5.4 zawiera pętlę ewolucyjną, która obejmuje operacje od dekodowania genotypu do stworzenia nowej populacji. Pętla jest wykonywana do chwili spełnienia warunku zakończenia obliczeń.

5.3.2. Struktura programu dla projektowania według PN-90/B-03200 / Eurokod-3

Struktura programu obliczającego siły wewnętrzne w elementach ramy i wymiarującego poszczególne elementy ramy przedstawiona została na poniższym schemacie (rysunek 5.5).



Rysunek 5.5 Schemat procesu projektowania (wymiarowania) konstrukcji ramowej w oparciu o PN-90/B-03200 / Eurokod-3

Poszczególne moduły programu opisano poniżej:

- moduł analizy statycznej: w module tym definiowane są niezbędne informacje potrzebne do obliczeń tj.: wektor alokacji, wektor obciążeń \mathbf{P} ; na podstawie tych danych oraz danych dotyczących geometrii i sztywności poszczególnych elementów słupów i rygla ramy tworzona jest macierz sztywności \mathbf{K} , a następnie rozwiązywany jest układ równań:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{q} = \mathbf{P} \quad (5.1)$$

gdzie: \mathbf{K} – macierz sztywności układu, \mathbf{q} – wektor niewiadomych przemieszczeń węzłowych, \mathbf{P} - wektor zdefiniowanych obciążeń

Układ równań rozwiązywany jest poprzez rozwiązanie dwóch zastępczych układów równań:

$$\mathbf{L} \cdot \mathbf{y} = \mathbf{P} \quad (5.2)$$

$$\mathbf{U} \cdot \mathbf{q} = \mathbf{y} \quad (5.3)$$

w których: \mathbf{L} – dolna macierz trójkątna z jedynkami na głównej przekątnej, \mathbf{U} – górna macierz trójkątna, takie że:

$$\mathbf{K} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{U} \quad (5.4)$$

Rozłożenia macierzy \mathbf{K} na macierze trójkątne \mathbf{L} i \mathbf{U} dokonuje się tzw. zwartą metodą Crouta, która jest odmianą eliminacji Gaussa (Rakowski G., Kacprzyk Z., 2005)

- moduł analizy stateczności stworzono w oparciu o wskazówki zawarte w monografii Branicki (1999) oraz Nowacki (1974). W module tym do obliczeń sił krytycznych (P_{kr}) w elementach ściskanych o długości l , użyto zredukowanego do połowy układu geometrycznego (z zadanymi już cechami geometryczno - fizycznymi) oraz wybrano element belkowy jako najbardziej odpowiedni dla obliczanego układu (proste i szybkie obliczenia oraz wystarczająco dokładne wyniki). Dla tak przygotowanego układu tworzy się macierz sztywności konstrukcji – $\mathbf{K}(\lambda)$ w zależności od sił osiowych S , wykorzystując wzory

transformacyjne w funkcji λ opisujące zachowanie się pręta ściskanego (teoria II rzędu małych przemieszczeń), gdzie λ wyraża się następującym wzorem:

$$\lambda^2 = (P_{kr} \cdot l^2) / (E \cdot J) \quad (5.5)$$

w którym: E – moduł Younga dla stali, J – moment bezwładności względem osi prostopadłej do płaszczyzny wyboczenia; następnie rozwiązuje się równanie:

$$K(\lambda) = 0 \quad (5.6)$$

przy czym rozwiązanie równania w programie dokonuje się metodą iteracji wyznacznikowych (poszukiwania takich wartości λ , dla których będzie spełnione równanie (5.6))

- moduł wymiarowania elementów – sprawdzenia warunków nośności: w module tym w zależności od przyjętej normy do projektowania zawarto wszystkie niezbędne warunki nośności (SGN) i użytkowania (SGU), tak, aby otrzymany wynik w postaci optymalnej konstrukcji ramowej mógł być wykorzystany w realnym obiekcie. Warunki nośności i użytkowania zostały zapisane i opisane w rozdziale 2 niniejszej pracy.

6. Optymalizacja ram zgodnie z EC-3

W niniejszym rozdziale sformułowano problem optymalizacji, dobrano parametry algorytmu genetycznego oraz opisano wyniki optymalizacji szeregu ram portalowych. Optymalizację przeprowadzono przy wykorzystaniu autorskiego programu komputerowego (GAAD) opisanego w rozdziale 5. Program pozwala na optymalizację dowolnej portalowej ramy parterowej.

6.1. Sformułowanie problemu optymalizacji

Rozważana jest optymalizacja konstrukcji zgodnie z opisem przedstawionym w punkcie 5.2. Sformułowanie problemu optymalizacji polega na: określeniu parametrów optymalizacji (założeń), określeniu wektora zmiennych projektowych, przyjęciu funkcji celu oraz określeniu ograniczeń. W niniejszej pracy rozpatrzono dwa rodzaje przekrojów elementów składowych ram – przekroje monosymetryczne (o różnych szerokościach i grubościach pólki) oraz przekroje bisymetryczne.

6.1.1. Monosymetryczne przekroje elementów składowych ram

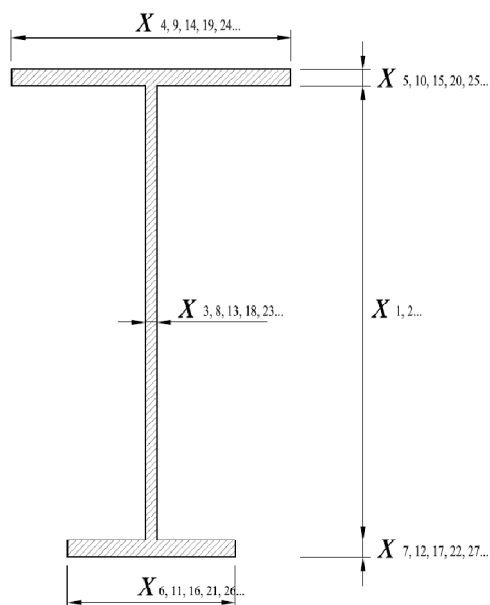
Parametrami optymalizacji w opisywanym przypadku są:

- geometria ramy (wysokość oraz podział słupów, rozpiętość oraz podział rygla),
- geometria przekroju (przekrój monosymetryczny)
- obciążenia ramy (zgodnie z odpowiednimi normami – rozdział 2),
- materiał – przyjęto stal o module Younga równym 215 GPa.

Wektor zmiennych projektowych x składa się ze zmiennych opisujących:

- Wysokość środnika słupa – zmienna x_1 (zaprojektowano słup o stałej wysokości środnika). Zmienna w zakresie 350 do 1700 mm skokowo co 50 mm.
- Wysokość środnika rygla – zmienna x_2 (zaprojektowano rygiel o stałej wysokości środnika). Zmienna w zakresie 350 mm do 1700 mm skokowo co 50mm.
- Grubość środnika jednego z elementów – zmienne $x_{3,8,13,18,23...}$ Zmienne w zakresie 4mm do 16 mm skokowo co 1 mm.
- Szerokość półki górnej jednego z elementów – zmienne $x_{4,9,14,19,24..}$ (zaprojektowano elementy o przekrojach monosymetrycznych). Zmienne w zakresie 50 mm do 800 mm skokowo co 5 mm.
- Grubość półki górnej jednego z elementów – zmienne $x_{5,10,15,20,25...}$ Zmienne w zakresie 4 mm do 30 mm skokowo co 2 mm.
- Szerokość półki dolnej jednego z elementów – zmienne $x_{6,11,16,21,26...}$ Zmienne w zakresie 50 mm do 800 mm skokowo co 5 mm.
- Grubość półki dolnej jednego z elementów – zmienne $x_{7,12,17,22,27...}$ Zmienne w zakresie 4 mm do 30 mm skokowo co 2 mm.

Oznaczenia zmiennych projektowych opisano na rysunku 6.1.



Rysunek 6.1 Oznaczenia zmiennych projektowych w przypadku przekrojów monosymetrycznych

W przypadku ramy symetrycznej składającej się np.: ze słupów podzielonych na dwie części, z rygła podzielonego na pięć części; wektor zmiennych projektowych będzie składał się z 27 zmiennych i przyjmie postać (6.1)

$$\mathbf{x}=(x_1,x_2,\dots,x_{27}) \quad (6.1)$$

W wektorze tym zmienne x_1 i x_2 określają wysokości środków słupów i rygła, zmienne x_3 do x_7 to pozostałe parametry geometryczne części dolnej słupa, zmienne x_8 do x_{12} są parametrami części górnej słupa, zmienne x_{13} do x_{17} określają geometrię części rygła połączonej ze słupem, zmienne x_{18} do x_{22} określają geometrię przejściowej części rygła, natomiast zmienne x_{23} do x_{27} opisują geometrię przęsłowej części rygła.

Wobec powyższego chromosom (wektor zmiennych projektowych) jednego osobnika składa się w opisywanym przypadku z 27 genów (zmiennych projektowych).

Celem optymalizacji w rozpatrywanym problemie jest zminimalizowanie objętości (V) konstrukcji stalowej ramy, zatem problem ma postać:

$$\text{Minimalizacja } V(\mathbf{x}) \quad (6.2)$$

Otrzymane w wyniku procesu optymalizacji geometrie ram muszą spełniać ograniczenia zgodne z zasadami opisanymi w rozdziale 2. Poniżej wyszczególniono i opisano listę ograniczeń jakie powinny być spełnione dla każdego elementu składowego ramy i dla ramy jako całości, aby rezultat – optymalna konstrukcja ramowa, mogła być wykorzystana do realnych zagadnień inżynierskich:

- ograniczenie $g_1(\mathbf{x})$ – zapewnienie nośności przekroju przy ścinaniu (Rozdział 2, podpunkt 2.3.3.1., wzór (2.1)),
- ograniczenie $g_2(\mathbf{x})$ – zapewnienie nośności przekroju na ścinanie ze zginaniem na pierwszym końcu elementu (Rozdział 2, podpunkt 2.3.3.1., wzór (2.2)),
- ograniczenie $g_3(\mathbf{x})$ – zapewnienie nośności przekroju na ścinanie ze zginaniem na drugim końcu elementu (Rozdział 2, podpunkt 2.3.3.1., wzór (2. 2)),
- ograniczenie $g_4(\mathbf{x})$ – zapewnienie nośności przekroju przy rozciąganiu (Rozdział 2, podpunkt 2.3.3.1., wzór (2. 3)),
- ograniczenie $g_5(\mathbf{x})$ – zapewnienie nośności przekroju przy ściskaniu (Rozdział 2, podpunkt 2.3.3.1., wzór (2. 4)),

- ograniczenie $g_6(\mathbf{x})$ – zapewnienie nośności przekroju na rozciąganie ze zginaniem na pierwszym końcu elementu (Rozdział 2, podpunkt 2.3.3.1., wzór (2. 5)),
- ograniczenie $g_7(\mathbf{x})$ – zapewnienie nośności przekroju na rozciąganie ze zginaniem na drugim końcu elementu (Rozdział 2, podpunkt 2.3.3.1., wzór (2. 5)),
- ograniczenie $g_8(\mathbf{x})$ – zapewnienie nośności przekroju na ściskanie ze zginaniem na pierwszym końcu elementu (Rozdział 2, podpunkt 2.3.3.1., wzór (2. 6)),
- ograniczenie $g_9(\mathbf{x})$ – zapewnienie nośności przekroju na ściskanie ze zginaniem na drugim końcu elementu (Rozdział 2, podpunkt 2.3.3.1., wzór (2. 6)),
- ograniczenie $g_{10}(\mathbf{x})$ – zapewnienie nośności elementu przy ścisaniu z uwzględnieniem współczynników niestateczności globalnej dla wyboczenia w kierunku osi większego momentu bezwładności (Rozdział 2, podpunkt 2.3.3.2., wzór (2.8)),
- ograniczenie $g_{11}(\mathbf{x})$ – zapewnienie nośności elementu przy ścisaniu z uwzględnieniem współczynników niestateczności globalnej dla wyboczenia w kierunku osi mniejszego momentu bezwładności (Rozdział 2, podpunkt 2.3.3.2., wzór (2.8))
- ograniczenie $g_{12}(\mathbf{x})$ – zapewnienie nośności elementu przy zginaniu z uwzględnieniem współczynników niestateczności globalnej dla zwichrzenia (Rozdział 2, podpunkt 2.3.3.2., wzór (2.9))
- ograniczenie $g_{13}(\mathbf{x})$ – zapewnienie nośności elementu przy ścisaniu ze zginaniem z uwzględnieniem współczynników niestateczności globalnej dla wyboczenia w kierunku osi większego momentu bezwładności oraz dla zwichrzenia (Rozdział 2, podpunkt 2.3.3.2., wzór (2.10))
- ograniczenie $g_{14}(\mathbf{x})$ – zapewnienie nośności elementu przy ścisaniu ze zginaniem z uwzględnieniem współczynników niestateczności globalnej dla wyboczenia w kierunku osi mniejszego momentu bezwładności oraz dla zwichrzenia (Rozdział 2, podpunkt 2.3.3.2., wzór (2.11))
- ograniczenie $g_{15}(\mathbf{x})$ – ograniczenie smukłości ścianek oraz zapewnienie spawalności środnika z półkami (dobór odpowiednich grubości środnika i półek), zgodnie z (PN-EN 1993 -1-8)

- ograniczenie $g_{16}(\mathbf{x})$ – zapewnienie ograniczenia przemieszczeń poziomych ramy i pionowych ugięć rygla tak aby spełnione były warunki normowe (Rozdział 2, podpunkt 2.3.4., wzór (2.12), (2.13))

Problem optymalizacji rozwiązywano formułując odpowiednie zadanie bez ograniczeń i wykorzystując koncepcję funkcji kary opisanych w rozdziale 4 (funkcje kary). Ostateczna postać funkcji celu przedstawiono w rozdziale 6, podpunkt 6.2.1.1.

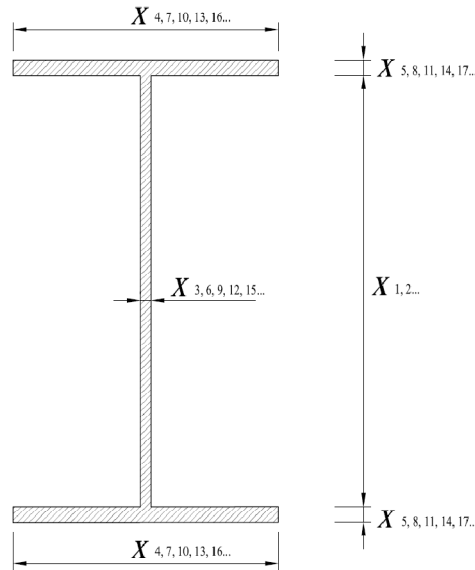
6.1.2. Bisymetryczne przekroje elementów składowych ram

Parametry optymalizacji nie zmieniły się w stosunku do parametrów opisanych w punkcie 6.1.1. Jediną różnicą jest kształt przekroju elementu składowego ramy (przekrój bisymetryczny).

Wektor zmiennych projektowych \mathbf{x} składa się ze zmiennych opisujących:

- Wysokość środnika słupa – zmienna x_1 (zaprojektowano słup o stałej wysokości środnika). Zmienna w zakresie 350 do 1700 mm skokowo co 50 mm.
- Wysokość środnika rygla – zmienna x_2 (zaprojektowano rygiel o stałej wysokości środnika). Zmienna w zakresie 350 mm do 1700 mm skokowo co 50 mm.
- Grubość środnika jednego z elementów – zmienne $x_{3,6,9,12,15...}$ Zmienne w zakresie 4 mm do 16 mm skokowo co 1 mm.
- Szerokość półki jednego z elementów – zmienne $x_{4,7,10,13,16..}$ (zaprojektowano elementy o przekrojach monosymetrycznych). Zmienne w zakresie 50 mm do 800 mm skokowo co 5 mm.
- Grubość półki jednego z elementów – zmienne $x_{5,8,11,14,17...}$ Zmienne w zakresie 4 mm do 30 mm skokowo co 2 mm.

Oznaczenia zmiennych projektowych opisano na rysunku 6.2.



Rysunek 6.2 Oznaczenia zmiennych projektowych w przypadku przekrojów bisymetrycznych

W przypadku ramy symetrycznej składającej się np.: ze słupów podzielonych na dwie części, z rygła podzielonego na pięć części; wektor zmiennych projektowych będzie składał się z 17 zmiennych i przyjmie postać (6.3)

$$\mathbf{x}=(x_1,x_2,\dots,x_{17}) \quad (6.3)$$

W wektorze tym zmienne x_1 i x_2 określają wysokości środników słupów i rygła, zmienne x_3 do x_5 to pozostałe parametry geometryczne części dolnej słupa, zmienne x_6 do x_8 są parametrami części górnej słupa, zmienne x_9 do x_{11} określają geometrię części rygła połączonej ze słupem, zmienne x_{12} do x_{14} określają geometrię przejściowej części rygła, natomiast zmienne x_{15} do x_{17} opisują geometrię przęsłowej części rygła.

Wobec powyższego chromosom (wektor zmiennych projektowych) jednego osobnika składa się w opisywanym przypadku z 17 genów (zmiennych projektowych).

Celem optymalizacji w rozpatrywanym problemie jest zminimalizowanie objętości (V) konstrukcji stalowej ramy, zatem funkcja celu ma postać opisaną wyrażeniem (6.2).

Otrzymane w wyniku procesu optymalizacji geometrie ram muszą spełniać ograniczenia zgodne z zasadami opisanymi w rozdziale 2, które wyszczególniono i opisano w punkcie 6.1.1.

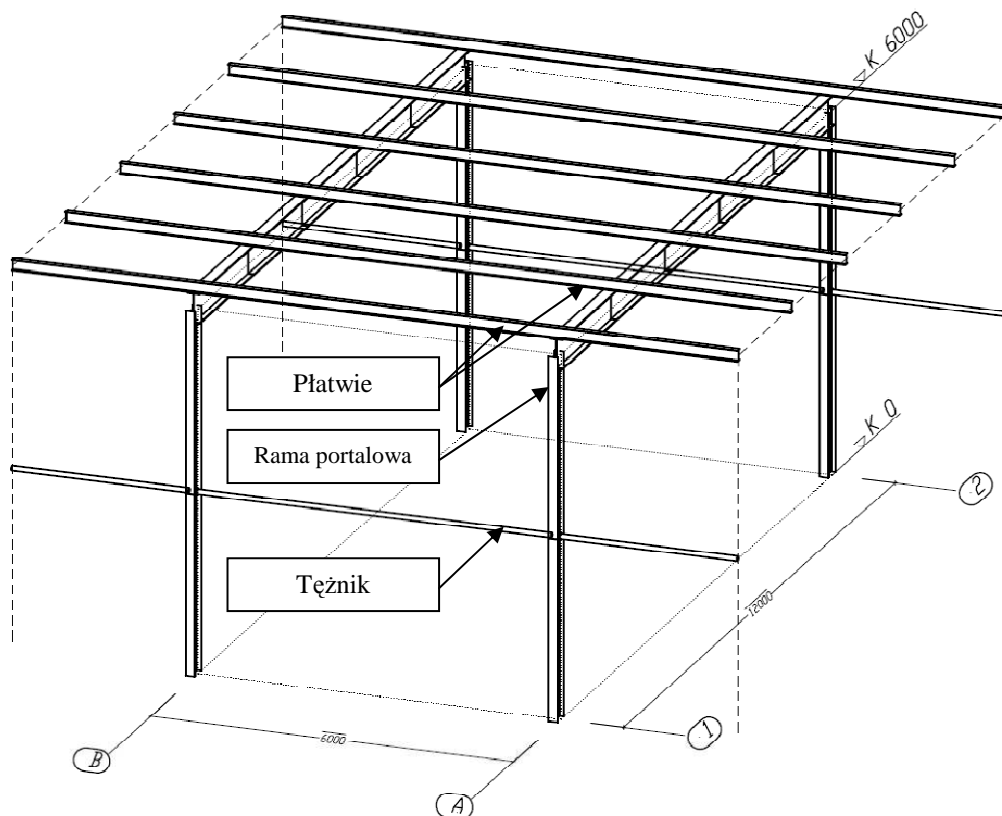
Podobnie jak w przypadku problemu sformułowanego w punkcie 6.1.1. problem optymalizacji rozwiązywano dla funkcji celu eliminujących ograniczenia, opisanych w rozdziale 4 (koncepcja funkcji kary). Wynikowa postać funkcji celu przedstawiono w rozdziale 6, podpunkt 6.2.1.1.

6.2. Rozwiązanie problemu

W celu zaprezentowania działania opracowanego programu oraz skuteczności metody optymalizacji opartej o AG, przedstawiono rozwiązanie przykładowego problemu optymalizacji. W rozpatrywanym przykładzie:

- rama składa się ze słupów o wysokości 6 m, przegubowo połączonych z fundamentami,
- rygiel ma rozpiętość 12 m, na ryglu opierają się płatwie w rozstawie co 2,4 m,
- słupy podzielone są na dwie części o wysokości 3 m każda,
- rygiel podzielony jest na 5 części o długości 2,4 m każda,
- rozstaw ram wynosi 6 m,
- obciążenia ciężarem własnym konstrukcji, ciężarem poszycia, śniegiem (strefa II) oraz wiatrem (strefa I), zgodnie z tabelą (Tablica 2.1 Zestawienie obciążeń wg Norm Europejskich).

Powyższe założenia przedstawiono na rysunku 6.3. Na rysunku pokazano fragment konstrukcji, którego częścią (głównym ustrojem nośnym) jest optymalizowana rama portalowa.



Rysunek 6.3 Fragment konstrukcji stalowej obiektu

6.2.1. Dobór parametrów

Algorytm genetyczny, którego opis działania zawarto w Rozdziale 4, wymaga podania odpowiednich parametrów. Jest wiele możliwości i kombinacji ich doboru. W zależności od zmiany tych parametrów zmienia się również zachowanie algorytmu genetycznego. Ideałem można nazwać algorytm, który w możliwie krótkim czasie (mała liczba iteracji) znajduje optymalny chromosom (wektor zmiennych projektowych). Aby tak się stało należy „ustawić” algorytm pod kątem:

- odpowiedniego nacisku selektywnego, tzn. takiego w przypadku którego algorytm będzie szybko zwiększał średnią wartość przystosowania populacji, przy jednoczesnym zachowaniu zdolności do eksploracji obszaru dopuszczalnego,
- odpowiedniego poziomu eksploracji, tzn. zdolności algorytmu do przeszukiwania całego obszaru dopuszczalnego i odporności algorytmu na przyciąganie lokalnych ekstremów,

- odpowiedniego poziomu eksploatacji, czyli zdolności algorytmu do znalezienia minimum lokalnego w danym obszarze „poszukiwać”.

Sposób działania algorytmu genetycznego najczęściej jest charakteryzowany za pomocą tzw. krzywej zbieżności, która opisuje zachowanie się algorytmu w czasie (faktycznie oś pozioma opisuje nie czas lecz liczbę iteracji). Funkcjonowanie algorytmu charakteryzowane jest za pomocą średniej wartości przystosowania całej populacji, poddanej działaniu algorytmu genetycznego. Krzywe zbieżności kreśli się jako średnią z krzywych dla wielu niezależnych uruchomień, co pozwala na uzyskanie bardziej reprezentatywnych wyników.

Ustawienie algorytmu genetycznego polega na dobraniu następujących parametrów (opisanych szczegółowo w Rozdziale 4):

- sposób oceny środowiska (funkcja przystosowania): funkcja kary śmierci, funkcja kary zewnętrznej,
- liczebność populacji,
- metoda preselekcji: ruletkowa, turniejowa, rangowa,
- metoda krzyżowania: wymieniające jednopunktowe, wymieniające wielopunktowe, równomierne,
- prawdopodobieństwo krzyżowania,
- rodzaj mutacji: jednopunktowa, wielopunktowa,
- prawdopodobieństwo mutacji,
- metoda postselekcji (sukcesji): z pełnym zastępowaniem, elitarna.

W celu rozwiązania przyjętego przykładu przyjęto (zgodnie z zapisami w Rozdziale 4) kodowanie dziesiętne. W związku z powyższym chromosom w rozpatrywanym przykładzie składa się z 27 genów będących liczbami całkowitymi. Populacja bazowa tworzona jest za pomocą pseudolosowego generatora liczb losowych, a każdy osobnik prezentowany jest za pomocą odpowiedniego chromosomu.

Rozdział 6.2.1 poświęcono dobraniu parametrów algorytmu genetycznego w taki sposób, aby zwiększyć wartość przystosowania osobników przy jednoczesnym zmniejszeniu liczby iteracji potrzebnych do otrzymania optymalnego wyniku.

6.2.1.1. Dobór sposobu oceny środowiska

W prezentowanej pracy przyjęto sposób oceny środowiska oparty na koncepcji funkcji kary (Rozdział 4, punkt 4.4). Rozpatrzono dwie postacie funkcji kary:

- funkcję kary śmierci,
- funkcję kary zewnętrznej.

Funkcje kary śmierci wyczerpująco opisano w Rozdziale 4, punkcie 4.4. Dla funkcji kary zewnętrznej przedstawiono jedynie wzór ogólny, w którym dla poprawnego (w myśl zapisów w Rozdziale 6, punkt 6.2.1) działania algorytmu należy dobrać dwa parametry. Są nimi: współczynnik kary r , stopień potęgi α do której podnoszona jest różnica pomiędzy aktualną wartością ograniczenia, a dopuszczalną wartością ograniczenia (w przypadku, gdy ograniczenie zostało przekroczone). Stopień potęgi przyjęto równy 2, sugerując się w tym przypadku wartościami spotykanymi w literaturze (Szymczak (1998)), Nanakorn, Meesomklin (2001)). W rozpatrywanym przykładzie funkcja przystosowania oparta na koncepcji funkcji kary śmierci ma postać:

$$F(\mathbf{x}) = C / V(\mathbf{x}) \quad (6.3)$$

a w przypadku funkcji kary zewnętrznej postać:

$$F(\mathbf{x}) = C / \{V(\mathbf{x}) \cdot \{1 + r \cdot \sum [G_j(\mathbf{x})]^2\}\} \quad (6.4)$$

gdzie:

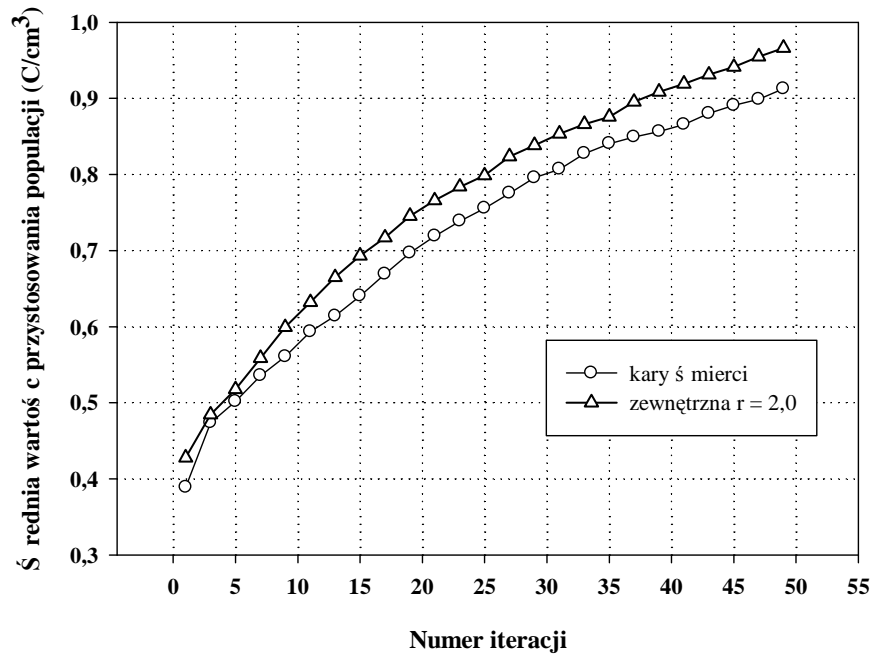
$$G_j(\mathbf{x}) = \max [0, g_j(\mathbf{x}) - 1]^2 \quad (6.5)$$

przy czym uwzględniane są ograniczenia:

$$g_j(\mathbf{x}) \leq 1, \quad j = 1 \dots 17 \quad (6.6)$$

Współczynnik C jest dodatkowo wprowadzonym współczynnikiem mającym za zadanie zwiększyć czytelność wyników, natomiast współczynnik kary r dobrano doświadczalnie na podstawie przeprowadzonych prób, a wynik przedstawiono na Rysunku 6.3. Zastosowana funkcja kary zewnętrznej jest funkcją adaptacyjną, gdyż

kara (w postaci dodatkowej objętości dodawanej w mianowniku), zależy od objętości konstrukcji, której wartość przystosowania jest przedmiotem kalkulacji.

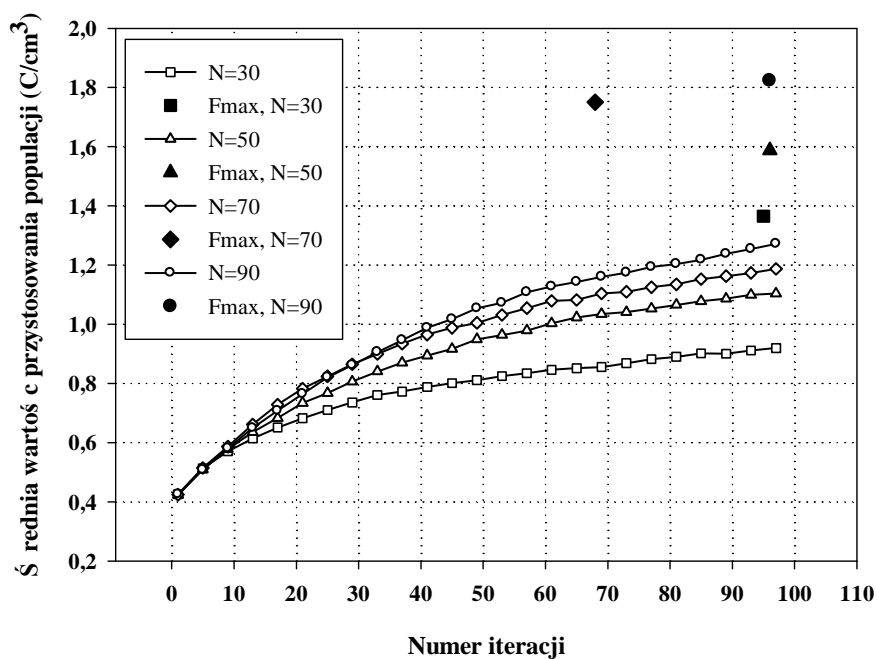


Rysunek 6.3 Krzywe zbieżności (uśrednione dla 50 uruchomień) w zależności od przyjętego sposobu oceny środowiska

Wyniki na Rysunku 6.3 odzwierciedlają przypuszczenia, które opisano w punkcie 4.4. W przypadku zbyt dużego współczynnika kary, funkcja kary zewnętrznej w rzeczywistości staje się funkcją kary śmierci (co sprawdzono stosownymi próbami), lecz w przypadku odpowiedniego doboru tego współczynnika należało się spodziewać wyższych wartości funkcji przystosowania ponieważ „dobre” osobniki nie były usuwane (tak jak miałyby to miejsce w przypadku funkcji kary śmierci) z populacji, lecz jedynie „karane” i miały szansę zmienić swój chromosom (zmienić geometrię) tak, aby spełniać ograniczenia i móc być wykorzystanym w rzeczywistych zagadnieniach inżynierskich. W dalszych rozważaniach przyjęto, iż środowisko oceniane będzie przy pomocy adaptacyjnej funkcji kary zewnętrznej ze współczynnikiem r równym 2.

6.2.1.2. Dobór liczebności populacji

Liczebność populacji ma istotne znaczenie z punktu widzenia kosztu obliczeń komputerowych (koszt symulacji). Jako koszt symulacji przyjęto liczbę wywołań wartości funkcji przystosowania. Liczba wywołań wartości funkcji przystosowania rośnie liniowo wraz ze wzrostem liczebności populacji. Należy zatem tak dobrać liczebność populacji, aby uzyskiwać podczas symulacji możliwie najlepsze wyniki przy możliwie najniższym koszcie (w rozpatrywanym przypadku, przy możliwie najmniejszej liczbie osobników w populacji). Zachowanie się algorytmu (krzywe zbieżności), a także uzyskiwane najlepsze wartości przystosowania w poszczególnych symulacjach w zależności od liczebności populacji, przedstawiono na Rys. 6.4.



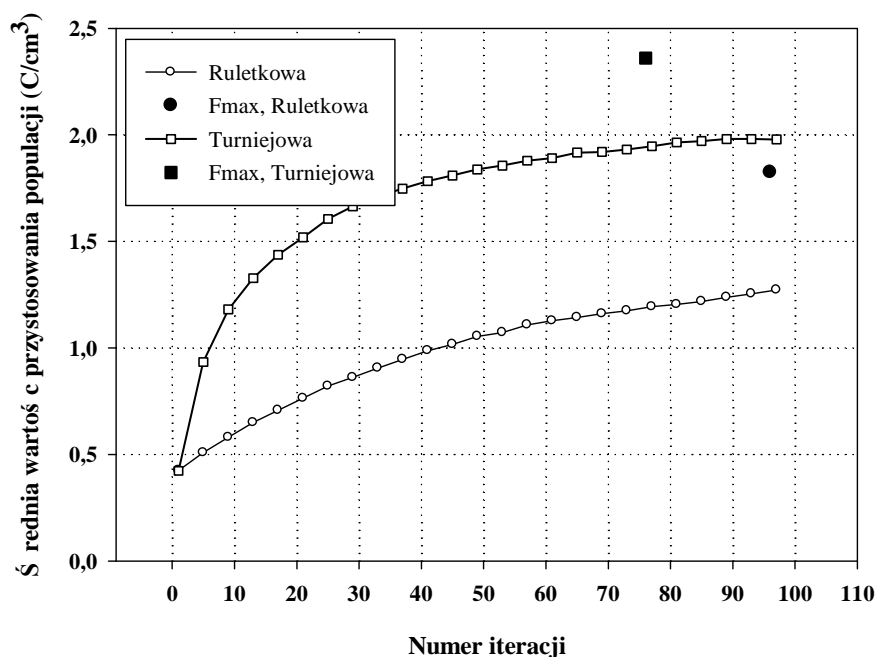
Rysunek 6.4 Krzywe zbieżności (uśrednione dla 50 uruchomień) oraz maksymalne wartości przystosowania, w zależności od liczebności populacji

W trakcie kolejnych symulacji, przeprowadzonych dla liczebności populacji N równej 30, 50, 70, 90, stwierdzono, porównując osobniki o największych wartościach przystosowania, że odpowiednia ilość osobników w populacji wynosi 90. Wynika to z faktu, iż po zmianie (zwiększeniu) ilości osobników w populacji z 70 na 90, wartość przystosowania najlepszych osobników różniła się zaledwie (na korzyść symulacji przy

bardziej licznej populacji) o 4%, co pozwala przypuszczać, iż dalsze zwiększanie liczebności populacji nie wpłynie znacznie na poprawę rozwiązania optymalnego. W dalszych obliczeniach przyjęto, że populacja liczy 90 osobników.

6.2.1.3. Dobór metody preselekcji

Preselekcja (reprodukcja) ukierunkowuje algorytm genetyczny w stronę rozwiązań poprawiających rozwiązania dotychczasowe. W niniejszej pracy i w stworzonym programie (rozdział 5, punkt 5.3.1.) rozpatrzono reprodukcję proporcjonalną (ruletkową) oraz turniejową. Na Rysunku 6.5 porównano krzywe zbieżności w zależności od zastosowanego schematu reprodukcji.



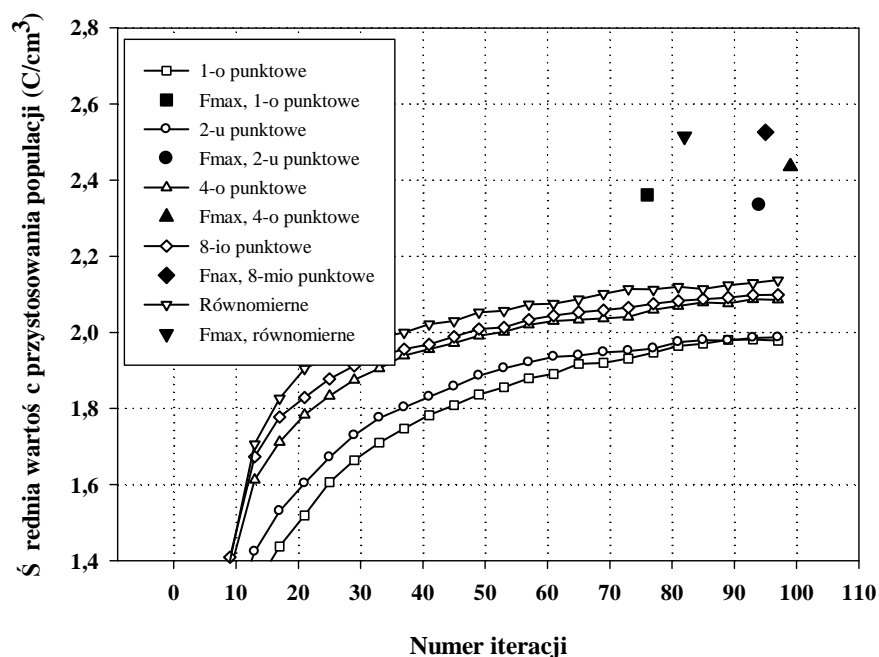
Rysunek 6.5 Krzywe zbieżności (uśrednione dla 50 uruchomień) oraz maksymalne wartości przystosowania w zależności od schematu reprodukcji

Rysunek 6.5 jednoznacznie wskazuje, iż w przypadku preselekcji turniejowej i większego nacisku selektywnego, nie tylko poprawia się zachowanie algorytmu (krzywa zbieżności szybciej przybiera charakter asymptotyczny), lecz także poprawiają się wartości przystosowania najlepszych osobników uzyskanych w trakcie symulacji. Na podstawie przeprowadzonych prób przyjęto, że w pierwszym kroku reprodukcji

turniejowej wybiera się 10 osobników (wszystkie 10-cio elementowe kombinacje są jednakowo prawdopodobne). Następnie dla tak przyjętej populacji przeprowadza się turniej na podstawie którego wyłania się zwycięskiego osobnika (o największej wartości funkcji przystosowania), a osobnik ten uczestniczy w następnych etapach algorytmu genetycznego. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń testowych w dalszych symulacjach przyjęto metodę reprodukcji turniejowej.

6.2.1.4. Dobór metody krzyżowania

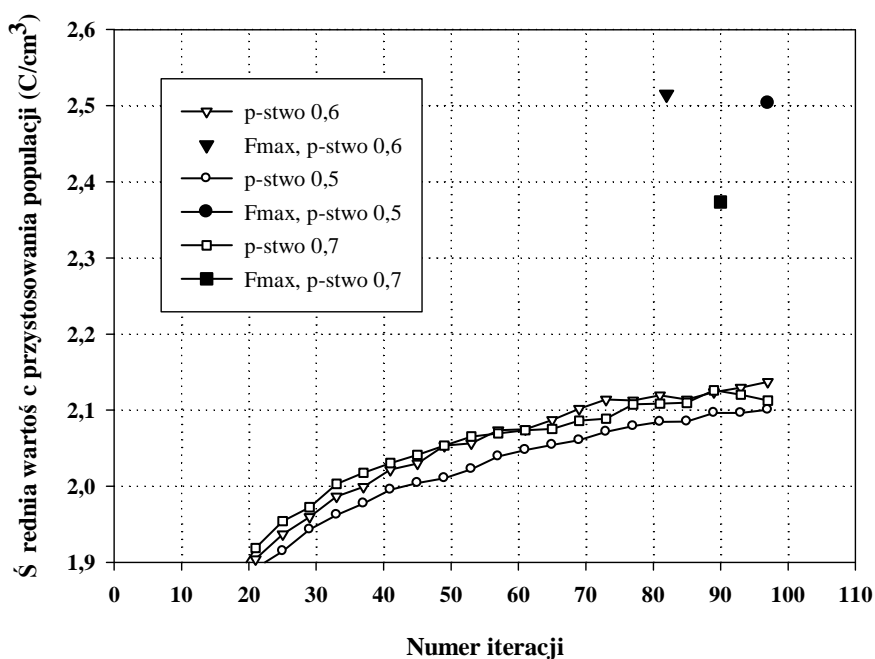
W przypadku operatora krzyżowania w programie GAAD zawarto instrukcje pozwalające wykorzystać trzy schematy krzyżowania: krzyżowanie wymieniające jednopunktowe, krzyżowanie wymieniające wielopunktowe oraz krzyżowanie równomierne (opisane szczegółowo w punkcie 4.6). Na Rys. 6.6 przedstawiono krzywe zbieżności, w zależności od zastosowanego schematu krzyżowania, z przyjętym prawdopodobieństwem krzyżowania równym 0,6.



Rysunek 6.6 Krzywe zbieżności oraz maksymalne wartości przystosowania w zależności od rodzaju operatora krzyżowania

Jak wynika z krzywych zbieżności, krzyżowanie równomiernie daje zbliżone wartości maksymalne funkcji przystosowania osobnika najlepszego, a także powoduje zwiększenie średniej wartości przystosowania populacji. W połączeniu z pozostałymi zaletami tego operatora krzyżowania można go sklasyfikować ponad operatorami o określonej liczbie rozcięć. W związku z powyższym zdecydowano się, iż w dalszych obliczeniach będzie używany właśnie operator krzyżowania równomiernego.

Na kolejnych wykresach (Rys. 6.7), zestawiono zachowanie algorytmu (krzywe zbieżności) dla kilku różnych prawdopodobieństw krzyżowania tj. dla wartości 0,5, 0,6 oraz 0,7.

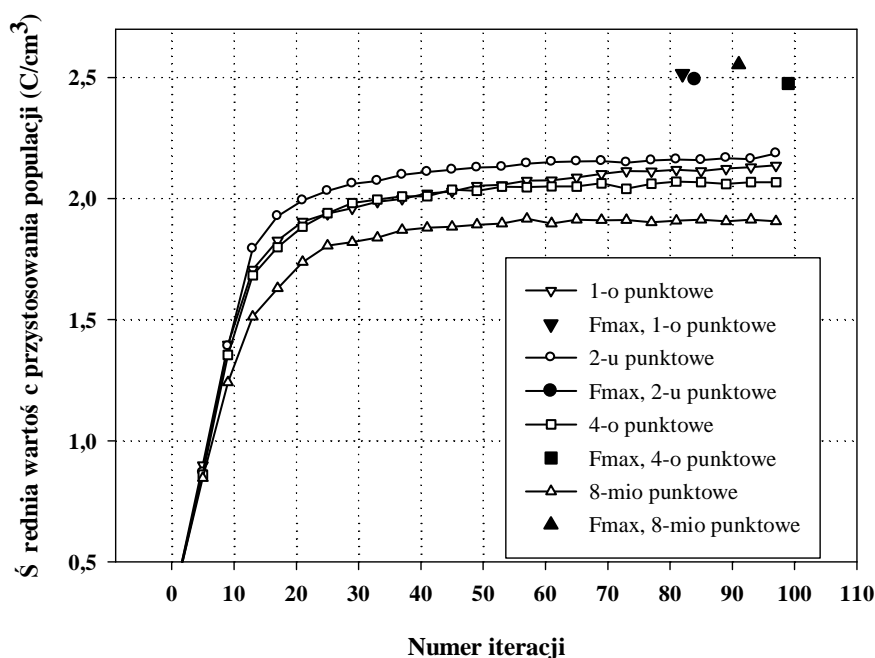


Rysunek 6.7 Krzywe zbieżności (uśrednione dla 50 uruchomień) oraz maksymalne wartości przystosowania w zależności od prawdopodobieństwa krzyżowania

Z wykresów na Rys. 6.7 wynika, iż uprzednio przyjęte i zalecane w literaturze wartości prawdopodobieństwa krzyżowania są poprawne i takie będą stosowane w kolejnych seriach obliczeń.

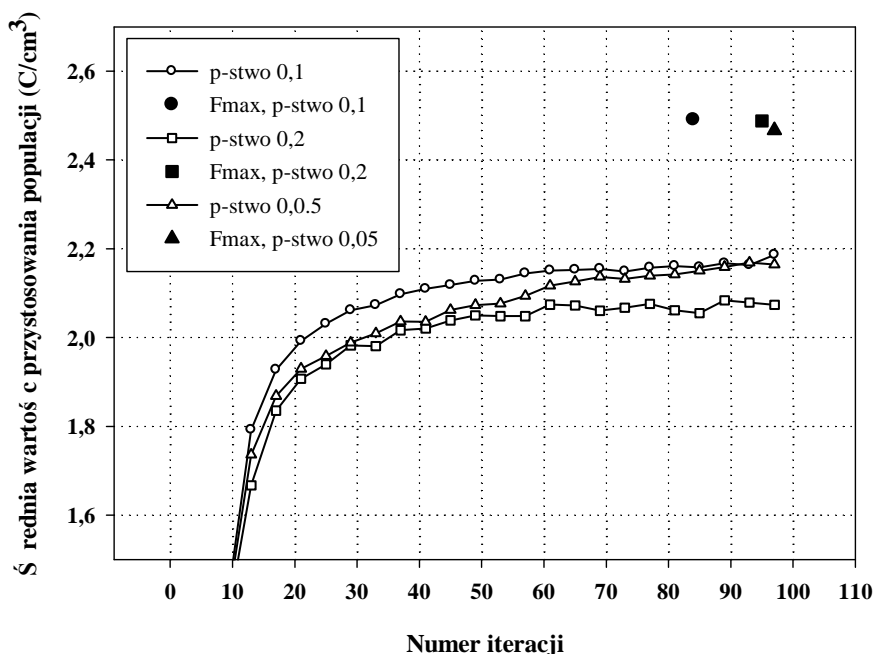
6.2.1.5. Dobór parametrów operatora mutacji

W stworzonym programie komputerowym GAAD (punkt 5.3.1.) zastosowano operatory mutacji, w przypadku których zmianie (mutacji) ulega jeden bądź wiele genów. Na Rysunku 6.8 porównano zachowanie się algorytmu genetycznego w zależności od liczby genów poddanych mutacji.



Rysunek 6.8 Krzywe zbieżności (uśrednione dla 50 uruchomień) oraz maksymalne wartości przystosowania w zależności od liczby mutowanych genów

Z wyników podanych na powyższych wykresach, wnioskuje się, iż liczba genów poddanych mutacji nie ma znaczącego wpływu na wartość przystosowania najlepszego osobnika, wpływa natomiast znacząco na zachowanie się całego algorytmu genetycznego i w związku z tym faktem zdecydowano się stosować w dalszych rozważaniach operator mutacji powodujący zmianę dwóch genów w chromosomie. Dla tak dobranego operatora przeprowadzono analizę dotyczącą wpływu prawdopodobieństwa mutacji na zachowanie się algorytmu oraz na wartość przystosowania dla najlepszego osobnika. Wyniki przeprowadzonej analizy zamieszczono na Rys. 6.9.

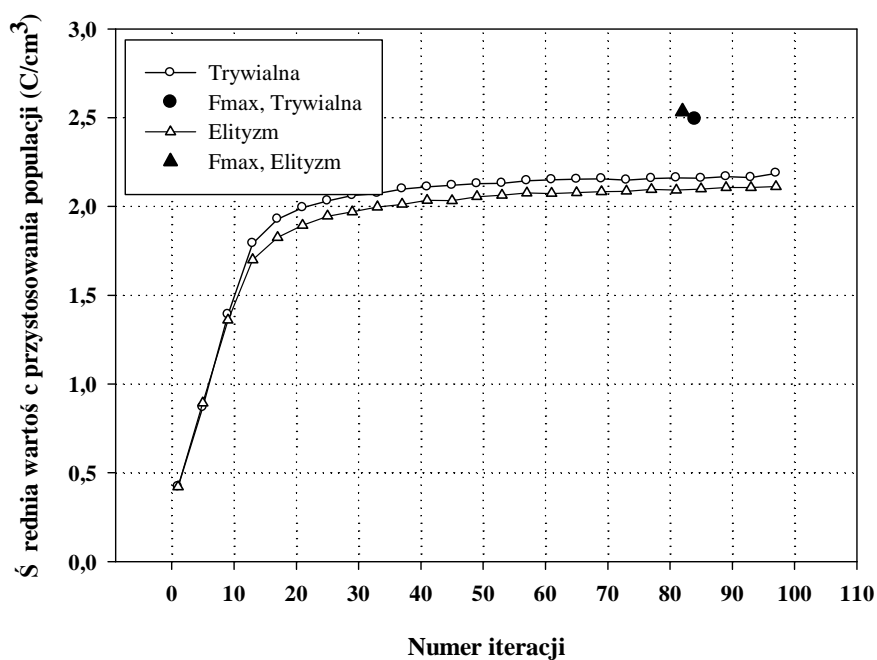


Rysunek 6.9 Krzywe zbieżności oraz maksymalne wartości przystosowania, w zależności od prawdopodobieństwa mutacji

Na podstawie przeprowadzonych symulacji przyjęto do dalszych procesów optymalizacji, prawdopodobieństwo mutacji równe 0,1. Wartość ta zbiega się z wartościami podawanymi w literaturze jako optymalne z punktu widzenia eksploracji i eksploatacji obszaru dopuszczalnego.

6.2.1.6. Dobór metody sukcesji

W opracowanym programie komputerowym dostępne są dwie metody sukcesji (Rysunek 5.3), elityzm oraz sukcesja z pełnym zastępowaniem (trywialna) (opisane w punkcie 4.8). W niniejszym podrozdziale przeprowadzono analizę wpływu rodzaju sukcesji (zwanej również postselekcją) na zachowanie się algorytmu genetycznego, a także na wynik w postaci osobnika o największej wartości funkcji przystosowania (Rys. 6.10).



Rysunek 6.10 Krzywe zbieżności oraz maksymalne wartości przystosowania, w zależności od metody sukcesji

Krzywe zbieżności podane na Rysunku 6.10, wskazują na znikomy wpływ metody sukcesji na zachowanie się analizowanego algorytmu, lecz w przypadku elityzmu otrzymujemy osobnika o większej wartości przystosowania. W związku z tym zdecydowano się wykorzystywać do dalszych symulacji sukcesję opartą na elityzmie.

6.2.2. Wyniki optymalizacji ram

Obliczenia wstępne przedstawione w punkcie 6.2.1 umożliwiły dobranie wszystkich parametrów algorytmu genetycznego zaczynając od metody preselekcji, poprzez operatory i parametry krzyżowania i mutacji, na metodzie sukcesji kończąc. Przyjęto również sposób oceny środowiska. Te parametry wykorzystano w algorytmie genetycznym, który posłużył do optymalizacji wszystkich przykładów obliczeniowych.

Poniżej przedstawiono wyniki optymalizacji dla ram składających się z elementów ukształtowanych z przekrojów monosymetrycznych oraz bisymetrycznych. W przypadku przekrojów monosymetrycznych komplet wyników przedstawiono w

załączniku A (wyniki optymalizacji RMO zgodnie z EC-3), natomiast wyniki dla przekrojów bisymetrycznych przedstawiono w załączniku B (wyniki optymalizacji RBI zgodnie z EC-3).

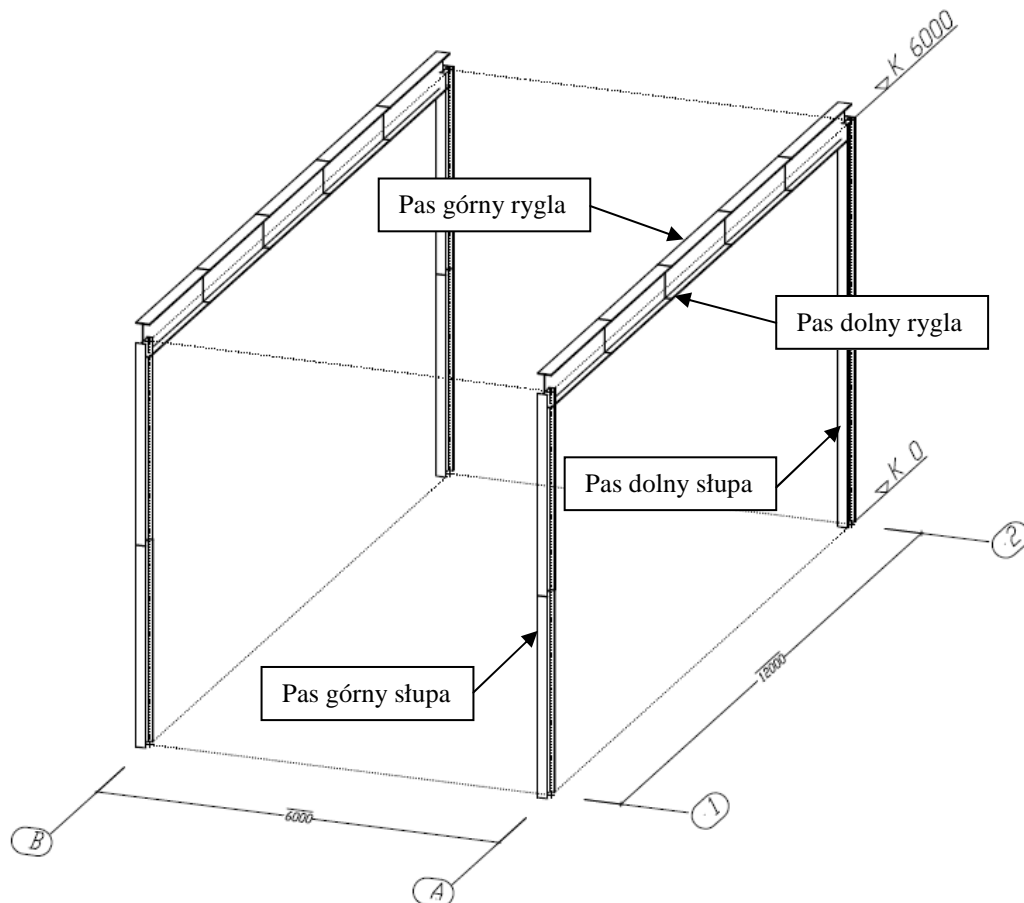
6.2.2.1. Wyniki dla przekrojów monosymetrycznych elementów składowych ram

Optymalną geometrię analizowanej ramy przedstawiono w postaci tabelarycznej (Tablica 6.1), w której zawarto informacje dotyczące założeń (parametrów) optymalizowanej konstrukcji oraz wyniki w postaci liczb opisujących geometrię przekrojów poszczególnych elementów składowych słupów i rygla ramy.

Tablica 6.1 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-12(5)-6-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 6000 mm				
rozpiętość rygla	12 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 2 400 mm długości każdy				
wysokość słupa	6 000 mm				
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2			
wys. środka	300	300			
gr. środka	4	4			
szer. półki górnej	140	240			
gr. półki górnej	6	6			
szer. półki dolnej	160	240			
gr. półki dolnej	10	12			
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. środka	500	500	500	500	500
gr. środka	4	5	4	5	4
szer. półki górnej	80	220	160	220	80
gr. półki górnej	14	6	14	6	14
szer. półki dolnej	160	140	120	140	160
gr. półki dolnej	6	10	10	10	6
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 11,98 (słupy: 5,85, rygiel: 6,14)					
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,04					

Poniżej przedstawiono rysunek obrazujący poszczególne oznaczenia przyjęte do opisu geometrii, znajdujące się w Tablicy 6.1. Przyjęty sposób i oznaczenia za pomocą których opisano parametry optymalizowanej ramy będzie konsekwentnie wykorzystywany w dalszej części pracy.



Rysunek 6.11 Oznaczenia przyjęte do opisu geometrii ramy

W załączniku A przedstawiono wyniki optymalizacji uzyskane dla najczęściej spotykanych rozstawów ram, wysokości ram oraz ich rozpiętości.

Rozpatrzono rozstawy ram wynoszące 6 m, 9 m oraz 12 m. W przypadku rozstawu ram (a tym samym rozpiętości płatwi) 6 m założono, iż płatwie są zaprojektowane z profili walcowanych, a ich ciężar w przeliczeniu na 1 m^2 rzutu dachu wynosi 7 kg przy założeniu, że rozstaw płatwi jest mniejszy niż 3 m . Dla rozstawu ram równego 9 m oraz 12 m przyjęto założenie, iż płatwie mają konstrukcję kratownicową, a ich waga nie przekracza 6 kg/m^2 . Niewielkie różnice w ciężarze płatwi nie powinny wpływać na przekroje blachownic ram.

W przypadku doboru wysokości słupów ram, zdecydowano się na trzy wysokości: 6 m , 9 m , 12 m . Wysokość 6 m najczęściej stosowana jest w halach produkcyjnych, natomiast 9 m oraz 12 m , stosowana jest w przypadku magazynów średniego i wysokiego składowania.

Obliczenia przeprowadzono dla kilku różnych rozpiętości modułowych wynoszących: 12 m, 18 m, 24 m, 30 m; jako najczęściej stosowanych w budownictwie stalowym (dotyczy portalowych ram parterowych).

W tabeli 6.2 zestawiono możliwe warianty obciążeń i geometrii układu (będące parametrami optymalizacji), dla których przeprowadzono proces optymalizacji – zoptymalizowanych zostało 36 układów konstrukcyjnych, w dwóch wariantach obciążeń każdy.

Tablica 6.2 Warianty geometrii układu

Obciążenia	Rozstaw ram [m]	Wysokość słupa [m]	Rozpiętość ramy [m] – Tablica wyników			
			12	18	24	30
Wiatr strefa I	6	6	T6.1	A4	A24	A36
		9	A2	A6	A26	A38
		12	A48	A54	A60	A66
Śnieg strefa II	9	6	A16	A8	A28	A40
		9	A18	A10	A30	A42
		12	A50	A56	A62	A68
	12	6	A20	A12	A32	A44
		9	A22	A14	A34	A46
		12	A52	A58	A64	A70
Wiatr strefa I	6	6	A1	A5	A25	A37
		9	A3	A7	A27	A39
		12	A49	A55	A61	A67
Śnieg strefa III	9	6	A17	A9	A29	A41
		9	A19	A11	A31	A43
		12	A51	A57	A63	A69
	12	6	A21	A13	A33	A45
		9	A23	A15	A35	A47
		12	A53	A59	A65	A71

Załącznik A zawiera obszerny materiał opracowany podczas analiz optymalizacji układów podanych w tabeli 6.2. Szczegółowa analiza otrzymanych wyników zawarta jest w rozdziale 6.2.3.

6.2.2.2. Wyniki dla przekrojów bisymetrycznych elementów składowych ram

Wyniki optymalizacji dla wybranych rozstawów ram, wysokości ram oraz ich rozpiętości przedstawiono w załączniku B.

Rozpatrzono rozstawy ram wynoszące 6 m oraz 12 m. W przypadku rozstawu ram (a ty samym rozpiętości płatwi) 6 m założono, iż płatwie są zaprojektowane z profili walcowanych, a ich ciężar w przeliczeniu na 1m^2 rzutu dachu wynosi 7 kg przy założeniu, że rozstaw płatwi jest mniejszy niż 3 m. Dla rozstawu ram równego 12 m przyjęto założenie, iż płatwie mają konstrukcję kratownicową, a ich waga nie przekracza 6 kg/m^2 . Niewielkie różnice w ciężarze płatwi nie powinny wpływać na przekroje blachownic ram.

W przypadku doboru wysokości słupów ram, zdecydowano się na dwie wysokości: 6 m oraz 12 m.

Obliczenia przeprowadzono dla kilku różnych rozpiętości modułowych wynoszących: 12 m, 18 m, 24 m, 30 m.

W poniższej tabeli zestawiono możliwe warianty obciążeń i geometrii układu (będące parametrami optymalizacji), dla których przeprowadzono proces optymalizacji – zoptymalizowanych zostało 16 układów konstrukcyjnych, w dwóch wariantach obciążeń każdy.

Tablica 6.4 Warianty geometrii układu

Obciążenia	Rozstaw ram [m]	Wysokość słupa [m]	Rozpiętość ramy [m] – Tablica wyników			
			12 – B13	18 – B12	24 – B8	30 – B4
Wiatr strefa I	6	6	12 – B13	18 – B12	24 – B8	30 – B4
		12	12 – B14	18 – B10	24 – B6	30 – B2
Śnieg strefa III	12	6	12 – B15	18 – B11	24 – B7	30 – B3
		12	12 – B16	18 – B9	24 – B5	30 – B1

Wyniki optymalizacji układów ramowych składających się z elementów o przekrojach bisymetrycznych (Załącznik B) opracowane podczas analiz układów zawartych w tabeli (Tablica 6.4), zostały przeanalizowane w rozdziale 6.2.3.2.

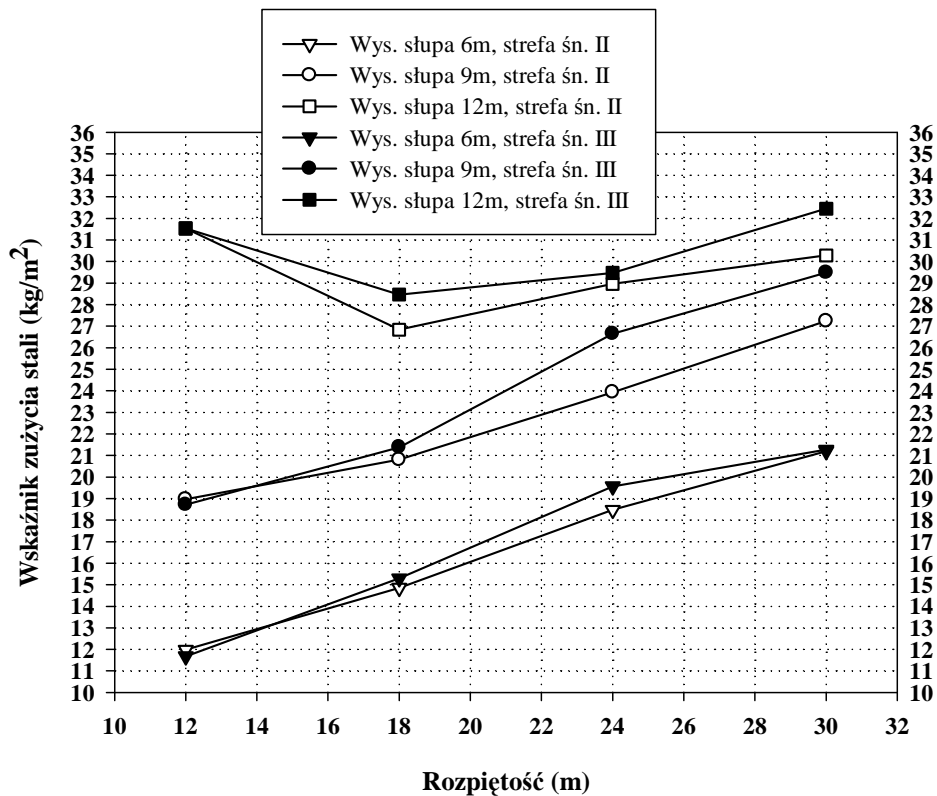
6.2.3. Analiza wyników optymalizacji ram

W punkcie 6.2.3.1. przedstawiono możliwie wyczerpującą analizę wyników otrzymanych w trakcie optymalizacji ram, których elementy składowe wykonane są przekrojów o różnych szerokościach i grubościach póltek. W punkcie 6.2.3.2. główny nacisk położono na porównanie zużycia materiału dla konstrukcji, które składają się z elementów o przekrojach monosymetrycznych i konstrukcji składających się z elementów o przekrojach bisymetrycznych.

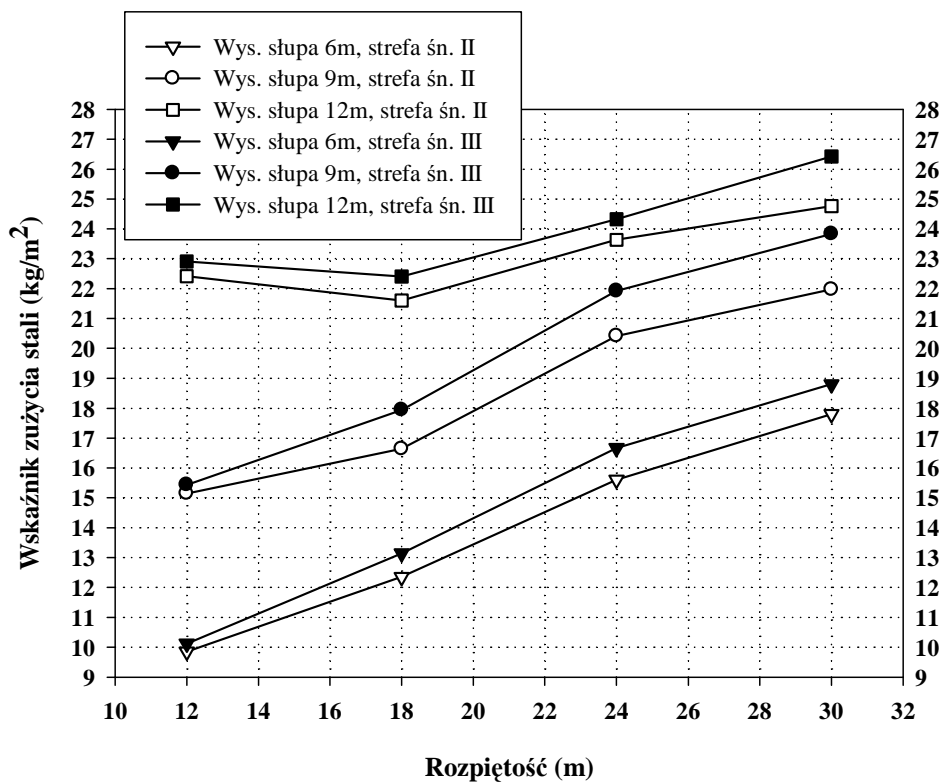
6.2.3.1. Przekroje monosymetryczne elementów składowych ram

Na podstawie obliczeń, których wyniki przedstawiono w załączniku A, sporządzono syntetyczne zestawienia w formie tabel oraz wykresów obrazujących zależności i charakterystyki rozwiązań optymalnych.

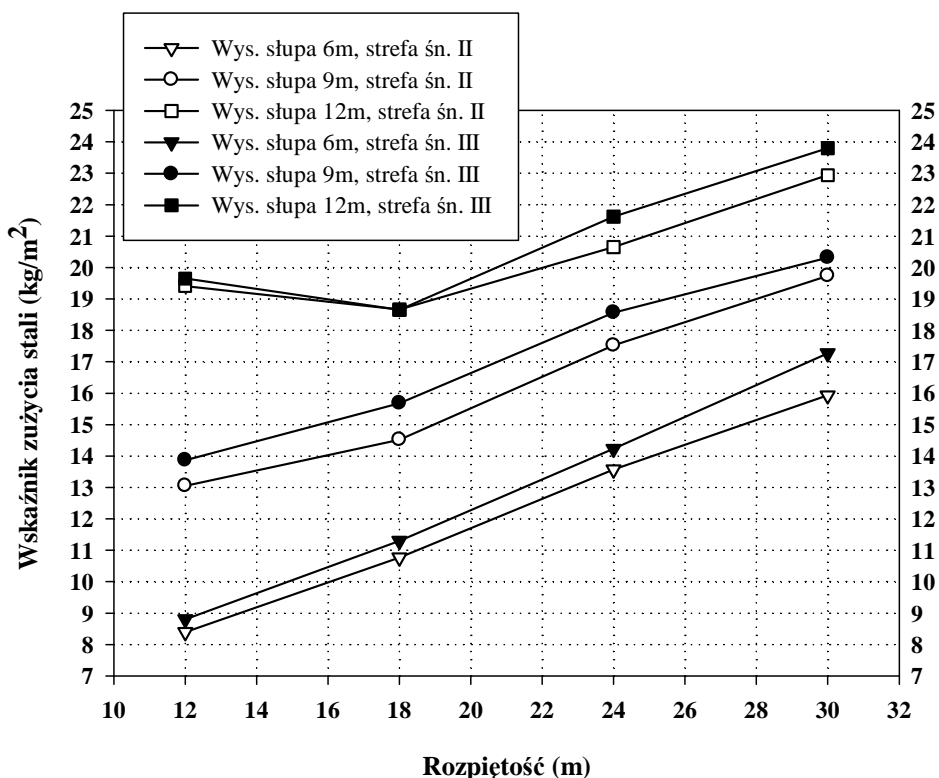
Wykresy: rozpiętość – wskaźnik zużycia stali; obrazują zmianę wskaźnikowego ciężaru konstrukcji stalowej w zależności od rozpiętości. Na rysunkach 6.12, 6.13, oraz 6.14, przedstawiono wyniki obliczeń dla różnych rozstawów ram, odpowiednio dla 6 m, 9 m oraz 12 m pomiędzy płaszczyznami układów ramowych. Dodatkową informacją zawartą na wykresach opracowanych dla poszczególnych rozpiętości, jest wskaźnik zużycia stali dla obiektów w strefie śniegowej drugiej oraz trzeciej.



Rysunek 6.12. Krzywe zależności rozpiętość – wskaźnik zużycia stali dla rozstawu ram wynoszącego 6 m



Rysunek 6.13 Krzywe zależności rozpiętość – wskaźnik zużycia stali dla rozstawu ram wynoszącego 9 m



Rysunek 6.14 Krzywe zależności rozpiętość – wskaźnik zużycia stali dla rozstawu ram wynoszącego 12 m

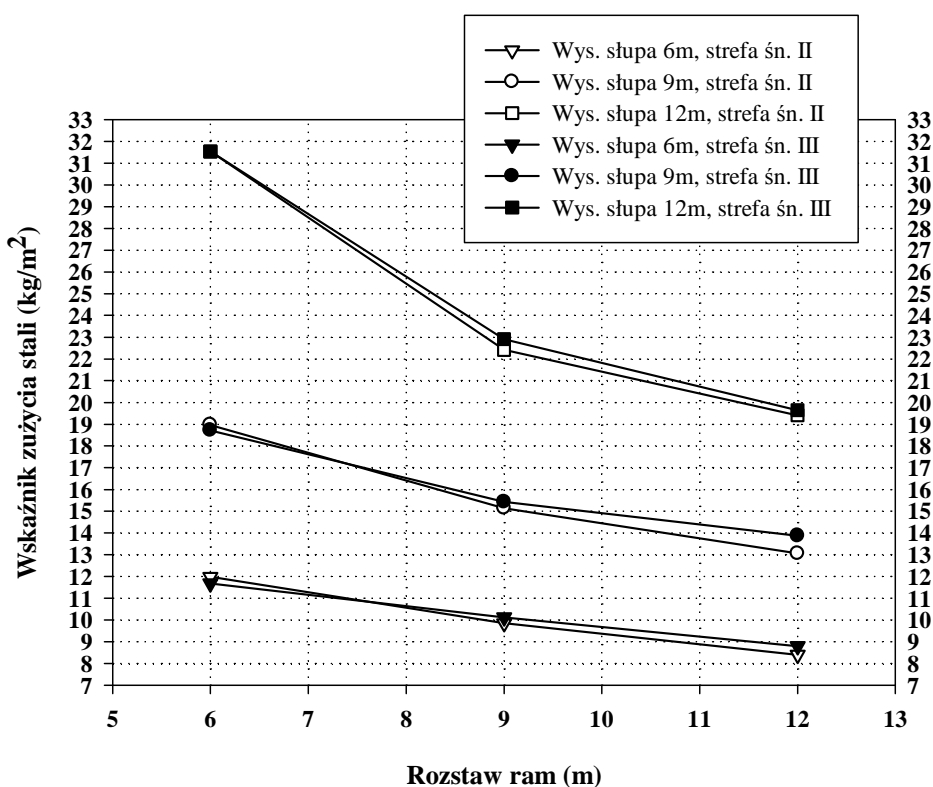
Na podstawie przedstawionych powyżej wykresów można wyciągnąć następujące wnioski:

- Ciężar konstrukcji, w przeliczeniu na kg/m^2 , wzrasta wraz ze wzrostem rozpiętości rygła, co wydaje się spostrzeżeniem oczywistym. Mniej oczywiste jest tempo wzrostu ciężaru wskaźnikowego w stosunku do wzrostu rozpiętości, które w większości przypadków jest bliskie liniowemu, natomiast spodziewano się krzywej drugiego stopnia.
- Na podstawie przedstawionych krzywych możliwe jest oszacowanie wskaźnikowego ciężaru konstrukcji stalowej dla dowolnych rozpiętości w zakresie od 12 m do 30 m, dla rozstawów ram wynoszących 6 m, 9 m, 12 m, oraz dla wysokości słupów wynoszących, 6 m, 9 m, 12 m.
- Ciężar wskaźnikowy (kg/m^2) zmienia się wraz ze zmianą obciążeń śniegiem i jest generalnie większy w przypadku trzeciej strefy śniegowej, co jest oczywiste. Interesującym jest natomiast fakt, iż w przypadku mniejszych rozpiętości (12 m) procentowa różnica pomiędzy masą konstrukcji obliczonej dla trzeciej strefy śniegowej, a masą obliczonej dla drugiej strefy śniegowej, jest mniejsza niż

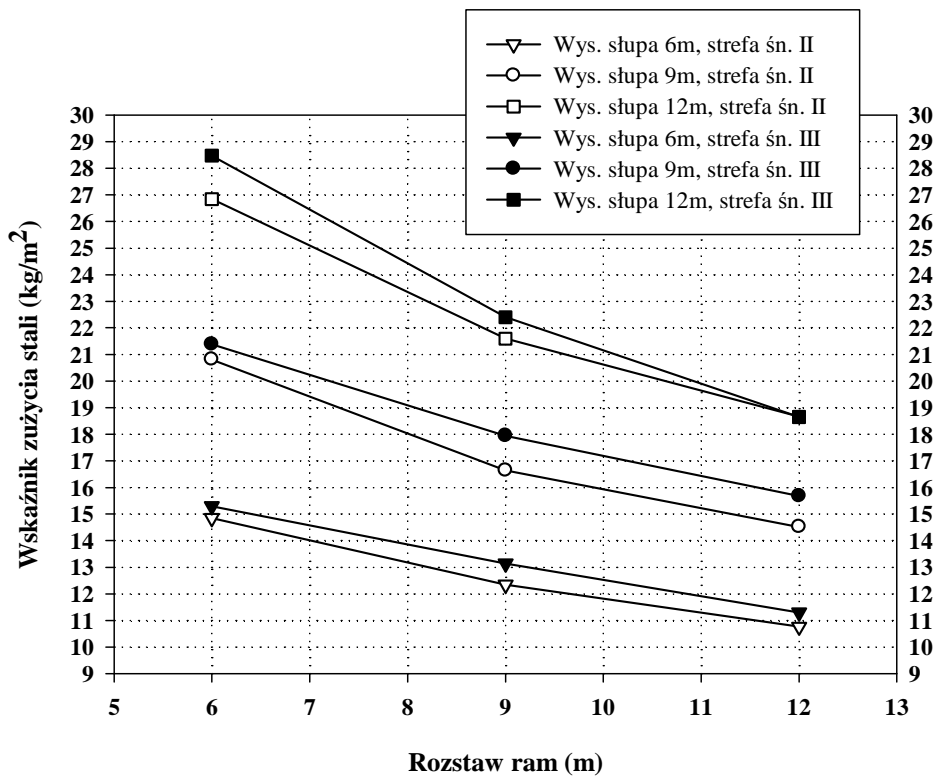
przypadku większych rozpiętości (30 m), dla których różnica jest większa (w większości przypadków).

- W przypadku ram o wysokości słupa wynoszącej 12 m, ciężary wskaźnikowe dla rozpiętości pomiędzy 12 m a 18 m różnią się niewiele (zwłaszcza dla rozstawów ram 6 m i 9 m), zdarzają się nawet przypadki, iż ramy o większej rozpiętości mają mniejszy ciężar wskaźnikowy. Wynika to z faktu, iż ciężar wskaźnikowy wysokiego słupa dla małych rozpiętości ram (12 m) jest większy niż dla większych rozpiętości ram (18 m), a zjawisko to zobrazowano na rysunku 6.23.

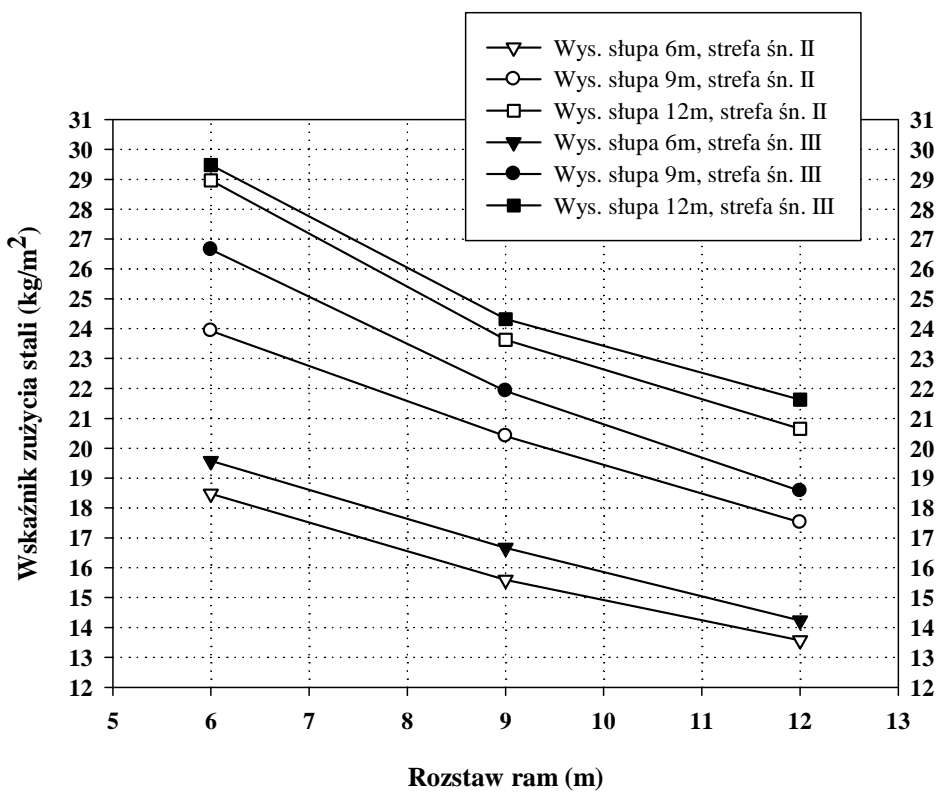
Wykresy: rozstaw ram – wskaźnik zużycia stali; obrazują zmianę wskaźnikowego ciężaru konstrukcji stalowej w zależności od rozstawu ram. Na rysunkach 6.15, 6.16, 6.17, oraz 6.18, przedstawiono wyniki obliczeń dla różnych rozpiętości ram, odpowiednio dla 12 m, 18 m, 24 m oraz 30 m. Dodatkowo podano wskaźnik zużycia stali dla obiektów w strefie śniegowej drugiej oraz trzeciej.



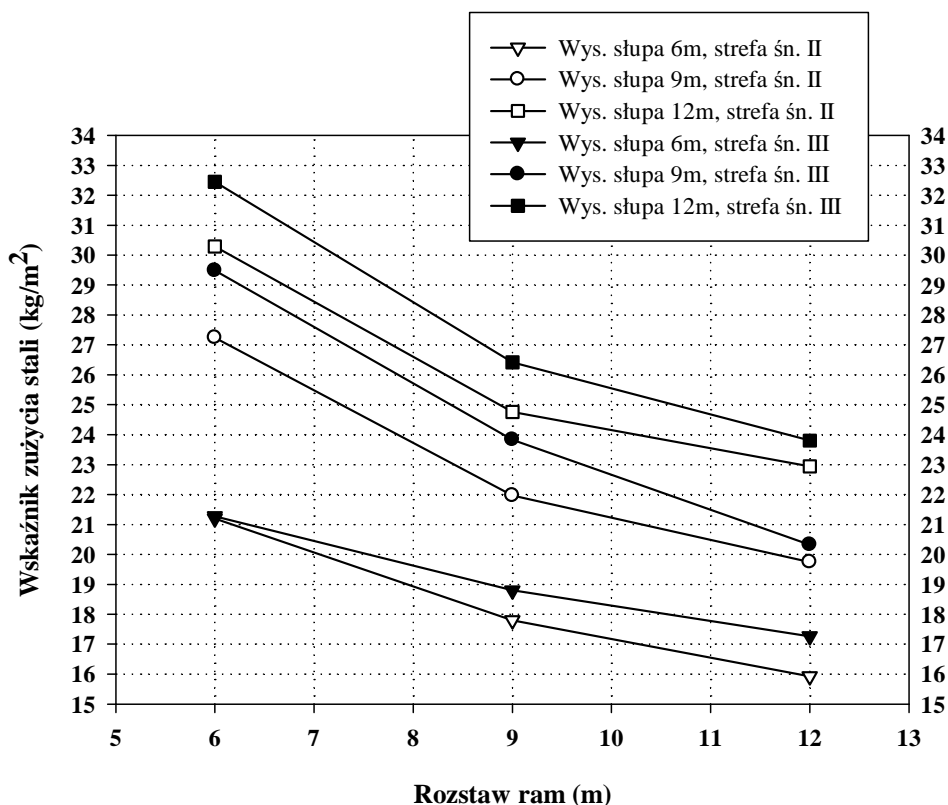
Rysunek 6.15 Krzywe zależności rozstaw – wskaźnik zużycia stali dla rozpiętości ram wynoszącej 12 m



Rysunek 6.16 Krzywe zależności rozstaw – wskaźnik zużycia stali dla rozpiętości ram wynoszącej 18 m



Rysunek 6.17 Krzywe zależności rozstaw – wskaźnik zużycia stali dla rozpiętości ram wynoszącej 24 m

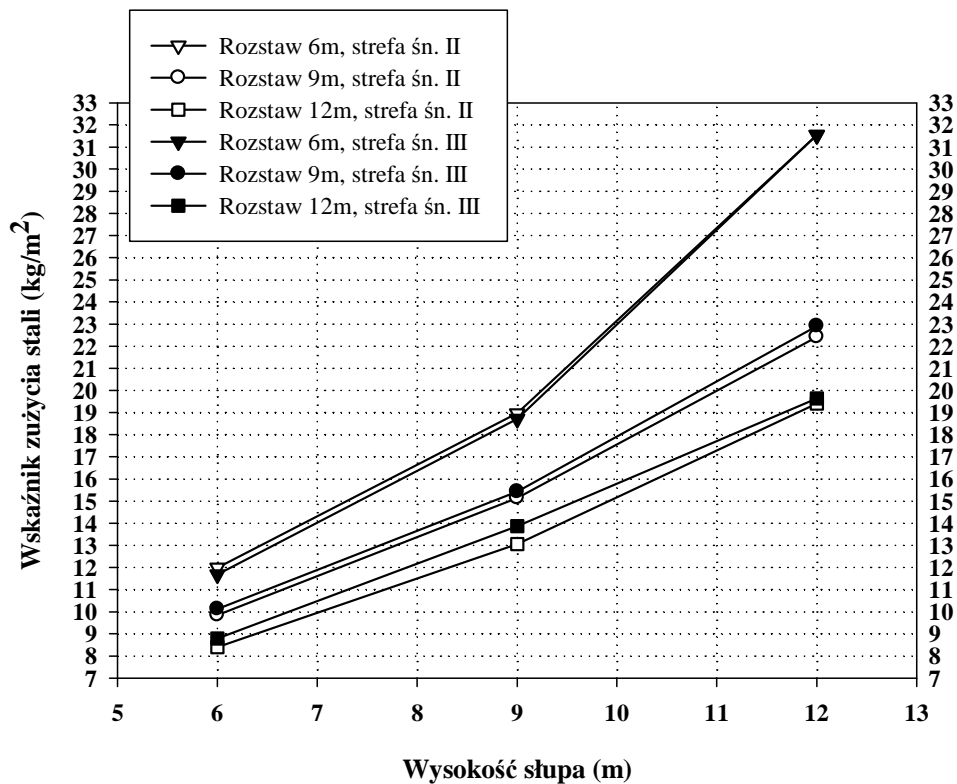


Rysunek 6.18 Krzywe zależności rozstaw – wskaźnik zużycia stali dla rozpiętości ram wynoszącej 30 m

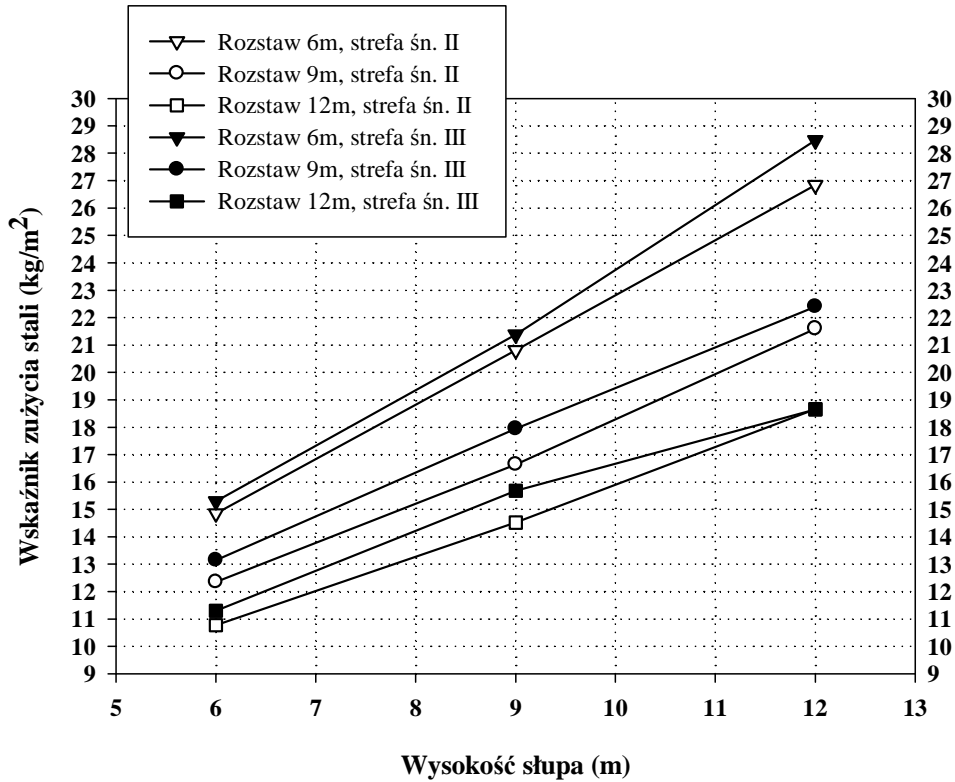
Przedstawione wykresy pozwalają sformułować następujące wnioski:

- Ciężar konstrukcji w przeliczeniu na kg/m^2 , maleje wraz ze wzrostem rozstawów ram, co w połączeniu z tempem spadku zobrazowanym na wykresach jest pomocną wskazówką w optymalnym projektowaniu nie tylko ram, lecz całych układów konstrukcyjnych.
- Na podstawie przedstawionych krzywych możliwe jest oszacowanie wskaźnikowego ciężaru konstrukcji stalowej dla dowolnych rozstawów ram w zakresie od 6 m do 12 m, dla rozpiętości ram wynoszących 12 m, 18 m, 24 m, 30 m oraz dla wysokości słupów wynoszących, 6 m, 9 m, 12 m.
- Ponieważ na większości odcinków wykresy obrazujące obliczenia dla drugiej strefy śniegowej oraz wykresy obrazujące obliczenia dla trzeciej strefy śniegowej są prawie równoległe, zatem dla tych samych rozpiętości można stwierdzić pewną stałą zależność pomiędzy ciężarem wskaźnikowym ram, a obciążeniem śniegiem (dla takich samych rozpiętości ram).

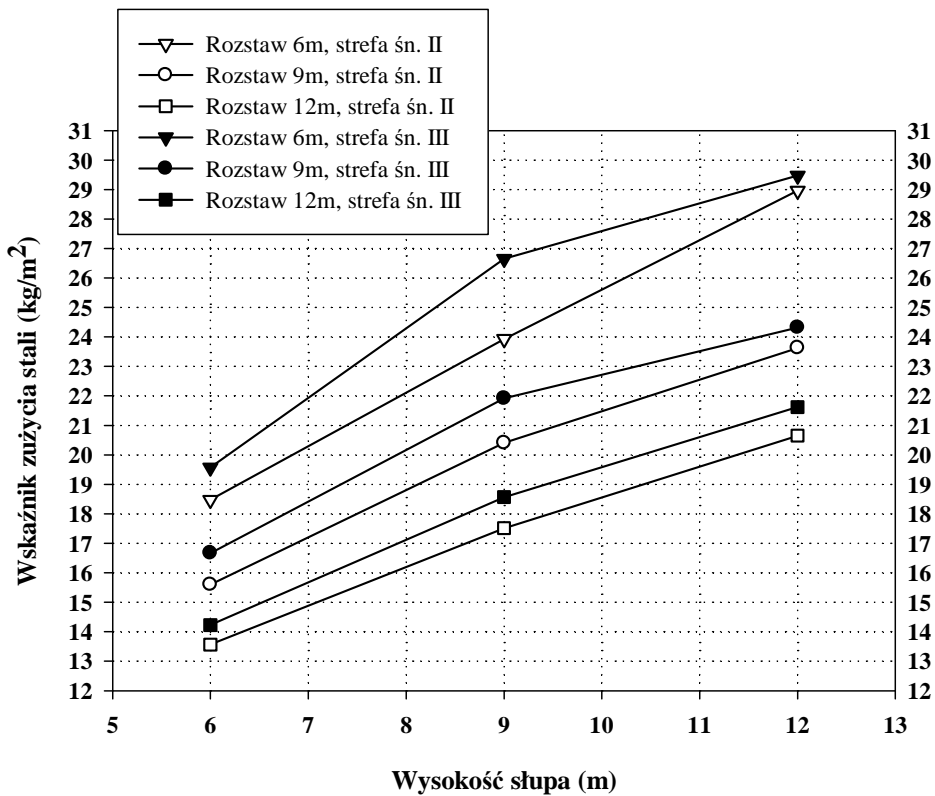
Wykresy: wysokość słupów ram – wskaźnik zużycia stali, obrazują zmianę wskaźnikowego ciężaru konstrukcji stalowej w zależności od wysokości słupów ram. Na rysunkach 6.19, 6.20, 6.21, oraz 6.22, przedstawiono wyniki obliczeń dla różnych rozpiętości ram, odpowiednio dla 12 m, 18 m, 24 m oraz 30 m. Dodatkową informacją zawartą na wykresach opracowanych dla poszczególnych rozpiętości, jest wskaźnik zużycia stali dla obiektów w strefie śniegowej drugiej oraz trzeciej.



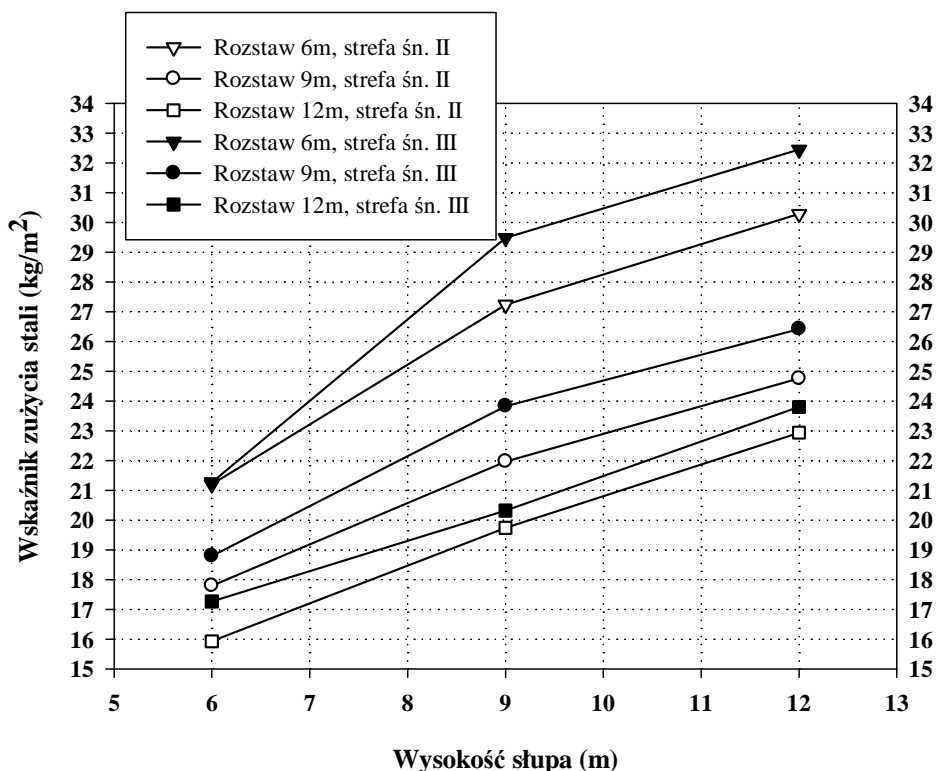
Rysunek 6.19 Krzywe zależności wysokość słupa – wskaźnik zużycia stali, dla rozpiętości ram wynoszącej 12 m



Rysunek 6.20 Krzywe zależności wysokość słupa – wskaźnik zużycia stali, dla rozpiętości ram wynoszącej 18 m



Rysunek 6.21 Krzywe zależności wysokość słupa – wskaźnik zużycia stali, dla rozpiętości ram wynoszącej 24 m

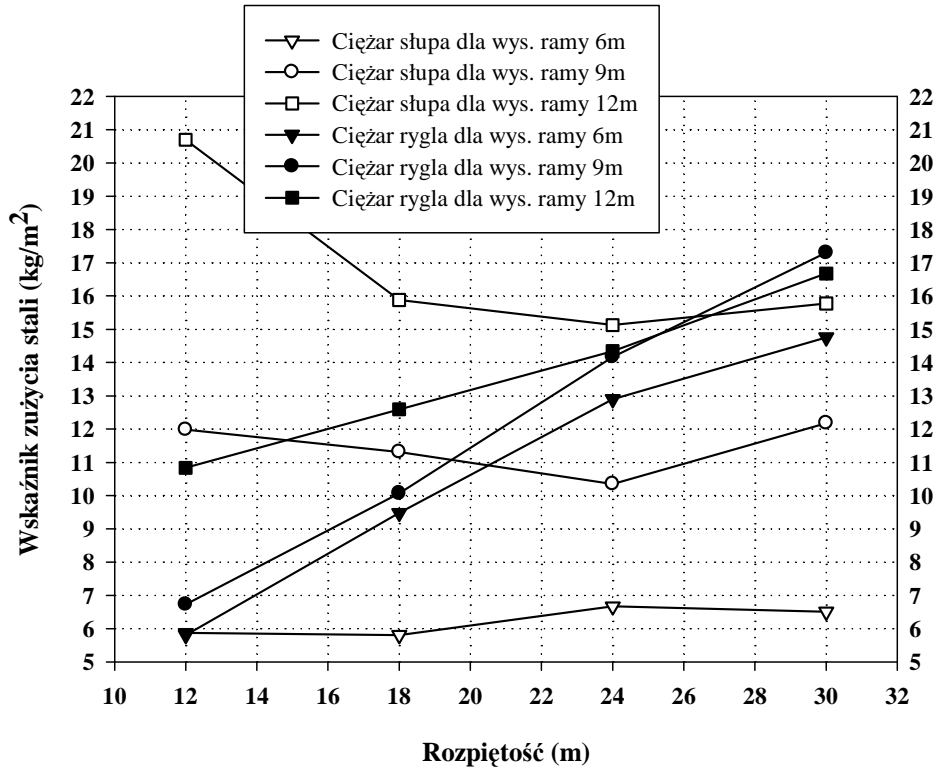


Rysunek 6.22 Krzywe zależności wysokość słupa – wskaźnik zużycia stali, dla rozpiętości ram wynoszącej 30 m

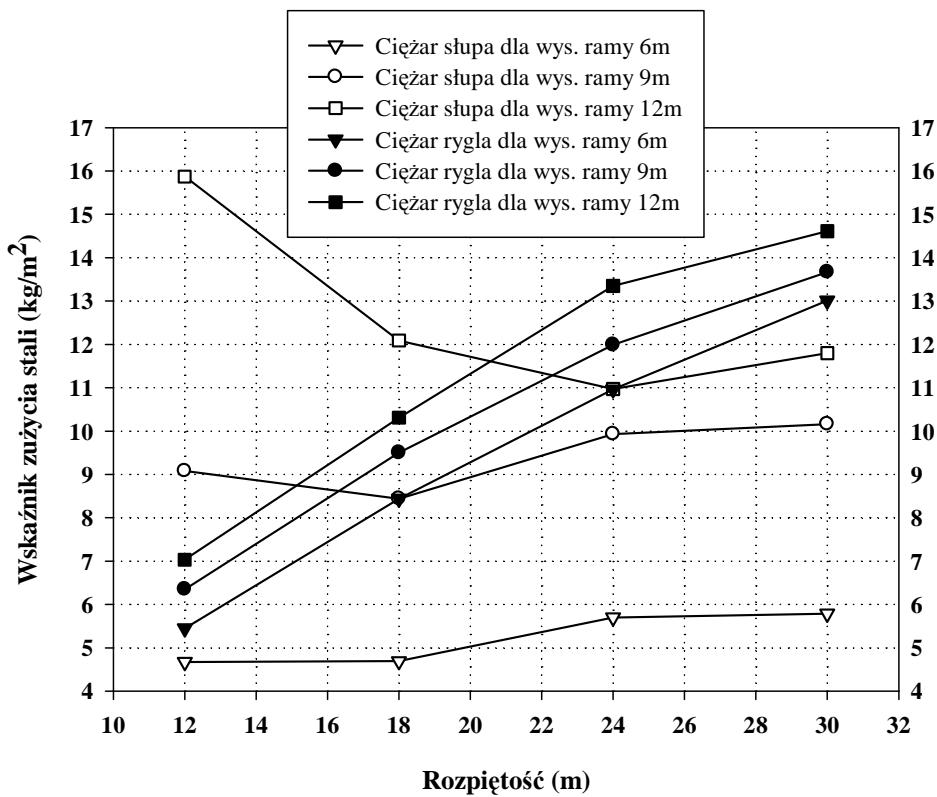
Na podstawie przedstawionych powyżej wykresów można wyciągnąć następujące wnioski:

- Ciężar konstrukcji w przeliczeniu na kg/m^2 , rośnie wraz ze wzrostem wysokości słupów. Dla mniejszych rozstawów wzrost ma charakter zbliżony do liniowego.
- Na podstawie przedstawionych wykresów możliwe jest oszacowanie masy konstrukcji dla dowolnej wysokości słupa w zakresie 6 m do 12 m, oraz dla przedstawionych rozstawów i rozpiętości ram.

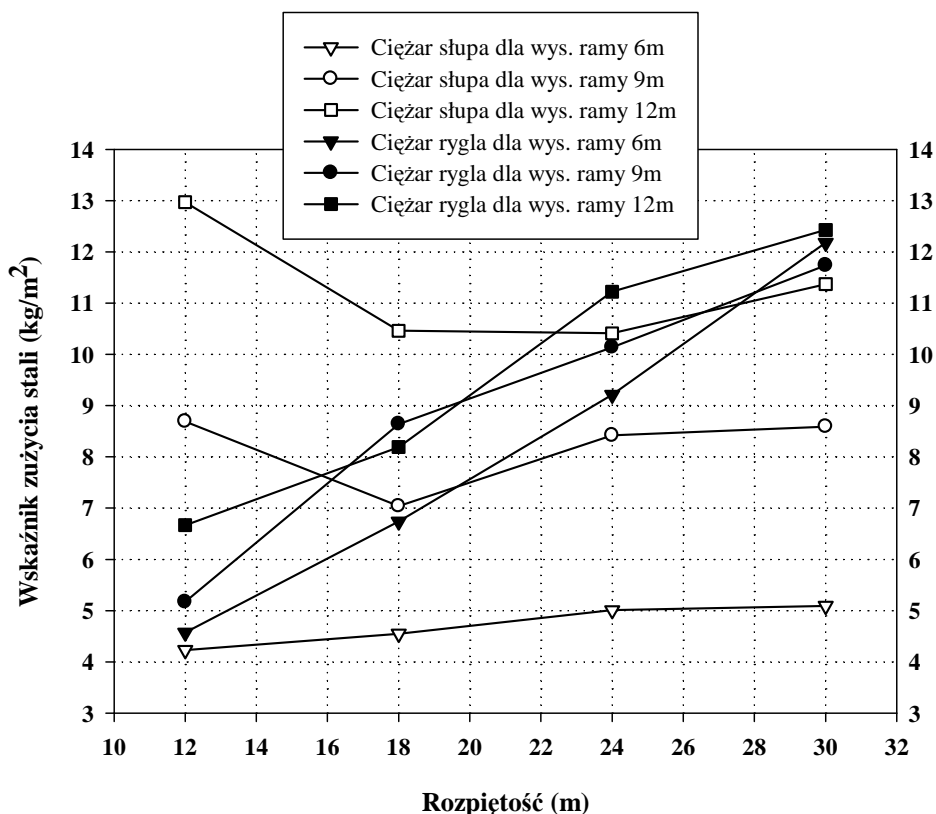
Wykresy: rozpiętość ram – wskaźnik zużycia stali dla słupów / rygła ramy; obrazują zmianę wskaźnikowego ciężaru słupów / rygła, w zależności od rozpiętości ram. Na rysunkach 6.23, 6.24, oraz 6.25, przedstawiono wyniki obliczeń dla różnych rozstawów ram, odpowiednio dla 6 m, 9 m oraz 12 m.



Rysunek 6.23 Krzywe zależności wysokość słupa – wskaźnik zużycia stali, dla rozstawu ram wynoszącego 6 m



Rysunek 6.24 Krzywe zależności wysokość słupa – wskaźnik zużycia stali, dla rozstawu ram wynoszącego 9 m



Rysunek 6.25 Krzywe zależności wysokości słupa – wskaźnik zużycia stali, dla rozstawu ram wynoszącego 12 m

Na podstawie powyższych wykresów można wyciągnąć następujące wnioski:

- Ciężar rygli, w przeliczeniu na kg/m², rośnie wraz ze wzrostem rozpiętości ram i maleje wraz ze wzrostem rozstawu ram.
- Rygle ram o wyższych słupach w większości przypadków charakteryzują się większym wskaźnikiem zużycia stali w kg/m².
- Można uznać, iż dla wysokości ram wynoszących 6 m i 9 m ciężar słupów w kg/m², jest w przybliżeniu stały (w większości przypadków) niezależnie od rozpiętości ramy (w zakresie od 12 m do 30 m), co jest cenną wskazówką przy szacowaniu kosztów konstrukcji stalowej.
- Ciężar słupów w kg/m² dla ram o wysokości 12m, jest największy w przypadku ram o małych rozpiętościach i stanowi znaczną część ciężaru całej konstrukcji. Należy zwrócić szczególną uwagę na wysokość konstrukcji w przypadku szacowania jej ciężaru.

W tabelach 6.5, 6.6 oraz 6.7 zestawiono wyniki obliczeń ciężaru konstrukcji stalowej w kg/m² zawarte w załączniku A.

Tablica 6.5 Wskaźniki zużycia stali dla rozpatrywanych układów

Obciążenia	Rozstaw ram [m]	Wysokość słupa [m]	Rozpiętość ramy [m] – wskaźnik zużycia stali [kg / m ²]				
			12 –	18 –	24 –	30 –	
Wiatr strefa I	6	6	11,98	14,85	18,47	21,20	
		9	18,97	20,81	23,93	27,24	
		12	31,54	26,84	28,96	30,29	
	Śnieg strefa II	9	6	9,85	12,35	15,60	17,80
			9	15,14	16,64	20,41	21,97
			12	22,42	21,60	23,63	24,76
Śnieg strefa II	12	6	8,40	10,77	13,57	15,93	
		9	13,05	14,52	17,52	19,74	
		12	19,41	18,66	20,65	22,94	
Wiatr strefa I	6	6	11,68	15,30	19,57	21,27	
		9	18,71	21,38	26,65	29,48	
		12	31,54	28,47	29,47	32,45	
	Śnieg strefa III	9	6	10,12	13,14	16,67	18,80
			9	15,43	17,94	21,92	23,83
			12	22,91	22,40	24,32	26,42
Śnieg strefa III	12	6	8,80	11,30	14,23	17,27	
		9	13,87	15,68	18,57	20,32	
		12	19,65	18,65	21,62	23,80	

Tablica 6.6 Wskaźnikowy ciężar słupów dla rozpatrywanych układów

Obciążenia	Rozstaw ram [m]	Wysokość słupa [m]	Rozpiętość ramy [m] – wskaźnik zużycia stali [kg / m ²]				
			12 –	18 –	24 –	30 –	
Wiatr strefa I	6	6	5,85	5,94	5,57	6,39	
		9	12,21	10,47	10,76	11,74	
		12	20,55	15,17	14,07	13,81	
	Śnieg strefa II	9	6	4,98	4,22	5,15	5,68
			9	8,78	7,77	9,51	8,71
			12	14,81	12,66	10,44	11,18
Śnieg strefa II	12	6	4,06	3,55	4,80	4,75	
		9	7,93	7,01	7,41	7,83	
		12	13,59	10,82	10,08	10,48	
Wiatr strefa I	6	6	5,87	5,81	6,67	6,51	
		9	11,98	11,31	10,35	12,18	
		12	20,70	15,88	15,13	15,78	
	Śnieg strefa III	9	6	4,67	4,69	5,70	5,79
			9	9,08	8,44	9,93	10,16
			12	15,87	12,09	10,97	11,80
Śnieg strefa III	12	6	4,23	4,55	5,01	5,09	
		9	8,69	7,04	8,42	8,59	
		12	12,97	10,46	10,41	11,37	

Tablica 6.7 Wskaźnikowy ciężar rygli dla rozpatrywanych układów

Obciążenia	Rozstaw ram [m]	Wysokość słupa [m]	Rozpiętość ramy [m] – wskaźnik zużycia stali [kg / m ²]			
			12 – 6,14	18 – 8,91	24 – 12,90	30 – 14,81
Wiatr strefa I	6	6	12 – 6,14	18 – 8,91	24 – 12,90	30 – 14,81
		9	12 – 6,76	18 – 10,34	24 – 13,17	30 – 15,50
		12	12 – 10,99	18 – 11,67	24 – 14,88	30 – 16,49
Śnieg strefa II	9	6	12 – 4,87	18 – 8,13	24 – 10,45	30 – 12,12
		9	12 – 6,36	18 – 8,86	24 – 10,90	30 – 13,25
		12	12 – 7,61	18 – 8,95	24 – 13,20	30 – 13,58
	12	6	12 – 4,34	18 – 7,22	24 – 8,77	30 – 11,19
		9	12 – 5,12	18 – 7,50	24 – 10,10	30 – 11,91
		12	12 – 6,01	18 – 7,84	24 – 10,57	30 – 12,46
Wiatr strefa I	6	6	12 – 5,81	18 – 9,48	24 – 12,90	30 – 14,76
		9	12 – 6,73	18 – 10,07	24 – 14,17	30 – 17,30
		12	12 – 10,84	18 – 12,59	24 – 14,34	30 – 16,68
Śnieg strefa III	9	6	12 – 5,45	18 – 8,44	24 – 10,96	30 – 13,01
		9	12 – 6,35	18 – 9,50	24 – 11,99	30 – 13,67
		12	12 – 7,03	18 – 10,31	24 – 13,35	30 – 14,61
	12	6	12 – 4,57	18 – 6,74	24 – 9,21	30 – 12,18
		9	12 – 5,17	18 – 8,64	24 – 10,14	30 – 11,74
		12	12 – 6,67	18 – 8,19	24 – 11,22	30 – 12,43

Tablica 6.8 Współczynniki długości wybocheniowych dla rozpatrywanych układów

Obciążenia	Rozstaw ram [m]	Wysokość słupa [m]	Rozpiętość ramy [m] – wsp. długości wybocheniowej [-]			
			12 – 2,04	18 – 2,25	24 – 2,5	30 – 3,65
Wiatr strefa I	6	6	12 – 2,04	18 – 2,25	24 – 2,5	30 – 3,65
		9	12 – 2,32	18 – 2,1	24 – 2,37	30 – 3,3
		12	12 – 1,92	18 – 2,06	24 – 2,15	30 – 2,5
Śnieg strefa II	9	6	12 – 2,2	18 – 1,93	24 – 2,7	30 – 3,58
		9	12 – 2,08	18 – 1,98	24 – 2,83	30 – 2,9
		12	12 – 2,03	18 – 2,06	24 – 1,97	30 – 2,3
	12	6	12 – 2,27	18 – 2,15	24 – 3,14	30 – 3,4
		9	12 – 2,08	18 – 2,04	24 – 2,48	30 – 2,72
		12	12 – 2,15	18 – 2,07	24 – 2,19	30 – 2,47
Wiatr strefa I	6	6	12 – 2,03	18 – 2,41	24 – 3,17	30 – 3,48
		9	12 – 2,26	18 – 2,06	24 – 2,05	30 – 3,17
		12	12 – 2,06	18 – 2,07	24 – 2,47	30 – 2,74
Śnieg strefa III	9	6	12 – 2,17	18 – 2,04	24 – 3,3	30 – 3,88
		9	12 – 2,09	18 – 1,94	24 – 2,7	30 – 3,29
		12	12 – 2,12	18 – 1,9	24 – 1,99	30 – 2,44
	12	6	12 – 2,2	18 – 2,85	24 – 3,13	30 – 3,29
		9	12 – 2,03	18 – 1,95	24 – 2,62	30 – 3,56
		12	12 – 1,91	18 – 2,04	24 – 2,23	30 – 2,85

W tabeli 6.8 zestawiono wyniki obliczeń współczynnika długości wybocheniowej, dotyczące zoptymalizowanych ram portalowych, zawarte w załączniku A.

Przedstawione wartości to wartości obliczone dla elementu słupa o najmniejszej wartości siły krytycznej wyznaczonej za pomocą BMP (opisanej w Rozdziale 5.3.2).

Z powyższej tabeli wynika, iż opracowany algorytm dąży do minimalizacji długości wyboczeniowej elementów słupa, co w konsekwencji znajduje swoje odzwierciedlenie w wielkości współczynników redukcyjnych przy ściskaniu (zmniejszenie wpływu zjawiska wyboczenia giętnego). Minimalizacja współczynników długości wyboczeniowej elementów słupów istotna jest szczególnie w przypadku słupów wysokich. Na podstawie powyższego spostrzeżenia można wysnuć wniosek, iż w trakcie projektowania ram, należy dążyć do zwiększenia sztywności rygla w stosunku do sztywności słupa, tak aby minimalizować współczynniki długości wyboczeniowej elementów słupa, mając jednocześnie na uwadze spełnienie odpowiednich warunków normowych dotyczących przemieszczeń poziomych układu ramowego.

W załączniku D przedstawiono tabele pokazujące aktywność poszczególnych ograniczeń dla poszczególnych prętów (elementów składowych o przekrojach monosymetrycznych) konstrukcji ramowych. Na podstawie analizy aktywności ograniczeń można wyciągnąć dodatkowe następujące wnioski:

- Dla największej liczby elementów składowych rozpatrywanych ram, aktywne jest ograniczenie g_{14} dotyczące zapewnienia nośności elementu przy ściskaniu ze zginaniem z uwzględnieniem współczynników niestateczności globalnej dla wyboczenia względem osi mniejszego momentu bezwładności oraz dla zwichrzenia. Fakt ten pozwala stwierdzić, iż najczęściej nośność prętów jest wyczerpana z uwagi na ściskanie ze zginaniem z uwzględnieniem współczynników niestateczności globalnej dla wyboczenia (względem osi mniejszego momentu bezwładności) oraz dla zwichrzenia.
- Na podstawie liczby prętów dla których aktywne jest ograniczenie g_{13} związane z zapewnieniem nośności elementu przy ściskaniu ze zginaniem z uwzględnieniem współczynników niestateczności globalnej dla wyboczenia względem osi większego momentu bezwładności oraz dla zwichrzenia (ograniczenie to jest aktywne dla mniejszej liczby prętów i ram niż w przypadku ograniczenia g_{14}), można stwierdzić, iż słupy ram częściej tracą nośność w wyniku utraty stateczności względem osi mniejszego momentu bezwładności niż względem osi większego momentu bezwładności. Dotyczy to głównie ram o wysokości słupów wynoszącej 9m. Na podstawie powyższego wniosku zasadne jest stwierdzenie, iż rozstaw podparć bocznych dla słupów o wysokości 9m

należy zmniejszyć (co zawsze korzystnie wpływa na nośność elementu ściskanego).

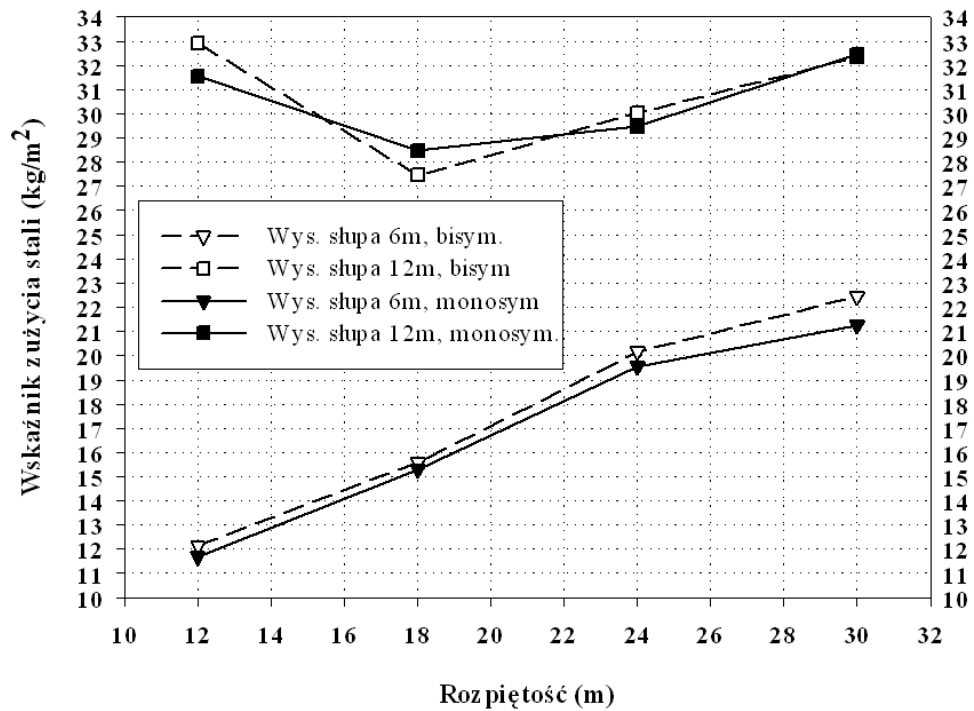
- Na podstawie obserwacji aktywności ograniczenia g_{12} (zapewnienie nośności elementu przy zginaniu z uwzględnieniem współczynników niestateczności globalnej dla zwichrzenia), można wysnuć oczywisty wniosek, iż nośność elementów składowych rygli wyczerpuje się w wyniku utraty stateczności globalnej przy zginaniu (zwichrzenie).
- Często aktywność ograniczeń g_6 (nośność przekroju na rozciąganie ze zginaniem) oraz g_8 (nośność przekroju na ściskanie ze zginaniem), świadczy o optymalnym doborze przekroju w taki sposób, aby zminimalizować występowanie zjawisk niestateczności globalnej.
- Ograniczenie g_2 (zapewnienie nośności przekroju na ścinanie ze zginaniem) jest aktywne dla większości rozpatrywanych ram i dotyczy zazwyczaj elementu rygla połączonego ze słupem (czyli w miejscu występowania maksymalnej tnącej i maksymalnego momentu).
- Aktywność ograniczenia g_{15} pokazuje, iż większość optymalnych przekrojów składa się ze średników o dużej (bliskiej maksymalnej dopuszczalnej) smukłości.

6.2.3.2. Przekroje bisymetryczne elementów składowych ram

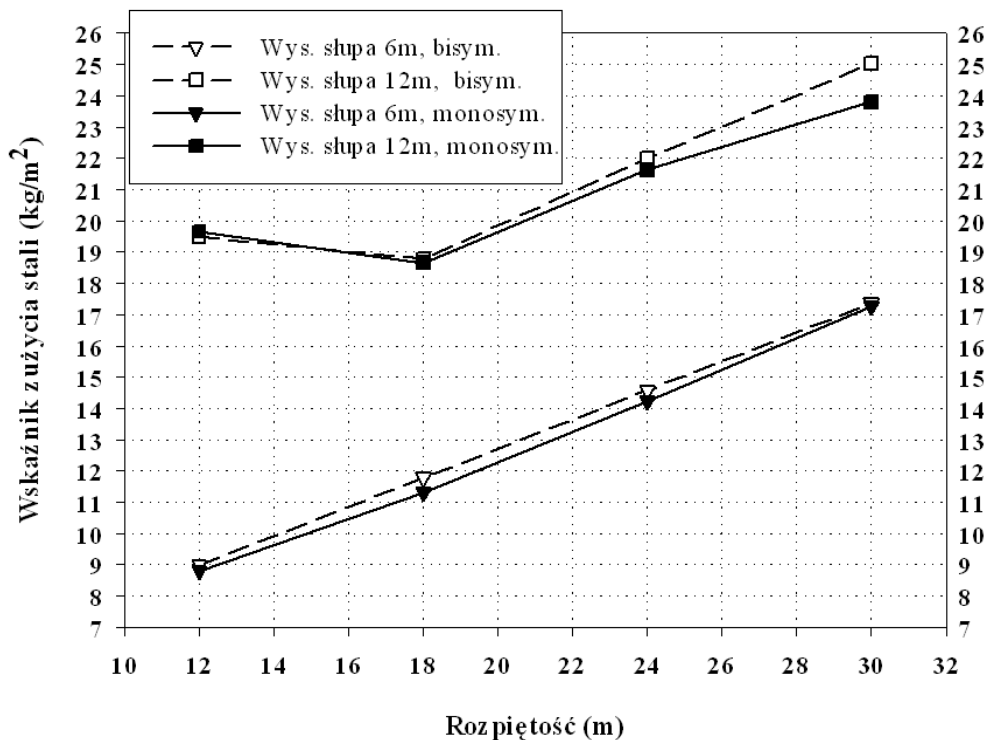
Na podstawie wyników obliczeń zamieszczonych w załącznikach A i B, sporządzono wykresy na których porównano wskaźniki zużycia stali dla ram wykonanych z elementów o przekrojach monosymetrycznych, ze wskaźnikami zużycia stali dla ram wykonanych z elementów o przekrojach bisymetrycznych.

Należy spodziewać się, iż w przypadku ram składających się z elementów o przekrojach bisymetrycznych, zużycie materiału będzie większe niż w przypadku ram składających się z elementów o przekrojach monosymetrycznych. Powyższe przypuszczenie wynika z faktu, iż w przypadku przekrojów monosymetrycznych możliwe jest lepsze dopasowanie przekroju do „potrzeb”, poprzez np. zmianę położenie środka ciężkości, a tym samym optymalizacja rozkładu naprężeń normalnych w średniku i w półkach.

Wykresy: rozpiętość – wskaźnik zużycia stali; obrazują zmianę wskaźnikowego ciężaru konstrukcji stalowej w zależności od rozpiętości. Na rysunkach 6.26, oraz 6.27, przedstawiono wyniki obliczeń dla różnych rozstawów ram, odpowiednio dla 6m oraz 12m pomiędzy płaszczyznami układów ramowych.



Rysunek 6.26 Krzywe zależności rozpiętość – wskaźnik zużycia stali, dla rozstawu ram wynoszącego 6 m



Rysunek 6.27 Krzywe zależności rozpiętość – wskaźnik zużycia stali, dla rozstawu ram wynoszącego 12m

Na podstawie przedstawionych powyżej wykresów można wyciągnąć następujące wnioski:

- Ciężar konstrukcji składających się z elementów o przekrojach monosymetrycznych zgodnie z przewidywaniami, w większości przypadków jest mniejszy od ciężaru ram zbudowanych z elementów o przekrojach bisymetrycznych.

W tabeli 6.9 zestawiono wyniki obliczeń ciężaru konstrukcji stalowej w kg/m^2 , zawarte w załączniku B.

Tablica 6.9 Wskaźniki zużycia stali dla rozpatrywanych układów

Obciążenia	Rozstaw ram [m]	Wysokość słupa [m]	Rozpiętość ramy [m] – wskaźnik zużycia stali [kg / m^2]			
			12 – 12,15	18 – 15,59	24 – 20,17	30 – 22,47
Wiatr strefa I	6	6	12 – 32,92	18 – 27,46	24 – 30,04	30 – 32,35
		12	12 – 8,98	18 – 11,78	24 – 14,59	30 – 17,36
Śnieg strefa III	12	6	12 – 19,48	18 – 18,79	24 – 22,01	30 – 25,03
		12	12 – 19,48	18 – 18,79	24 – 22,01	30 – 25,03

W załączniku E przedstawiono tabele pokazujące aktywność poszczególnych ograniczeń dla poszczególnych prętów (elementów składowych o przekrojach bisymetrycznych) konstrukcji ramowych. Na podstawie analizy aktywności ograniczeń można wyciągnąć następujące wnioski:

- Dla ram RBI ograniczenia: g_2 (zapewnienie nośności przekroju na ścinanie ze zginaniem), g_6 (nośność przekroju na rozciąganie ze zginaniem), g_8 (nośność przekroju na ściskanie ze zginaniem), g_{12} (zapewnienie nośności elementu przy zginaniu), g_{13} oraz g_{14} (zapewnienie nośności elementu przy ścisaniu ze zginaniem); są aktywne w mniejszej liczbie przypadków niż dla ram RMO (zestawienie liczby aktywnych ograniczeń przedstawiono w Tabelicy 6.10), co potwierdza, iż w przypadku ram RBI dopasowanie geometrii przekrojów do warunków (geometria siły wewnętrzne) jest mniejsze
- Dla ram RBI ograniczenia: g_{15} (ograniczenie smukłości ścianek), g_{16} (ograniczenie przemieszczeń pionowych i poziomych); są aktywne w większej liczbie przypadków niż dla ram RMO (zestawienie liczby aktywnych ograniczeń przedstawiono w Tabelicy 6.10), zatem dobrane przekroje mają ścianki o granicznej smukłości (w niektórych przypadkach nawet nieznacznie przekraczające dopuszczalne).

Tablica 6.10 Liczba aktywności wybranych ograniczeń dla poszczególnych typów ram

Rozstaw ram (m)	Wys. słupa (m)	Typ przekrojów	Ograniczenie (liczba aktywności)							
			g_2	g_6	g_8	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}
6	6	RMO	3	8	11	8	3	21	11	0
		RBI	1	2	5	7	1	18	13	1
	12	RMO	4	7	10	9	5	22	13	2
		RBI	1	2	5	10	4	19	16	3
12	6	RMO	4	8	12	7	1	18	11	0
		RBI	1	6	10	5	1	19	14	0
	12	RMO	4	7	13	8	6	18	14	2
		RBI	2	2	4	4	4	17	17	2

7. Optymalizacja ram zgodnie z PN

Niniejszy rozdział opiera się w głównej mierze na zapisach rozdziału 6. Sformułowano powtórnie problem optymalizacji z uwagi na występujące różnice pomiędzy normami (PN-EN 1993-1-1) i (PN-90/B-03200), lecz wykorzystano ten sam przykład ramy portalowej, skorzystano również z parametrów algorytmu dobranych w rozdziale 6. Optymalizację przeprowadzono przy wykorzystaniu tego samego autorskiego programu komputerowego GAAD (opisanego w rozdziale 5), zastępując procedury wymiarowania i ograniczenia zgodne z EC, na procedury wymiarowania i ograniczenia zgodne z PN.

7.1. Sformułowanie problemu optymalizacji

Parametrami optymalizacji w opisywanym przypadku są:

- geometria ramy (wysokość oraz podział słupów, rozpiętość oraz podział rygla),
- geometria przekroju (przekrój bisymetryczny),
- obciążenia ramy (zgodnie z odpowiednimi normami – rozdział 2),
- materiał – przyjęto stal o module Younga równym 205 GPa.

Wektor zmiennych opisano w punkcie 6.1.2., a oznaczenia przedstawiono graficznie na rysunku 6.2. Niezmienny (w stosunku do optymalizacji zgodnie z EC) pozostaje również cel optymalizacji oraz funkcja celu (opisana wzorem 6.2).

W przypadku optymalizacji ram zgodnie z PN, ograniczenia różnią się nieznaczenie od ograniczeń dla optymalizacji ram zgodnie z EC. Poniżej wyszczególniono i opisano listę ograniczeń jakie powinny być spełnione dla każdego elementu składowego ramy i

dla ramy jako całości, aby rezultat – optymalna konstrukcja ramowa, mogła być wykorzystana do realnych zagadnień inżynierskich:

- ograniczenie $g_1(\mathbf{x})$ – zapewnienie nośności przekroju przy ścinaniu (Rozdział 2, podpunkt 2.4.3.1., wzór (2.14)),
- ograniczenie $g_2(\mathbf{x})$ – zapewnienie nośności przekroju na ścinanie ze zginaniem (Rozdział 2, podpunkt 2.4.3.1., wzór (2.15)), ograniczenie to zmodyfikowano i dodano składnik związany z wyteżeniem przekroju pod wpływem działania siły normalnej, co pozwoli obserwować zależność pomiędzy nośnością przekrojów w złożonym stanie naprężeń, a nośnością elementów (z uwzględnieniem współczynników niestateczności globalnej)
- ograniczenie $g_3(\mathbf{x})$ – zapewnienie nośności przekroju przy rozciąganiu (Rozdział 2, podpunkt 2.4.3.1., wzór (2.16)),
- ograniczenie $g_4(\mathbf{x})$ – zapewnienie nośności przekroju przy ściskaniu (Rozdział 2, podpunkt 2.4.3.1., wzór (2.17)),
- ograniczenie $g_5(\mathbf{x})$ – zapewnienie nośności elementu przy ściskaniu z uwzględnieniem współczynników niestateczności globalnej dla wyboczenia w kierunku osi (X) większego momentu bezwładności (Rozdział 2, podpunkt 2.4.3.2., wzór (2.18)),
- ograniczenie $g_6(\mathbf{x})$ – zapewnienie nośności elementu przy ściskaniu z uwzględnieniem współczynników niestateczności globalnej dla wyboczenia w kierunku osi (Y) mniejszego momentu bezwładności (Rozdział 2, podpunkt 2.4.3.2., wzór (2.18)),
- ograniczenie $g_7(\mathbf{x})$ – zapewnienie nośności elementu przy zginaniu z uwzględnieniem współczynników niestateczności globalnej dla zwichrzenia (Rozdział 2, podpunkt 2.4.3.2., wzór (2.19)),
- ograniczenie $g_8(\mathbf{x})$ – zapewnienie nośności elementu przy ściskaniu ze zginaniem z uwzględnieniem współczynników niestateczności globalnej dla wyboczenia w kierunku osi (X) większego momentu bezwładności oraz dla zwichrzenia (Rozdział 2, podpunkt 2.4.3.2., wzór (2.20)),
- ograniczenie $g_9(\mathbf{x})$ – zapewnienie nośności elementu przy ściskaniu ze zginaniem z uwzględnieniem współczynników niestateczności globalnej dla wyboczenia w kierunku osi (Y) mniejszego momentu bezwładności oraz dla zwichrzenia (Rozdział 2, podpunkt 2.4.3.2., wzór (2.21)),

- ograniczenie $g_{10}(\mathbf{x})$ – zapewnienie ograniczenia przemieszczeń poziomych ramy i pionowych ugięć rygla tak aby spełnione były warunki normowe (Rozdział 2, podpunkt 2.4.4., wzór (2.12), (2.13)),
- ograniczenie $g_{11}(\mathbf{x})$ – zapewnienie spawalności środника z półkami (dobór odpowiednich grubości środnika i półek), zgodnie z (PN-90/B-03200).

Podobnie jak w przypadku optymalizacji zgodnie z EC, problem optymalizacji rozwiązywano przy wykorzystaniu funkcji celu opisanych w rozdziale 4 (funkcje kary). Postać funkcji celu przedstawiono w rozdziale 6, podpunkt 6.2.1.1.

7.2. Rozwiązanie problemu

Podobnie jak w przypadku optymalizacji zgodnie z EC optymalizacji poddano konstrukcję opisaną w rozdziale 6, której przykład pokazano na rysunku 6.3. W rozpatrywanym przykładzie:

- rama składa się ze słupów o wysokości 6 m, przegubowo połączonych z fundamentami,
- rygiel ma rozpiętość 12m, na ryglu opierają się płatwie w rozstawie co 2,4 m,
- słupy podzielone są na dwie części o wysokości 3 m każda,
- rygiel podzielony jest na 5 części o długości 2,4 m każda,
- rozstaw ram wynosi 6 m,

obciążenia ciężarem własnym konstrukcji, ciężarem poszycia, śniegiem (strefa III) oraz wiatrem (strefa I), zgodnie z tabelą (Tablica 2.2 Zestawienie obciążeń wg Norm Polskich).

7.2.1. Wyniki optymalizacji

Optymalną geometrię zadanej w Rozdziale 6 ramy, przedstawiono w postaci tabelarycznej (Tablica 7.1), w której zawarto informacje dotyczące założeń (parametrów) optymalizowanej ramy oraz wyniki w postaci liczb opisujących geometrię przekrojów poszczególnych elementów składowych słupów i rygla ramy.

Tablica 7.1 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-12(5)-6-PN-S3]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z PN, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6 000 mm				
rozpiętość rygla	12 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 2 400 mm długości każdy				
wysokość słupa	6 000 mm				
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2			
wys. środka	450	450			
gr. środka	5	4			
szer. półek	120	200			
gr. półek	6	8			
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przesło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. środka	600	600	600	600	600
gr. środka	5	6	4	6	5
szer. półek	160	120	200	120	160
gr. półek	6	6	6	6	6
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 11,71 (słupy: 5,48, rygiel: 6,23)					
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,13					

Poszczególne oznaczenia przyjęte do opisu geometrii, znajdujące się w Tablicy 7.1, przedstawiono na rysunku 6.11.

W załączniku C przedstawiono wyniki optymalizacji dla wybranych wariantów geometrii ram. W Tablicy 7.2 zestawiono warianty dla których przeprowadzono proces optymalizacji

Tablica 7.2 Warianty geometrii układu

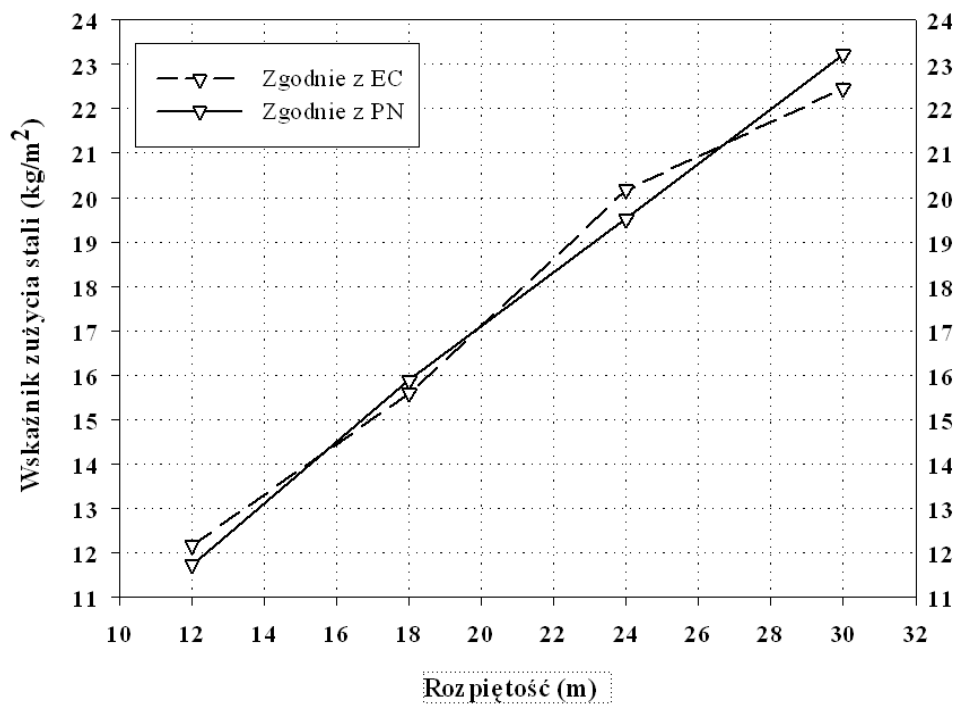
Obciążenia	Rozstaw ram [m]	Wysokość słupa [m]	Rozpiętość ramy [m] – Tablica wyników			
			12 – T 7.1	18 – C1	24 – C5	30 – C6
Wiatr str. I	6	6	12 – C3	18 – C2	24 – C4	30 – C7
Śnieg str. III	12	6				

7.2.2. Analiza wyników

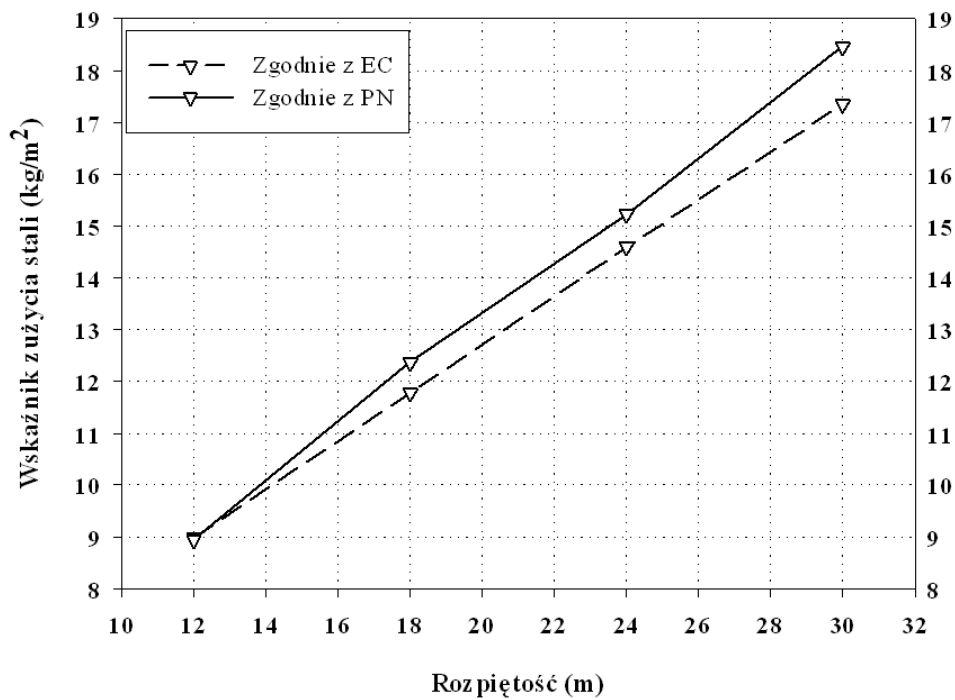
Na podstawie wyników obliczeń zamieszczonych w załącznikach B i C, sporządzono wykresy na których porównano wskaźniki zużycia stali dla ram projektowanych wg PN ze wskaźnikami zużycia stali dla ram projektowanych wg EC.

Wykresy: rozpiętość – wskaźnik zużycia stali; obrazują zmianę wskaźnikowego ciężaru konstrukcji stalowej w zależności od rozpiętości. Na rysunkach 7.1 oraz 7.2,

przedstawiono wyniki obliczeń dla różnych rozstawów ram, odpowiednio dla 6m oraz 12m pomiędzy płaszczyznami układów ramowych.



Rysunek 7.1 Krzywe zależności rozpiętość – wskaźnik zużycia stali, dla rozstawu ram wynoszącego 6m



Rysunek 7.2 Krzywe zależności rozpiętość – wskaźnik zużycia stali, dla rozstawu ram wynoszącego 12m

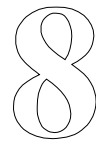
Na podstawie przedstawionych powyżej wykresów można wyciągnąć następujące wnioski:

- dla większości przypadków, konstrukcje ramowe optymalizowane zgodnie z PN mają większy ciężar wskaźnikowy niż konstrukcje ramowe optymalizowane zgodnie z EC-3,
- większe różnice ciężarów wskaźnikowych dotyczą konstrukcji, w których rygle oraz słupy mają mniejsze smukłości ścianek (są bardziej masywne).

W tabeli 7.3 zestawiono wyniki obliczeń ciężaru konstrukcji stalowej w kg/m^2 , zawarte w załączniku C.

Tablica 7.3 Wskaźniki zużycia stali dla rozpatrywanych układów

Obciążenia	Rozstaw ram [m]	Wysokość słupa [m]	Rozpiętość ramy [m] – wskaźnik zużycia stali [kg / m^2]			
			12 – 11,71	18 – 15,88	24 – 19,52	30 – 23,22
Wiatr str. I	6	6	12 – 11,71	18 – 15,88	24 – 19,52	30 – 23,22
Śnieg str. III	12	6	12 – 8,94	18 – 12,37	24 – 15,22	30 – 18,46



8. Podsumowanie i plany dalszych prac

Portalowe ramy stalowe to bardzo efektywny typ konstrukcji, jednakże zaprojektowanie optymalnej konstrukcji ramowej zabiera inżynierom wiele czasu. Problem jest złożony z powodu dużej liczby parametrów (zmiennych projektowych – opisujących geometrię przekrojów poszczególnych elementów składowych ramy), które projektant musi przyjąć. Tylko odpowiednie przyjęcie wszystkich parametrów jednocześnie, daje wynik satysfakcjonujący. W niniejszym rozdziale zebrano najważniejsze wnioski dotyczące optymalnego projektowania rozważanych układów ramowych, a także zasugerowano kierunki dalszych prac wynikających z niniejszej rozprawy.

8.1. Metodologia projektowania z zastosowaniem AG

Podstawowym sposobem wykorzystania AG w projektowaniu konstrukcji ramowych jest program komputerowy. W ramach niniejszej pracy opracowano program o nazwie GAAD (Genetic Algorithms Aided Design).

W programie GAAD użyto algorytmu genetycznego dostosowanego do optymalizacji układów ramowych. Użytkownik może zmieniać ustawienia algorytmu genetycznego w zakresie: rodzaju selekcji (ruletkowa, turniejowa), operatora krzyżowania (krzyżowanie jednopunktowe, dwupunktowe, wielopunktowe, równomierne) i prawdopodobieństwa jego wystąpienia, operatora mutacji (mutacja jednopunktowa, wielopunktowa) i prawdopodobieństwa jego wystąpienia, sposobu sukcesji (elityzm, z pełnym zastępowaniem), a także rodzaju funkcji celu (funkcja celu oparta na koncepcji funkcji kary śmierci, oparta na koncepcji funkcji kary zewnętrznej).

Program GAAD umożliwia optymalizację parterowych układów ramowych (ramy portalowe jednoprzęsłowe lub wieloprzęsłowe o małych spadkach), a zatem użytkownik może definiować: wysokości słupów, liczbę podziałów słupów na elementy, rozpiętości rygli, liczbę podziałów rygli na elementy, obciążenia, gatunek stali.

Opracowana w języku Fortran 90 aplikacja numeryczna może być stosowana w środowisku Windows lub Linux i z powodzeniem wykorzystywana na komputerach osobistych.

Tak zbudowany program w aktualnej jego postaci z powodzeniem może służyć jako narzędzie wspomagające projektowanie układów ramowych. Pozwala na zwiększenie wydajności inżynierów i pracowni projektowych, zwiększa konkurencyjność zaprojektowanych konstrukcji, pozwala w krótkim czasie oszacować koszt konstrukcji stalowej (przydatny w firmach wykonawczych oferujących konstrukcje stalowe), zaś po wyłączeniu modułu optymalizacji może być stosowany jedynie jako program wymiarujący elementy ramy zgodnie z PN lub EC-3. Dodatkowo program z racji swojej struktury blokowej może również służyć jako narzędzie optymalizacyjne w innych problemach projektowania i modelowania inżynierskiego, o czym świadczy dotychczasowe jego wykorzystanie w pracach: Pankau, Werochowski (2005a), oraz Pankau, Nowicki (2005b).

Przykładowy czas rozwiązania problemu optymalizacji konstrukcji stalowej ramy portalowej RMO o rozpiętości 30 m (podział rygla na 8 elementów) oraz wysokości słupa 12 m (podział słupa na 3 elementy) wynosi około 7 minut, natomiast dla konstrukcji o najmniejszej ilości elementów czas ten nie przekracza 2 minut.

8.2. Wykorzystanie AG w projektowaniu ram zgodnie z EC-3

Oprócz podstawowego sposobu wykorzystania AG do projektowania konstrukcji metalowych (w opisywanym przypadku portalowych ram parterowych) – opracowany program komputerowy, można wykorzystywać uzyskane wyniki takie jak: tabele opisujące geometrie, tabele aktywności ograniczeń, wykresy i zależności; zamieszczone w niniejszej pracy. Wówczas projektant ma możliwość korzystania z gotowych rozwiązań konstrukcyjnych, które mogą być stosowane w rzeczywistych zagadnieniach konstrukcyjnych. W niniejszym rozdziale zamieszczono najważniejsze wnioski i wskazówki mające na celu ułatwienie korzystania z materiału znajdującego się w niniejszej pracy. Może być on przydatny zwłaszcza w początkowym okresie

obowiązywania normy EC-3 w miejsce normy PN. Norma EC-3 będzie obowiązywała projektantów już w 2010 roku.

8.2.1. Ramy składające się z elementów o przekrojach monosymetrycznych (RMO)

Szczegółową analizę obliczeń (zawartych w załączniku A) ram składających się z elementów o przekrojach monosymetrycznych przeprowadzono w Rozdziale 6. Podczas analizy koncentrowano się głównie na zależnościach pomiędzy wysokością ramy, rozpiętością ramy, rozstawami ram, a masą konstrukcji stalowej w przeliczeniu na kg/m^2 . Wysznuo następujące wnioski:

- Dobierając główny układ konstrukcyjny obiektu (wykorzystujący konstrukcję ramową), należy zwrócić szczególną uwagę na rozstawy ram, ponieważ od tego parametru w dużej mierze zależy ekonomiczność przyjętych rozwiązań. Jak pokazano na rysunkach 6.15, 6.16, 6.17 oraz 6.18, wartość wskaźnika zużycia stali (kg/m^2) znacznie spada (nawet o około 35% przy zmianie rozstawu ram z 6m na 12m) wraz ze wzrostem rozstawu ram. Można stwierdzić, że im większy rozstaw ram tym lżejsza konstrukcja, lecz należy mieć na względzie konstrukcję płatowni dachowych i elementów wsporczych pod obudowę, których masa wraz ze wzrostem rozstawu ram, również rośnie i których konstrukcję należy rozwiązać wcześniej, aby mieć pełen obraz sytuacji.
- Szacując masę (a pośrednio także koszt) konstrukcji stalowej, należy zwrócić szczególną uwagę na wysokość słupów ram. Jak wynika z rysunków 6.19, 6.20, 6.21 oraz 6.22 masa konstrukcji stalowej znacznie rośnie wraz ze wzrostem wysokości słupów ram. Jeśli inżynier na etapie wstępnego szacowania wskaźnikowego ciężaru konstrukcji stalowej skupi się jedynie na rozpiętości ramy, z pewnością popełni znaczny błąd. Jak wynika z rysunku 6.19, masa dwóch ram stalowych o takich samych rozpiętościach i w takich samych rozstawach ram może różnić się nawet 3 krotnie w przypadku gdy jedna z opisywanych ram ma wysokość słupa wynoszącą 6m, a druga ma wysokość słupa wynoszącą 12m.
- Projektując ramę portalową na podstawie zawartych w niniejszej pracy tablic należy przede wszystkim sprawdzić zgodność obciążeń z przyjętymi w niniejszej pracy. Jak wynika z wykresów zamieszczonych w rozdziale 6, zmiana

obciążenia o około 12% (wzrost obciążenia pionowego z uwagi na zmianę strefy śniegowej z II na III), powoduje wzrost ciężaru konstrukcji stalowej nawet do około 10%. Podczas projektowania konstrukcji należy dążyć do możliwie najlepszego rozpoznania oddziaływań na konstrukcję stalową, ponieważ obciążenia mają znaczny wpływ na końcowy efekt ekonomiczny (wyrażony wskaźnikiem zużycia stali w kg/m^2).

- Przyjmując sztywności elementów rygla i słupów zaleca się, aby dążyć do zwiększania sztywności rygla i zmniejszania sztywności słupa. Takie podejście pozwala zmniejszyć współczynnik wybożeniowy słupa i zwiększyć jego nośność. Należy jednak pamiętać, iż sztywność słupów musi być wystarczająca z uwagi na wszelkie ograniczenia, a głównie z uwagi na ograniczenie przemieszczeń poziomych ramy.
- Tylko sprawdzenie przyjętych geometrii przez inżyniera daje podstawę do używania zamieszczonych w załącznikach geometrii w dalszym procesie projektowania (rysunki budowlane i wykonawcze).

8.2.2. Ramy składające się z elementów o przekrojach bisymetrycznych (RBI)

Dokładną analizę obliczeń (zawartych w załączniku B) ram składających się z elementów o przekrojach bisymetrycznych przeprowadzono w Rozdziale 6. W tym przypadku koncentrowano się głównie na zależnościach pomiędzy wskaźnikami zużycia stali dla ram złożonych z elementów o przekrojach monosymetrycznych (RMO) i ram złożonych z elementów o przekrojach bisymetrycznych (RBI). Wysznuo następujące wnioski:

- Przekroje monosymetryczne, za pomocą których ukształtowane są elementy składowe ram, dają możliwość bardzo dobrego dopasowania geometrii przekroju do panujących sił w elemencie składowym ramy oraz do warunków brzegowych i geometrii elementu składowego ramy. Dzięki różnej geometrii półek przekroju możliwe jest takie ich dobranie, aby rozkład naprężeń w przekroju był najbardziej korzystny (optymalny). Cecha o której wspomniano powyżej jest tym bardziej przydatna, im większe są różnice pomiędzy poszczególnymi możliwymi wymiarami (dyskretnymi wyborami) elementów składowych przekroju (półek oraz środka).

- Ramy (RMO) charakteryzują się mniejszym zużyciem stali w porównaniu do ram (RBI), co wynika z powyższego wniosku i potwierdza się na rysunkach 6.26, 6.27.

8.3. Wykorzystanie AG w projektowaniu ram zgodnie z PN

Rozważany w niniejszej pracy problem optymalnego projektowania ram zgodnie z PN ewoluował w trakcie opracowywania rozprawy. Jeszcze kilka lat temu, w trakcie obowiązywania polskiej normy do projektowania konstrukcji metalowych planowano przeprowadzić optymalizację ram jedynie zgodnie z PN. Z czasem, wraz z ekspansją europejskich norm do projektowania, problemy optymalizacji ram zgodnie z PN i EC-3 stały się problemami równorzędnymi. W rezultacie po ogłoszeniu daty wprowadzenia normy europejskiej do projektowania konstrukcji metalowych (EC-3), problem optymalizacji ram zgodnie z PN stał się problemem drugorzędny i rozwiązywanym raczej w celu zaspokojenia ciekawości i uzyskania odpowiedzi na pytanie: czy projektowanie zgodnie z PN daje wyniki optymalne o większych wskaźnikach zużycia stali (kg/m^2) w porównaniu do projektowania zgodnie z EC-3, czy może jest zupełnie odwrotnie.

Na podstawie analiz obliczeń (podanych w załączniku C) ram składających się z elementów o przekrojach bisymetrycznych, przeprowadzonych w Rozdziale 7, wnioskuje się, iż przejście z polskich norm do projektowania konstrukcji metalowych na normy europejskie spowoduje zmniejszenie wagi konstrukcji stalowych. Jednak tak oczywisty wniosek wynika głównie z faktu, iż normy obciążeniowe (śnieg wiatr) są na dzień dzisiejszy normami wspólnymi, podczas gdy w trakcie opracowywania normy PN-90/B-03200 obowiązywały inne normy obciążeniowe (mniejsze obciążenie śniegiem, inne współczynniki obliczeniowe, inne obciążenie wiatrem).

8.4. Plany dalszych prac

Podczas pracy nad niniejszą rozprawą wyłaniały się kolejne ciekawe problemy, które wyznaczają kierunek dalszych prac związanych z wykorzystaniem AG do projektowania ram stalowych. Poniżej przedstawiono listę zagadnień, które interesują autora i którym autor chciałby poświęcić się w najbliższej przyszłości:

- Optymalizacja konstrukcji stalowej z uwzględnieniem kosztu fundamentów – w tym zagadnieniu należy rozpatrzyć różne schematy statyczne ramy stalowej. Konstrukcja przegubowo połączona z fundamentami zachowuje się inaczej od konstrukcji zamocowanej w fundamentach, z kolei wielkość fundamentów zależy od schematu konstrukcji i sił przekazywanych na fundamenty, zatem jest to problem (optymalizacji wielokryterialnej), którego rozwiązanie może prowadzić do ciekawych wniosków. Odpowiednio zmodyfikowane algorytmy genetyczne nadają się do rozwiązywania problemów wielokryterialnych (Osyczka (2002)).
- Optymalizacja układów ramowych ze zbieżnymi elementami składowymi słupów oraz rygli – w tym zagadnieniu pryzmatyczne elementy składowe ram zastąpione zostaną elementami zbieżnymi i dla takich założeń zostanie przeprowadzony proces optymalizacji. Do podjęcia tego zagadnienia skłoniła autora analiza aktywności ograniczeń, z których wynika, że w pewnych przypadkach zbieżne elementy składowe ram pozwolą dodatkowo zaoszczędzić materiał (lecz tezę tę należy sprawdzić, biorąc również pod uwagę zwiększone koszty produkcji konstrukcji złożonej z elementów zbieżnych).
- Optymalizacja z uwagi na ilość odpadów w trakcie wytwarzania konstrukcji stalowej – polegać będzie na takim doborze geometrii przekrojów, który pozwoli na zminimalizowanie odpadów powstających w wyniku wycięcia z arkusza blachy półek i środników o żądanych szerokościach. Znając proces technologiczny cięcia elementów (znając dodatki na cięcie), można tak dobrać gabaryty przekroju, aby zminimalizować odpad technologiczny i jednocześnie koszt konstrukcji.
- Zmiana procedur wymiarujących przekroje i elementy z procedur, które oddzielnie obliczają nośność przekrojów przy ściskaniu i nośność przekrojów przy zginaniu, na procedury obliczające nośność przekrojów ściskanych i zginanych. Zmiana ta prawdopodobnie pozwoli w pewnych przypadkach

obciążeń na zwiększenie nośności przekrojów, a co za tym idzie na zmniejszenie zużycia materiału potrzebnego do wzniesienia konstrukcji.

- Optymalizacja układów ramowych z uwagi na układ konstrukcyjny całego obiektu – zagadnienie sprowadza się do rozszerzenia procesu optymalizacji również na płatwie (zimnogięte, z profili walcowanych, kratownicowe) oraz słupy pośrednie (najczęściej z profili walcowanych).
- Optymalizacja układów ramowych z wykorzystaniem danych o imperfekcjach zebranych w trakcie procesu wytwarzania i montażu konstrukcji stalowej, co pozwoli (przy zachowaniu reżimu technologicznego) na dalsze zmniejszanie zużycia materiału
- Opracowanie profesjonalnego i przyjaznego w użyciu programu komputerowego do optymalizacji przestrzennych konstrukcji ramowych, który mógłby wspomóc inżynierów w codziennej pracy i pozwoli na optymalne projektowanie konstrukcji w krótkim czasie.

Opisane zagadnienia można podejmować w różnych wzajemnych konfiguracjach, co czyni temat optymalnego projektowania konstrukcji ramowych tematem perspektywnym i niezmiernie ciekawym.

Bibliografia

- Arabas J., (2001), *Wykłady z algorytmów ewolucyjnych*, WNT.
- Arora J. S., Huang, M. W., (1994), *Methods for optimization of nonlinear problems with discrete variables: a review*, Struct.Opt.,8,69-85.
- Bäck T., (1995), *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice*, Oxford Univ. Press, NewYork.
- Bauer J., (1994), *A survey of methods for discrete optimum structural design*, Computer Assisted Mechanics & Engineering Sciences, Vol.1, No.1/2, pp.27-38.
- Biegus A., (1997), *Nośność graniczna stalowych konstrukcji prętowych*, Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Błachowski B., Gutkowski W., (2008), *Dyskretna optymalizacja konstrukcji sterowana zmiennymi stanu*, Modelowanie inżynierskie 36, 27-34, Gliwice.
- Bochenek B., (1987), *Multimodal optimal design of a compressed column with respect to buckling in two planes*, International Journal of Solids and Structures, Vol. 23, str. 599-605.
- Bojczuk D., Mróz Z., (1999), *Optimal topology and configuration design of trusses with stress and buckling constraints*, Structural Optimization 17, 25–35.
- Brandt A. M., (1977), *Kryteria i metody optymalizacji konstrukcji*, PWN, Warszawa.
- Brandt A. M., (red.) (1978), *Podstawy optymalizacji elementów budowlanych*, PWN, Warszawa.
- Branicki Cz., (1999), *Komputerowa analiza konstrukcji prętowych Bezpośrednią Metodą Przemieszcze.*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
- Bródka J., Broniewicz M., (2001), *Projektowanie konstrukcji stalowych zgodnie z Eurokodem 3-1-1 wraz z przykładami obliczeń*, Wydawnictwa Politechniki Białostockiej.
- Cai J., Thierauf G., (1993), *Discrete optimization of structures using an improved penalty function method*, Eng.Opt.,21,293-306.
- Chen Y., Hu K., (2008), *Optimal design of steel portal frames based on genetic algorithm*, Front. Archit. Civ. Eng. 2(4), 318-322. Chiny.
- Chróścielewski J., Szymczak C., (1987), *Iteracyjna metoda optymalnego projektowania cienkich płyta na podłożu sprężystym o więzach jednostronnych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, nr 399, Budownictwo Lądowe nr 42, str. 13-24.

Dasgupta D., Michalewicz Z., (1997), *Evolutionary Algorithms in Engineering Applications*, Springer Verlag Berlin Heidelberg, New-York.

Davis L., (1991), *Handbook of Genetic Algorithm*, Van Nostrand Reinhold, New York.

Davydov E.G., Sigal I., (1972), *Application of penalty function method in integer programming problems*, Engng Cybernetics, 10,21-24.

Dhingra A.K., Rao S.S., (1992), *A neural network based approach to mechanical design optimization*, Eng. Opt. 20, 187-203.

Egner W., Życzkowski M., (2003), *Boundary perturbation method applied to optimal plastic design of beams under bending with shear*, Structural and Multidisciplinary Optimization 25, 117-127.

Farkas J., Szabo L., (1980), *Optimum design of beams and frames of welded I-sections by means of backtrack programming*, Acta Technica Academiae Scient. Hung., 91, 121-135.

Farkas J., (1984), *Optimum Design of Metal Structures*. Budapest: Akademiai Kiado.

Farkas J., Jarmai K., (1995), *Multiobjective optimal design of welded box beams*, Microcomput. Civ. Eng. 10, 249–255.

Farkas J., Jarmai K., (2003), *Economic Design of Metal Structures*, Millpress.

Findeisen W., Szymanowski J., Wierzbicki A., (1977), *Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa

Gang Li, Ren-Gen Zhou, Lian Duan, Wai-Fah Chen, (1999), *Multiobjective and multilevel optimization for steel frames*, Engineering Structures 21, 519–529.

Gero M.B.P., Garcia A.B., Coz Diaz J.J., (2005), *A modified elitist genetic algorithm applied to the design optimization of complex steel structures*, Journal of Constructional Steel Research 62, 1303-1309.

Gero M.B.P., Garcia A.B., Coz Diaz J.J., (2006), *Design optimization of 3D steel structures: Genetic algorithms vs. classical techniques*, Journal of Constructional Steel Research 61, 265-280.

Gierliński J., Mróz Z., (1981), *Optimal Design of Elastic Plates and Beams Taking Large Deflections and Shear Forces into Account*, Acta Mechanica 39, 77-92.

Giżejowski M., Król P., Ślęczka L., (2008), *Projektowanie elementów rozciąganych i ściskanych osiowo według PN-EN 1993-1-1 i PN-EN 1993-1-5*, Inżynieria i Budownictwo 3/2008, 126-134.

Giżejowski M., Wierzbicki S., Kubiszyn W., (2008), *Projektowanie elementów zginanych według PN-EN 1993-1-1 i PN-EN 1993-1-5*, Inżynieria i Budownictwo 3/2008, 134-145.

Goldberg D. E., (1989), *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company Inc. Reading, MA.

Goldberg D. E., (2003), *Algorytmy genetyczne i ich zastosowania*, WNT, Warszawa.

Guerlement G., Targowski R., Gutkowski W., Zawidzka J., Zawidzki J. (2001), *Discrete minimum weight design of steel structures using EC3 code*, Structural and Multidisciplinary Optimization 22, 322-327.

Gutkowski W., Bauer J., Iwanow Z., (1986), *Minimum Weight design of space frames from catalogue*, W: K.Heki (Ed.) *Shells, Membranes and Space Frames Proc, IASS Symposium*, Elsevier, Amsterdam, Vol.3, 229-236.

Gutkowski W., Bauer J., (Red.) (1994), *Discrete Structural Optimization – Sympozjum IUTAM*, 31.08-03.09.1993, Zakopane, Polska, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Nowy Jork.

Gutkowski W., Mróz Z. (Red.), *Proceedings of the Second World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization*, Wydawnictwo Inżynieria, 1997.

Hayalioglu M.S., Degertekin S.O., (2005), *Minimum cost design of steel frames with semi-rigid connections and column bases via genetic optimization*, Computers and Structures 83, 1849–1863.

Hemp W.S., (1973), *Optimum Structures*, Clarendon Press, Oxford.

Holland J. H., (1975), *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press (and MIT Press, Cambridge, 1992).

Huang M. W., Arora J. S., (1997), *Optimal design of steel structures using standard sections*, Structural Optimization, 14, 24-35, pp.24-35.

Isenberg J., Pereyra V., Lawver D., (2002), *Optimal design of steel frame structures*, Applied Numerical Mathematics 40, 59–71.

Jarmai K., Farkas J., (1999), *Cost calculation and optimisation of welded steel structures*, Journal of Constructional Steel Research 50, 115–135.

Jendo S., Paczkowski W.M., (1993), *Multicriteria discrete optimization of large scale truss systems*, Structural Optimization 6, 238-249.

Jenkins W.M., (1992), *Plane frame optimum design environmentbased on genetic algorithm*, Journal of Structural Engineering 118, 3103-3112.

Jenkins W. M., (2002), *A decimal – coded evolutionary algorithm for constrained optimization*, Computers and Structures, 80, 471-480.

Kallassy A., Marcelin J. L. (1997), *Optimization of stiffened plates by genetic search*, Structural Optimization, 13 , 164-141.

Kameshki E.S., Saka M. P., (2001), *Optimum design of nonlinear steel frames with semi-rigid connections using a genetic algorithm*, Computers and Structures, 1593-1604.

Kincaid R. K., (1993), *Minimizing distortion in truss structures: a comparison of simulated annealing and tabu search*, Struct.Opt.,5,217-224.

Kolka A., Szymczak C., (1984), *Optymalizacja zginanej i skręcanej belki o przekroju dwuteowym*, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, nr 368, Budownictwo Lądowe nr 39, str. 35-46.

Koza J., (1992), *Genetic Programming*, Cambridge, MIT Press.

Kozłowski A., Stankiewicz B., Wojnar A, (2008), *Obliczanie elementów zginanych i ściskanych według PN-EN 1993-1-1*, Inżynieria i Budownictwo 9/2008, 477-484.

Kravanja S., Zula T., (2010), *Cost optimization of industrial steel building structures*, Advances in Engineering Software 41, 442-450.

Majid K. I., (1981), *Optymalne projektowanie konstrukcji*, PWN, Warszawa.

May S.A., Balling R.J., (1992), *A filtered simulated annealing strategy for discrete optimization of 3D steel frameworks*, Structural Optimization 4, 142-148.

Michalewicz Z., (1992), *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer Verlag Berlin Heidelberg, New York.

Michalewicz Z., (1997), *Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne*, WNT, Warszawa.

Michalewicz Z., Fogel D. B., (2000), *How to Solve it: Modern Heuristics*, Springer, Berlin, Springer.

Michell A.G.M., (1904), *The limit of economy of material in frame structures*, Philosophy Magazine 8, 589-597.

Miettinen K., Neittaanmäki P., Mäkelä M. M., Périaux J. Eds. (1999), *Evolutionary Algorithms in Engineering and Computer Science*, John Wiley.

Mikulski L., (1999), *Optymalne kształtowanie sprężystych układów prętowych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.

Mikulski T., Szymczak C., (1986), *Optymalne kształtowanie ściskanych prętów cienkościennych o przekroju otwartym*, Inżynieria i Budownictwo 1986, nr 44, str. 454-457.

Mitsuo Gen, Runwei Cheng, (2000), *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*, J.Wiley, New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto.

Nizar Bel Hadj Ali, Mohamed Sellami, Anne-Françoise Cutting-Decelle, Jean-Claude Mangind, (2009), *Multi-stage production cost optimization of semi-rigid steel frames using genetic algorithms*, Engineering Structures.

Nowacki W., (1974), *Mechanika Budowli*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe

Olhoff N., Rozvany G.(Red. WCSMO-1) *WCSMO-1, Proceedings of the First World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization, 28.05-02.06.1995, Goslar, Germany*, Pergamon, 921-926.

Ostwald M., (2005), *Podstawy optymalizacji konstrukcji* Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.

Osyczka A, (2002), *Evolutionary Algorithms for Single and Multicriteria Design Optimization*, Springer Physica- Verlag, Heidelberg New-York.

Pałkowski Sz. – praca zbiorowa, (1999), *Konstrukcje stalowe - wytyczne obliczania i projektowania, tablice*, Politechnika Koszalińska.

Pankau R., Werochowski W., (2005a), *Shape and cost optimization of cold formed „Z” purlin using genetic algorithms*, WCSMO-6, 30.05-05.06.2005, Rio de Janeiro, Brazylia.

Pankau R., Nowicki M., (2005b), *Równania konstytutywne stali i stopów pracujących w wysokich temperaturach – identyfikacja parametrów i przykłady zastosowań*, 09.2005, Krynica, Polska.

Pham D. T., Karaboga D., (2000), *Intelligent Optimisation Techniques, Genetic Algorithms, Tabu Search, Simulated Annealing and Neural Networks*, Springer.

Pruettha Nanakorn, Konlakarn Meesomklin, (2001), *An adaptive penalty function in genetic algorithms for structural design optimization*, Computers and Structures 79, 2527-2539

Pyrz M., (1990a), *Discrete optimization of geometrically nonlinear truss structures under stability constraints*, Structural Optimization, 2, 125-131.

Pyrz M., (1990b), *Discrete optimization of trusses with stability constraints*, Engineering Optimization, ,vol.16,pp.79-89.

Pyrz M., (1995), *Knowledge-based discrete optimization of truss structures*, Engng. Trans., 43, 1-2, 313-325.

Pyrz M., (1996), *Minimum weight design of trusses using heuristic rules*, Engng. Trans., 44, 3-4, pp. 361-373.

Pyrz M., Zawidzka J., (2000), *Minimum weight design of trusses using stress controlled sequential discrete method and genetic algorithm*, 33rd Solid Mechanics Conference SolMech, Volume of Abstracts, pp.325-6, 05.09-09.09.2000, Zakopane, Polska.

Rajan S.D., (1995), *Sizing, shape, and topology design optimization of trusses using genetic algorithms*, Jurnal of Structural Engineering, 1480-7.

Rakowski G., Kacprzyk Z., (2005), *Metoda Elementów Skończonych w mechanice konstrukcji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

Saka M.P., Ulker M., (1991), *Optimum design of geometrically non-linear space trusses*, Computers and Structures 41, 1387–1396.

Saka M.P., (2003), *Optimum design of pitched roof steel frames with haunched rafters by genetic algorithm*, Computers and Structures 81, 1967–1978.

Santiago Hernandez, Arturo N. Fontan, Juan C. Perezan, Pablo Loscos, (2005), *Design optimization of steel portal frames*, Advances in Engineering Software 36, 626–633.

Simoes L.M.C., (1996), *Optimization of frames with semi-rigid connections*, Computers and Structures 60, 433-442.

Shin Dong KU, Gurdal Z., Griffin O. H., (1990), *A penalty approach for nonlinear optimization with discrete design variables*, Eng.Opt.,16, 29-42, 1990.

Stachurski A., Wierzbicki Andrzej P., (1999), *Podstawy optymalizacji*, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.

Stachurski A., (2009), *Wprowadzenie do optymalizacji*, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.

Stark R. M., Nicholls R. L., (1979), *Matematyczne podstawy projektowania inżynierskiego*, PWN, Warszawa.

Szewczyk Z., Hajela P., (1993), *Neural network approximations in simulated annealing based optimal structural design*, Struct.Opt.,5,159-165.

Szymczak Cz., (1998), *Elementy teorii projektowania*, Wydawnictwo Naukowe PWN

Thanedar P. B., Vanderplaats G. N, (1995), *Survey of discrete variable optimization for structural design*, J.Struct.Engng,121,No2, pp.301-306.

Trykozko A., (1999), *Ćwiczenia z języka fortran*, Mikom

WCSMO-3, *Proceedings of the 3rd World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization*, CD-ROM, 05.17-05.21.1999, Niagara Falls - Amherst, New-York.

WCSMO-4, *Proceedings of the 4th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization*, CD-ROM, 04.06-08.06.2001, Dalian, Chiny, Liaoning Electronic Press.

WCSMO-5, *Proceedings of the 5th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization*, 19.05-23.05.2003, Lidio di Jesolo – Wenecja, Włochy.

WCSMO-6, *Proceedings of the 6th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization*, CD-ROM, 30.05-05.06.2005, Rio de Janeiro, Brazylia.

WCSMO-7, *Proceedings of the 7th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization*, CD-ROM, 21.05-25.05.2007, Seul, Korea.

WCSMO-8, *Proceedings of the 8th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization*, CD-ROM, 01.06-05.06.2009, Lizbona, Portugalia.

Yang J., Soh C. K., (1997), *Structural optimization by genetic algorithms with tournament selection*, Journal of Computing in Civil Engineering, 11, no3, pp.195-200.

Żochowski A., Mizukami K., (1983), *Minimum-weight design with displacements constraints in 2-dimensional elasticity*, Computers and Structures, Vol. 17, str. 365-369.

Normy do projektowania:

DIN 18800 Teil 1-4 Stahlbauten

PN-B-06200:1997, *Konstrukcje stalowe budowlane. Warunki wykonania i odbioru.*

PN-EN 1990, *Basis of Structural Design*

PN-EN 1991-1-1, *Oddziaływania ogólne. Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach.*

PN-EN 1991-1-3, *Oddziaływania ogólne. Obciążenie śniegiem.*

PN-EN 1991-1-4, *Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru.*

PN-EN 1993-1-1, *Projektowanie konstrukcji stalowych. Reguły ogólne i reguły dla budynków.*

PN-EN 1993 -1-5, *Blachownice.*

PN-EN 1993 -1-8, *Projektowanie połączeń.*

PN-82/B-02000, *Obciążenia budowli. Zasady ustalania wartości.*

PN-82/B-02001, *Obciążenia budowli. Obciążenia stałe.*

PN-82/B-02010, *Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie śniegiem.*

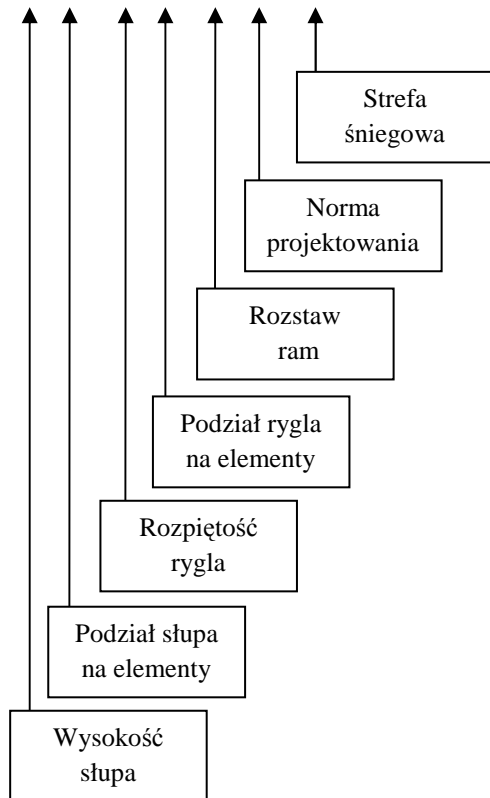
PN-82/B-02011, *Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem.*

PN-90/B-03200, *Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.*

Załącznik A – wyniki optymalizacji RMO zgodnie z EC-3

Objaśnienie oznaczeń:

6(2)-12(5)-6-EC-S3



Tablica A.1 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-12(5)-6-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6000 mm				
rozpiętość rygla	12 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 2 400 mm długości każdy				
wysokość słupa	6 000 mm				
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2			
wys. środника	300	300			
gr. środnika	4	4			
szer. półki górnej	160	220			
gr. półki górnej	6	10			
szer. półki dolnej	180	220			
gr. półki dolnej	8	10			
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. środnika	500	500	500	500	500
gr. środnika	4	4	4	4	4
szer. półki górnej	120	140	180	140	120
gr. półki górnej	8	10	8	10	8
szer. półki dolnej	180	260	220	260	180
gr. półki dolnej	6	6	6	6	6
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 11,68 (słupy: 5,87, rygiel: 5,81)					
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,03					

Tablica A.2 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-12(5)-6-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 6000 mm				
rozpiętość rygla	12 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 2 400 mm długości każdy				
wysokość słupa	9 000 mm				
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2			
wys. środnika	500	500			
gr. środnika	4	4			
szer. półki górnej	160	220			
gr. półki górnej	10	12			
szer. półki dolnej	160	280			
gr. półki dolnej	12	10			
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. środnika	500	500	500	500	500
gr. środnika	4	4	4	4	4
szer. półki górnej	200	160	100	160	200
gr. półki górnej	12	8	12	8	12
szer. półki dolnej	220	180	180	180	220
gr. półki dolnej	10	6	10	6	10
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 18,97 (słupy: 12,21, rygiel: 6,76)					
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,32					

Tablica A.3 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-12(5)-6-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6000 mm				
rozpiętość rygla	12 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 2 400 mm długości każdy				
wysokość słupa	9 000 mm				
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2			
wys. średnika	500	500			
gr. średnika	4	4			
szer. półki górnej	200	280			
gr. półki górnej	6	8			
szer. półki dolnej	240	280			
gr. półki dolnej	8	12			
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. średnika	500	500	500	500	500
gr. średnika	4	4	4	4	4
szer. półki górnej	220	160	220	160	220
gr. półki górnej	8	10	6	10	8
szer. półki dolnej	260	180	140	180	260
gr. półki dolnej	10	6	10	6	10
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 18,71 (słupy: 11,98, rygiel: 6,73)					
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,26					

Tablica A.4 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-18(5)-6-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 6000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	6 000 mm				
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2			
wys. średnika	600	600			
gr. średnika	5	5			
szer. półki górnej	160	200			
gr. półki górnej	6	14			
szer. półki dolnej	180	240			
gr. półki dolnej	8	12			
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. średnika	550	550	550	550	550
gr. średnika	4	4	5	5	5
szer. półki górnej	160	200	180	200	160
gr. półki górnej	12	10	14	10	12
szer. półki dolnej	260	160	160	160	260
gr. półki dolnej	12	14	16	14	12
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 14,85 (słupy: 5,94, rygiel: 8,91)					
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,25					

Tablica A.5 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-18(5)-6-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	6 000 mm				
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2			
wys. środника	550	550			
gr. środnika	5	5			
szer. półki górnej	200	280			
gr. półki górnej	8	12			
szer. półki dolnej	100	260			
gr. półki dolnej	12	8			
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. środnika	700	700	700	700	700
gr. środnika	5	5	5	5	5
szer. półki górnej	200	200	240	200	200
gr. półki górnej	6	10	10	10	6
szer. półki dolnej	240	240	200	240	240
gr. półki dolnej	10	8	12	8	10
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 15,30 (słupy: 5,81, rygiel: 9,48)					
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,41					

Tablica A.6 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-18(5)-6-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 6000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	9 000 mm				
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2			
wys. środnika	400	400			
gr. środnika	4	7			
szer. półki górnej	160	200			
gr. półki górnej	14	18			
szer. półki dolnej	220	280			
gr. półki dolnej	10	14			
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. środnika	600	600	600	600	600
gr. środnika	5	5	5	5	5
szer. półki górnej	120	220	280	220	120
gr. półki górnej	16	12	14	12	16
szer. półki dolnej	220	220	100	220	220
gr. półki dolnej	12	12	18	12	12
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 20,81 (słupy: 10,47, rygiel: 10,34)					
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,10					

Tablica A.7 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-18(5)-6-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	9 000 mm				
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2			
wys. środnika	400	400			
gr. środnika	4	8			
szer. półki górnej	120	140			
gr. półki górnej	14	28			
szer. półki dolnej	260	260			
gr. półki dolnej	12	16			
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. środnika	700	700	700	700	700
gr. środnika	5	5	5	5	5
szer. półki górnej	140	260	200	260	140
gr. półki górnej	8	10	16	10	8
szer. półki dolnej	240	200	300	200	240
gr. półki dolnej	10	10	8	10	10
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 21,38 (słupy: 11,31, rygiel: 10,07)					
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,06					

Tablica A.8 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-18(5)-9-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 9000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	6 000 mm				
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2			
wys. środnika	350	350			
gr. środnika	4	6			
szer. półki górnej	240	300			
gr. półki górnej	8	12			
szer. półki dolnej	160	240			
gr. półki dolnej	12	16			
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. środnika	800	800	800	800	800
gr. środnika	6	6	6	6	6
szer. półki górnej	220	260	220	260	220
gr. półki górnej	8	12	18	12	8
szer. półki dolnej	100	200	300	200	100
gr. półki dolnej	14	10	10	10	14
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 12,35 (słupy: 4,22, rygiel: 8,13)					
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 1,93					

Tablica A.9 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-18(5)-9-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 9000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	6 000 mm				
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2			
wys. środника	600	600			
gr. środnika	6	5			
szer. półki górnej	280	160			
gr. półki górnej	6	18			
szer. półki dolnej	200	280			
gr. półki dolnej	8	14			
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. środnika	750	750	750	750	750
gr. środnika	6	6	6	6	6
szer. półki górnej	180	280	280	280	180
gr. półki górnej	8	10	12	10	8
szer. półki dolnej	260	140	220	140	260
gr. półki dolnej	12	18	20	18	12
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 13,14 (słupy: 4,69, rygiel: 8,44)					
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,04					

Tablica A.10 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-18(5)-9-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 9000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	9 000 mm				
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2			
wys. środnika	500	500			
gr. środnika	4	6			
szer. półki górnej	240	180			
gr. półki górnej	8	22			
szer. półki dolnej	240	280			
gr. półki dolnej	10	18			
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. środnika	850	850	850	850	850
gr. środnika	6	6	6	6	6
szer. półki górnej	120	160	220	160	120
gr. półki górnej	14	22	16	22	14
szer. półki dolnej	260	180	180	180	240
gr. półki dolnej	8	16	16	16	8
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 16,64 (słupy: 7,77, rygiel: 8,86)					
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 1,98					

Tablica A.11 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-18(5)-9-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 9000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	9 000 mm				
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2			
wys. średnika	450	450			
gr. średnika	4	8			
szer. półki górnej	220	180			
gr. półki górnej	10	24			
szer. półki dolnej	240	280			
gr. półki dolnej	12	18			
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. średnika	800	800	800	800	800
gr. średnika	6	6	6	6	6
szer. półki górnej	180	200	200	200	180
gr. półki górnej	12	18	20	18	12
szer. półki dolnej	180	240	240	240	180
gr. półki dolnej	16	14	16	14	16
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 17,94 (słupy: 8,44, rygiel: 9,50)					
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 1,94					

Tablica A.12 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-18(5)-12-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 12 000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	6 000 mm				
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2			
wys. średnika	550	550			
gr. średnika	4	4			
szer. półki górnej	200	260			
gr. półki górnej	10	14			
szer. półki dolnej	180	300			
gr. półki dolnej	14	14			
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. średnika	900	900	900	750	750
gr. średnika	6	7	7	6	7
szer. półki górnej	200	260	240	220	280
gr. półki górnej	12	12	18	14	8
szer. półki dolnej	200	240	160	360	280
gr. półki dolnej	12	8	20	8	10
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 10,77 (słupy: 3,55, rygiel: 7,22)					
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,15					

Tablica A.13 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-18(5)-12-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	6 000 mm				
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2			
wys. środника	800	800			
gr. środnika	6	6			
szer. półki górnej	160	300			
gr. półki górnej	12	12			
szer. półki dolnej	220	320			
gr. półki dolnej	10	14			
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. środnika	700	700	700	700	700
gr. środnika	7	5	6	5	7
szer. półki górnej	300	240	260	240	300
gr. półki górnej	12	10	14	10	12
szer. półki dolnej	300	200	280	200	300
gr. półki dolnej	16	12	10	12	16
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 11,30 (słupy: 4,55, rygiel: 6,74)					
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,85					

Tablica A.14 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-18(5)-12-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 12 000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	9 000 mm				
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2			
wys. środnika	500	500			
gr. środnika	4	6			
szer. półki górnej	300	300			
gr. półki górnej	8	18			
szer. półki dolnej	260	280			
gr. półki dolnej	14	20			
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. środnika	850	850	850	850	850
gr. środnika	6	6	6	6	6
szer. półki górnej	160	240	240	240	160
gr. półki górnej	10	16	20	16	10
szer. półki dolnej	260	200	240	200	260
gr. półki dolnej	12	18	18	18	12
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 14,52 (słupy: 7,01, rygiel: 7,50)					
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,04					

Tablica A.15 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-18(5)-12-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	9 000 mm				
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2			
wys. środника	550	550			
gr. środnika	4	6			
szer. półki górnej	260	260			
gr. półki górnej	10	20			
szer. półki dolnej	260	320			
gr. półki dolnej	12	18			
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. środnika	950	950	950	950	950
gr. środnika	7	7	7	7	7
szer. półki górnej	200	220	300	220	200
gr. półki górnej	10	22	14	22	10
szer. półki dolnej	180	160	240	160	180
gr. półki dolnej	20	20	14	20	20
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 15,68 (słupy: 7,04, rygiel: 8,64)					
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 1,95					

Tablica A.16 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-12(3)-9-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 9 000 mm				
rozpiętość rygla	12 000 mm				
podział rygla	na 3 elementy po 4 000 mm długości każdy				
wysokość słupa	6 000 mm				
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2			
wys. środnika	400	400			
gr. środnika	4	7			
szer. półki górnej	140	100			
gr. półki górnej	12	18			
szer. półki dolnej	160	220			
gr. półki dolnej	8	12			
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3		
wys. środnika	550	550	550		
gr. środnika	4	4	4		
szer. półki górnej	120	240	120		
gr. półki górnej	8	10	8		
szer. półki dolnej	240	200	240		
gr. półki dolnej	10	8	10		
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 9,85 (słupy: 4,98, rygiel: 4,87)					
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,20					

Tablica A.17 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-12(3)-9-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy			
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 9 000 mm		
rozpiętość rygla	12 000 mm		
podział rygla	na 3 elementy po 4 000 mm długości każdy		
wysokość słupa	6 000 mm		
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy		
Wyniki optymalizacji			
Słup ramy (geometria w mm)			
fundament → naroże ramy			
nr elementu	1	2	
wys. środника	550	550	
gr. środnika	4	4	
szer. półki górnej	180	180	
gr. półki górnej	8	14	
szer. półki dolnej	260	300	
gr. półki dolnej	8	12	
Rygiel ramy (geometria w mm)			
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy			
nr elementu	1	2	3
wys. środnika	650	650	650
gr. środnika	5	5	5
szer. półki górnej	300	200	300
gr. półki górnej	6	10	6
szer. półki dolnej	160	220	160
gr. półki dolnej	18	8	18
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 10,12 (słupy: 4,67, rygiel: 5,45)			
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,17			

Tablica A.18 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-12(3)-9-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy			
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 9 000 mm		
rozpiętość rygla	12 000 mm		
podział rygla	na 3 elementy po 4 000 mm długości każdy		
wysokość słupa	9 000 mm		
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy		
Wyniki optymalizacji			
Słup ramy (geometria w mm)			
fundament → naroże ramy			
nr elementu	1	2	
wys. środnika	450	450	
gr. środnika	4	4	
szer. półki górnej	280	260	
gr. półki górnej	4	10	
szer. półki dolnej	220	260	
gr. półki dolnej	8	10	
Rygiel ramy (geometria w mm)			
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy			
nr elementu	1	2	3
wys. środnika	700	700	700
gr. środnika	5	5	5
szer. półki górnej	200	140	200
gr. półki górnej	10	18	10
szer. półki dolnej	200	280	200
gr. półki dolnej	10	8	10
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 15,14 (słupy: 8,78, rygiel: 6,36)			
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,08			

Tablica A.19 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-12(3)-9-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy			
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 9 000 mm		
rozpiętość rygla	12 000 mm		
podział rygla	na 3 elementy po 4 000 mm długości każdy		
wysokość słupa	9 000 mm		
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy		
Wyniki optymalizacji			
Słup ramy (geometria w mm)			
fundament → naroże ramy			
nr elementu	1	2	
wys. średnika	550	550	
gr. średnika	4	4	
szer. półki górnej	260	180	
gr. półki górnej	6	12	
szer. półki dolnej	240	320	
gr. półki dolnej	8	14	
Rygiel ramy (geometria w mm)			
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy			
nr elementu	1	2	3
wys. średnika	650	650	650
gr. średnika	5	5	5
szer. półki górnej	140	220	140
gr. półki górnej	10	10	10
szer. półki dolnej	220	120	220
gr. półki dolnej	14	16	14
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 15,43 (słupy: 9,08, rygiel: 6,35)			
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,09			

Tablica A.20 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-12(3)-12-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy			
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 12 000 mm		
rozpiętość rygla	12 000 mm		
podział rygla	na 3 elementy po 4 000 mm długości każdy		
wysokość słupa	6 000 mm		
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy		
Wyniki optymalizacji			
Słup ramy (geometria w mm)			
fundament → naroże ramy			
nr elementu	1	2	
wys. średnika	500	500	
gr. średnika	4	5	
szer. półki górnej	220	120	
gr. półki górnej	6	18	
szer. półki dolnej	160	280	
gr. półki dolnej	10	12	
Rygiel ramy (geometria w mm)			
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy			
nr elementu	1	2	3
wys. średnika	550	550	550
gr. średnika	5	4	5
szer. półki górnej	140	240	140
gr. półki górnej	12	10	12
szer. półki dolnej	260	260	260
gr. półki dolnej	10	8	10
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 8,40 (słupy: 4,06, rygiel: 4,34)			
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,27			

Tablica A.21 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-12(3)-12-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy			
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm		
rozpiętość rygla	12 000 mm		
podział rygla	na 3 elementy po 4 000 mm długości każdy		
wysokość słupa	6 000 mm		
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy		
Wyniki optymalizacji			
Słup ramy (geometria w mm)			
fundament → naroże ramy			
nr elementu	1	2	
wys. środника	550	550	
gr. środnika	4	5	
szer. półki górnej	100	120	
gr. półki górnej	14	16	
szer. półki dolnej	200	260	
gr. półki dolnej	8	14	
Rygiel ramy (geometria w mm)			
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy			
nr elementu	1	2	3
wys. środnika	700	700	700
gr. środnika	5	5	5
szer. półki górnej	120	220	120
gr. półki górnej	12	10	12
szer. półki dolnej	260	220	260
gr. półki dolnej	8	10	8
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 8,80 (słupy: 4,23, rygiel: 4,57)			
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,20			

Tablica A.22 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-12(3)-12-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy			
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 12 000 mm		
rozpiętość rygla	12 000 mm		
podział rygla	na 3 elementy po 4 000 mm długości każdy		
wysokość słupa	9 000 mm		
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy		
Wyniki optymalizacji			
Słup ramy (geometria w mm)			
fundament → naroże ramy			
nr elementu	1	2	
wys. środnika	550	550	
gr. środnika	4	5	
szer. półki górnej	220	240	
gr. półki górnej	10	12	
szer. półki dolnej	260	300	
gr. półki dolnej	8	16	
Rygiel ramy (geometria w mm)			
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy			
nr elementu	1	2	3
wys. środnika	700	700	700
gr. środnika	5	5	5
szer. półki górnej	200	260	200
gr. półki górnej	10	10	10
szer. półki dolnej	220	120	220
gr. półki dolnej	12	18	12
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 13,05 (słupy: 7,93, rygiel: 5,12)			
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,08			

Tablica A.23 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-12(3)-12-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy			
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm		
rozpiętość rygla	12 000 mm		
podział rygla	na 3 elementy po 4 000 mm długości każdy		
wysokość słupa	9 000 mm		
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy		
Wyniki optymalizacji			
Słup ramy (geometria w mm)			
fundament → naroże ramy			
nr elementu	1	2	
wys. średnika	500	500	
gr. średnika	4	5	
szer. półki górnej	140	260	
gr. półki górnej	14	18	
szer. półki dolnej	260	300	
gr. półki dolnej	12	14	
Rygiel ramy (geometria w mm)			
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy			
nr elementu	1	2	3
wys. średnika	700	700	700
gr. średnika	5	5	5
szer. półki górnej	120	280	120
gr. półki górnej	16	12	16
szer. półki dolnej	280	100	280
gr. półki dolnej	10	14	10
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 13,87 (słupy: 8,69, rygiel: 5,17)			
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,03			

Tablica A.24 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-24(6)-6-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy						
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 6 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	6 000 mm					
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2				
wys. średnika	600	600				
gr. średnika	5	5				
szer. półki górnej	200	260				
gr. półki górnej	8	12				
szer. półki dolnej	160	280				
gr. półki dolnej	14	16				
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. średnika	800	800	800	800	800	800
gr. średnika	6	6	6	6	6	6
szer. półki górnej	120	220	200	200	220	120
gr. półki górnej	16	10	16	16	10	16
szer. półki dolnej	300	300	200	200	300	300
gr. półki dolnej	12	6	16	16	6	12
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 18,47 (słupy: 5,57, rygiel: 12,90)						
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,50						

Tablica A.25 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-24(6)-6-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy						
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	6 000 mm					
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2				
wys. środника	850	850				
gr. środnika	6	7				
szer. półki górnej	200	200				
gr. półki górnej	6	12				
szer. półki dolnej	200	280				
gr. półki dolnej	10	16				
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. środnika	750	750	750	750	750	750
gr. środnika	6	6	6	6	6	6
szer. półki górnej	360	180	320	320	180	360
gr. półki górnej	8	12	12	12	12	8
szer. półki dolnej	320	180	140	140	180	320
gr. półki dolnej	14	10	14	14	10	14
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 19,57 (słupy: 6,67, rygiel: 12,90)						
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 3,17						

Tablica A.26 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-24(6)-6-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy						
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 6 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	9 000 mm					
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2				
wys. środnika	600	600				
gr. środnika	6	7				
szer. półki górnej	180	260				
gr. półki górnej	14	16				
szer. półki dolnej	240	320				
gr. półki dolnej	12	16				
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. środnika	800	800	800	800	800	800
gr. środnika	6	6	6	6	6	6
szer. półki górnej	320	220	300	300	220	320
gr. półki górnej	8	12	10	10	12	8
szer. półki dolnej	280	300	220	220	300	280
gr. półki dolnej	14	6	12	12	6	14
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 23,93 (słupy: 10,76, rygiel: 13,17)						
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,37						

Tablica A.27 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-24(6)-6-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy						
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	9 000 mm					
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2				
wys. średnika	450	450				
gr. średnika	5	8				
szer. półki górnej	220	300				
gr. półki górnej	12	16				
szer. półki dolnej	260	280				
gr. półki dolnej	10	20				
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. średnika	850	850	850	850	850	850
gr. średnika	6	6	6	6	6	6
szer. półki górnej	160	240	300	300	240	160
gr. półki górnej	8	14	14	14	14	8
szer. półki dolnej	280	240	340	340	240	280
gr. półki dolnej	12	12	8	8	12	12
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 24,52 (słupy: 10,35, rygiel: 14,17)						
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,05						

Tablica A.28 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-24(6)-9-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy						
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 9 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	6 000 mm					
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2				
wys. średnika	750	750				
gr. średnika	7	7				
szer. półki górnej	220	240				
gr. półki górnej	12	16				
szer. półki dolnej	160	300				
gr. półki dolnej	16	16				
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. średnika	950	950	950	950	950	950
gr. średnika	7	7	7	7	7	7
szer. półki górnej	120	280	300	300	280	120
gr. półki górnej	18	10	12	12	10	18
szer. półki dolnej	320	120	300	300	120	320
gr. półki dolnej	14	14	8	8	14	14
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 15,60 (słupy: 5,15, rygiel: 10,45)						
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,7						

Tablica A.29 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-24(6)-9-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy						
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 9 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	6 000 mm					
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2				
wys. środника	1000	1000				
gr. środnika	7	7				
szer. półki górnej	180	280				
gr. półki górnej	14	14				
szer. półki dolnej	200	300				
gr. półki dolnej	10	16				
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. środnika	850	850	850	850	850	850
gr. środnika	8	6	6	6	6	8
szer. półki górnej	300	240	320	320	240	300
gr. półki górnej	20	12	14	14	12	20
szer. półki dolnej	300	100	240	240	100	300
gr. półki dolnej	20	10	8	8	10	20
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 16,67 (słupy: 5,70, rygiel: 10,96)						
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 3,30						

Tablica A.30 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-24(6)-9-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy						
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 9 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	9 000 mm					
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2				
wys. środnika	1000	1000				
gr. środnika	7	8				
szer. półki górnej	240	240				
gr. półki górnej	6	18				
szer. półki dolnej	260	320				
gr. półki dolnej	12	20				
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. środnika	950	950	950	950	950	950
gr. środnika	7	7	7	7	7	7
szer. półki górnej	260	260	240	240	260	260
gr. półki górnej	10	12	16	16	12	10
szer. półki dolnej	320	200	180	180	280	320
gr. półki dolnej	16	6	18	18	12	16
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 20,41 (słupy: 9,51, rygiel: 10,90)						
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,83						

Tablica A.31 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-24(6)-9-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy						
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 9 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	9 000 mm					
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2				
wys. średnika	1000	1000				
gr. średnika	7	8				
szer. półki górnej	120	280				
gr. półki górnej	14	20				
szer. półki dolnej	300	320				
gr. półki dolnej	12	18				
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. średnika	950	950	950	950	950	950
gr. średnika	8	7	7	7	7	8
szer. półki górnej	200	200	280	280	200	200
gr. półki górnej	20	12	12	12	12	20
szer. półki dolnej	300	220	260	260	220	300
gr. półki dolnej	20	12	14	14	12	20
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 21,92 (słupy: 9,93, rygiel: 11,99)						
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,70						

Tablica A.32 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-24(6)-12-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy						
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 12 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	6 000 mm					
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2				
wys. średnika	900	900				
gr. średnika	8	8				
szer. półki górnej	360	260				
gr. półki górnej	6	18				
szer. półki dolnej	200	300				
gr. półki dolnej	16	20				
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. średnika	850	850	850	850	850	850
gr. średnika	8	7	6	6	7	8
szer. półki górnej	280	260	260	260	260	280
gr. półki górnej	16	12	16	16	12	16
szer. półki dolnej	340	180	300	300	180	340
gr. półki dolnej	18	10	14	14	10	18
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 13,57 (słupy: 4,80, rygiel: 8,77)						
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 3,14						

Tablica A.33 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-24(6)-12-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy						
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	6 000 mm					
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2				
wys. środника	1000	1000				
gr. środnika	7	9				
szer. półki górnej	140	240				
gr. półki górnej	16	18				
szer. półki dolnej	280	300				
gr. półki dolnej	12	20				
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. środnika	950	950	950	950	950	950
gr. środnika	8	7	7	7	7	8
szer. półki górnej	240	240	300	300	240	240
gr. półki górnej	18	10	16	16	10	18
szer. półki dolnej	340	240	220	220	240	340
gr. półki dolnej	18	10	14	14	10	18
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 14,23 (słupy: 5,01, rygiel: 9,21)						
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 3,13						

Tablica A.34 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-24(6)-12-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy						
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 12 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	9 000 mm					
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2				
wys. środnika	950	950				
gr. środnika	7	7				
szer. półki górnej	280	340				
gr. półki górnej	8	18				
szer. półki dolnej	260	340				
gr. półki dolnej	14	18				
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. środnika	1100	1100	1100	1100	1100	1100
gr. środnika	8	8	8	8	8	8
szer. półki górnej	260	240	300	300	240	260
gr. półki górnej	10	12	14	14	12	10
szer. półki dolnej	320	260	320	320	260	320
gr. półki dolnej	16	12	12	12	12	20
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 17,52 (słupy: 7,41, rygiel: 10,10)						
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,48						

Tablica A.35 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-24(6)-12-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy						
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	9 000 mm					
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2				
wys. średnika	950	950				
gr. średnika	7	8				
szer. półki górnej	280	360				
gr. półki górnej	8	20				
szer. półki dolnej	300	360				
gr. półki dolnej	16	20				
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. średnika	1000	1000	1000	1000	1000	1000
gr. średnika	7	8	8	8	8	7
szer. półki górnej	240	280	300	300	280	240
gr. półki górnej	18	10	20	20	10	18
szer. półki dolnej	360	180	360	360	180	360
gr. półki dolnej	16	20	8	8	20	16
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 28,57 (słupy: 8,42, rygiel: 10,14)						
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,62						

Tablica A.36 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-30(8)-6-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy								
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 6 000 mm							
rozpiętość rygla	30 000 mm							
podział rygla	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	6 000 mm							
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2						
wys. średnika	900	900						
gr. średnika	7	8						
szer. półki górnej	180	280						
gr. półki górnej	10	12						
szer. półki dolnej	200	320						
gr. półki dolnej	10	14						
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. średnika	800	800	800	800	800	800	800	800
gr. średnika	7	6	6	7	7	6	6	7
szer. półki górnej	280	120	280	220	220	280	120	280
gr. półki górnej	18	6	10	16	16	10	6	18
szer. półki dolnej	320	220	200	300	300	200	220	320
gr. półki dolnej	16	12	12	12	12	12	12	16
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 21,20 (słupy: 6,39, rygiel: 14,81)								
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 3,65								

Tablica A.37 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-30(8)-6-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy								
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6 000 mm							
rozpiętość rygla	30 000 mm							
podział rygla	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	6 000 mm							
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2						
wys. środka	850	850						
gr. środka	6	7						
szer. półki górnej	240	260						
gr. półki górnej	10	16						
szer. półki dolnej	180	340						
gr. półki dolnej	14	16						
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. środka	850	850	850	850	850	850	850	850
gr. środka	7	7	6	6	6	6	7	7
szer. półki górnej	280	220	240	280	280	240	220	280
gr. półki górnej	14	8	14	12	12	14	8	14
szer. półki dolnej	340	200	260	320	320	260	200	340
gr. półki dolnej	16	6	8	10	10	8	6	16
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 21,27 (słupy: 6,51, rygiel: 14,76)								
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 3,48								

Tablica A.38 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-30(8)-6-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy								
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 6 000 mm							
rozpiętość rygla	30 000 mm							
podział rygla	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	9 000 mm							
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2						
wys. środka	900	900						
gr. środka	7	8						
szer. półki górnej	200	280						
gr. półki górnej	14	18						
szer. półki dolnej	220	320						
gr. półki dolnej	14	20						
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. środka	900	900	900	900	900	900	900	900
gr. środka	7	7	7	7	7	7	7	7
szer. półki górnej	160	100	300	240	240	300	100	160
gr. półki górnej	18	6	10	16	16	10	6	18
szer. półki dolnej	320	220	160	200	200	160	220	320
gr. półki dolnej	18	8	16	16	16	16	8	18
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 27,24 (słupy: 11,74, rygiel: 15,50)								
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 3,30								

Tablica A.39 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-30(8)-6-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy								
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6 000 mm							
rozpiętość rygla	30 000 mm							
podział rygla	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	9 000 mm							
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2						
wys. średnika	950	950						
gr. średnika	7	8						
szer. półki górnej	160	300						
gr. półki górnej	10	20						
szer. półki dolnej	260	300						
gr. półki dolnej	16	20						
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. średnika	950	950	950	950	950	950	950	950
gr. średnika	7	7	7	9	9	7	7	7
szer. półki górnej	280	120	260	280	280	260	120	280
gr. półki górnej	18	6	14	16	16	14	6	18
szer. półki dolnej	320	220	160	140	140	160	220	320
gr. półki dolnej	16	8	14	22	22	14	8	16
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 29,48 (słupy: 12,18, rygiel: 17,30)								
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 3,17								

Tablica A.40 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-30(8)-9-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy								
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 9 000 mm							
rozpiętość rygla	30 000 mm							
podział rygla	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	6 000 mm							
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2						
wys. średnika	1000	1000						
gr. średnika	7	9						
szer. półki górnej	240	240						
gr. półki górnej	8	20						
szer. półki dolnej	240	300						
gr. półki dolnej	18	22						
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. średnika	950	950	950	950	950	950	950	950
gr. średnika	8	7	8	7	7	8	7	8
szer. półki górnej	240	360	240	300	300	240	360	240
gr. półki górnej	20	6	14	14	14	14	6	20
szer. półki dolnej	360	160	380	340	340	380	160	360
gr. półki dolnej	18	14	6	10	10	6	14	18
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 17,80 (słupy: 5,68, rygiel: 12,12)								
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 3,58								

Tablica A.41 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-30(8)-9-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy								
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 9 000 mm							
rozpiętość rygla	30 000 mm							
podział rygla	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	6 000 mm							
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2						
wys. środника	1100	1100						
gr. środnika	8	8						
szer. półki górnej	120	320						
gr. półki górnej	18	14						
szer. półki dolnej	240	340						
gr. półki dolnej	14	20						
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. środnika	950	950	950	950	950	950	950	950
gr. środnika	9	7	7	7	7	7	7	9
szer. półki górnej	320	160	220	340	340	220	160	320
gr. półki górnej	16	10	16	14	14	16	10	16
szer. półki dolnej	360	220	300	380	380	300	220	360
gr. półki dolnej	18	10	12	16	16	12	10	18
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 18,80 (słupy: 5,79, rygiel: 13,01)								
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 3,88								

Tablica A.42 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-30(8)-9-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy								
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 9 000 mm							
rozpiętość rygla	30 000 mm							
podział rygla	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	9 000 mm							
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2						
wys. środnika	900	900						
gr. środnika	7	8						
szer. półki górnej	300	380						
gr. półki górnej	10	18						
szer. półki dolnej	280	380						
gr. półki dolnej	12	20						
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. środnika	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
gr. środnika	8	8	7	10	10	7	8	8
szer. półki górnej	360	100	280	260	260	280	100	360
gr. półki górnej	12	14	14	18	18	14	14	12
szer. półki dolnej	360	240	280	200	200	280	240	360
gr. półki dolnej	16	8	10	24	24	10	8	16
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 21,97 (słupy: 8,71, rygiel: 13,25)								
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,90								

Tablica A.43 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-30(8)-9-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy								
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 9 000 mm							
rozpiętość rygla	30 000 mm							
podział rygla	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	9 000 mm							
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2						
wys. średnika	1100	1100						
gr. średnika	8	9						
szer. półki górnej	200	320						
gr. półki górnej	12	22						
szer. półki dolnej	300	360						
gr. półki dolnej	14	22						
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. średnika	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050
gr. średnika	9	8	8	8	8	8	8	9
szer. półki górnej	280	100	280	340	340	280	100	280
gr. półki górnej	16	6	14	16	16	14	6	16
szer. półki dolnej	360	220	200	200	200	200	220	360
gr. półki dolnej	20	14	12	16	16	12	14	20
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 23,83 (słupy: 10,16, rygiel: 13,67)								
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 3,29								

Tablica A.44 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-30(8)-12-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy								
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 12 000 mm							
rozpiętość rygla	30 000 mm							
podział rygla	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	6 000 mm							
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2						
wys. średnika	1000	1000						
gr. średnika	9	9						
szer. półki górnej	300	360						
gr. półki górnej	10	18						
szer. półki dolnej	180	320						
gr. półki dolnej	20	20						
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. średnika	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
gr. średnika	9	7	7	8	8	7	7	9
szer. półki górnej	260	140	320	260	260	320	140	260
gr. półki górnej	22	18	14	20	20	14	18	22
szer. półki dolnej	400	200	320	400	400	320	200	400
gr. półki dolnej	18	12	18	16	16	18	12	18
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 15,93 (słupy: 4,75, rygiel: 11,19)								
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 3,40								

Tablica A.45 Wyniki optymalizacji ramy [6(2)-30(8)-12-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy								
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm							
rozpiętość rygla	30 000 mm							
podział rygla	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	6 000 mm							
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2						
wys. środника	1150	1150						
gr. środnika	8	10						
szer. półki górnej	240	240						
gr. półki górnej	14	24						
szer. półki dolnej	280	360						
gr. półki dolnej	12	20						
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. środnika	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
gr. środnika	9	9	9	9	9	9	9	9
szer. półki górnej	300	200	300	340	340	300	200	300
gr. półki górnej	20	10	16	14	14	16	10	20
szer. półki dolnej	380	160	180	340	340	180	160	380
gr. półki dolnej	16	18	16	14	14	16	18	16
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 17,27 (słupy: 5,09, rygiel: 12,18)								
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 3,29								

Tablica A.46 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-30(8)-12-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy								
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 12 000 mm							
rozpiętość rygla	30 000 mm							
podział rygla	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	9 000 mm							
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2						
wys. środnika	1000	1000						
gr. środnika	7	9						
szer. półki górnej	200	380						
gr. półki górnej	18	22						
szer. półki dolnej	280	400						
gr. półki dolnej	16	22						
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. środnika	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
gr. środnika	9	9	9	9	9	9	9	9
szer. półki górnej	240	180	300	340	340	300	180	240
gr. półki górnej	20	20	12	14	14	12	20	20
szer. półki dolnej	380	240	240	200	200	240	240	380
gr. półki dolnej	16	6	14	22	22	14	6	16
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 19,74 (słupy: 7,83, rygiel: 11,91)								
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,72								

Tablica A.47 Wyniki optymalizacji ramy [9(2)-30(8)-12-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy								
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm							
rozpiętość rygla	30 000 mm							
podział rygla	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	9 000 mm							
podział słupa	na 2 elementy po 4 500 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2						
wys. średnika	1250	1250						
gr. średnika	9	9						
szer. półki górnej	160	280						
gr. półki górnej	14	20						
szer. półki dolnej	300	420						
gr. półki dolnej	20	22						
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. średnika	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
gr. średnika	9	8	7	8	8	7	8	9
szer. półki górnej	380	100	300	420	420	300	100	380
gr. półki górnej	20	16	18	16	16	18	16	20
szer. półki dolnej	420	220	340	280	280	340	220	420
gr. półki dolnej	18	16	14	20	20	14	16	18
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 20,32 (słupy: 8,59, rygiel: 11,74)								
Współczynnik wybocheniowy dla słupa ramy (-): 3,56								

Tablica A.48 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-12(4)-6-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy				
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 6 000 mm			
rozpiętość rygla	12 000 mm			
podział rygla	na 4 elementy po 3 000 mm długości każdy			
wysokość słupa	12 000 mm			
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy			
Wyniki optymalizacji				
Słup ramy (geometria w mm)				
fundament → naroże ramy				
nr elementu	1	2	3	
wys. średnika	700	700	700	
gr. średnika	5	5	7	
szer. półki górnej	260	200	220	
gr. półki górnej	6	8	14	
szer. półki dolnej	140	220	200	
gr. półki dolnej	10	10	16	
Rygiel ramy (geometria w mm)				
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy				
nr elementu	1	2	3	4
wys. średnika	850	850	850	850
gr. średnika	6	8	8	6
szer. półki górnej	180	120	120	180
gr. półki górnej	8	12	12	8
szer. półki dolnej	260	240	240	260
gr. półki dolnej	6	6	6	6
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 31,54 (słupy: 20,55, rygiel: 10,99)				
Współczynnik wybocheniowy dla słupa ramy (-): 1,92				

Tablica A.49 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-12(4)-6-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy				
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6 000 mm			
rozpiętość rygla	12 000 mm			
podział rygla	na 4 elementy po 3 000 mm długości każdy			
wysokość słupa	12 000 mm			
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy			
Wyniki optymalizacji				
Słup ramy (geometria w mm)				
fundament → naroże ramy				
nr elementu	1	2	3	
wys. środника	750	750	750	
gr. środnika	6	6	6	
szer. półki górnej	140	220	180	
gr. półki górnej	6	8	14	
szer. półki dolnej	200	200	300	
gr. półki dolnej	8	10	10	
Rygiel ramy (geometria w mm)				
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy				
nr elementu	1	2	3	4
wys. środnika	800	800	800	800
gr. środnika	6	8	8	6
szer. półki górnej	240	160	160	240
gr. półki górnej	6	10	10	6
szer. półki dolnej	220	200	200	220
gr. półki dolnej	8	8	8	8
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 31,54 (słupy: 20,70, rygiel: 10,84)				
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,06				

Tablica A.50 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-12(4)-9-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy				
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 9 000 mm			
rozpiętość rygla	12 000 mm			
podział rygla	na 4 elementy po 3 000 mm długości każdy			
wysokość słupa	12 000 mm			
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy			
Wyniki optymalizacji				
Słup ramy (geometria w mm)				
fundament → naroże ramy				
nr elementu	1	2	3	
wys. środnika	750	750	750	
gr. środnika	6	6	6	
szer. półki górnej	120	200	260	
gr. półki górnej	10	8	6	
szer. półki dolnej	260	240	340	
gr. półki dolnej	6	12	14	
Rygiel ramy (geometria w mm)				
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy				
nr elementu	1	2	3	4
wys. środnika	850	850	850	850
gr. środnika	7	6	6	7
szer. półki górnej	160	180	180	160
gr. półki górnej	12	10	10	12
szer. półki dolnej	180	200	200	180
gr. półki dolnej	12	8	8	12
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 22,42 (słupy: 14,81, rygiel: 7,61)				
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,03				

Tablica A.51 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-12(4)-9-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy				
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 9 000 mm			
rozpiętość rygla	12 000 mm			
podział rygla	na 4 elementy po 3 000 mm długości każdy			
wysokość słupa	12 000 mm			
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy			
Wyniki optymalizacji				
Słup ramy (geometria w mm)				
fundament → naroże ramy				
nr elementu	1	2	3	
wys. średnika	800	800	800	
gr. średnika	6	6	7	
szer. półki górnej	120	140	100	
gr. półki górnej	6	8	14	
szer. półki dolnej	220	280	320	
gr. półki dolnej	10	12	16	
Rygiel ramy (geometria w mm)				
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy				
nr elementu	1	2	3	4
wys. średnika	800	800	800	800
gr. średnika	6	6	6	6
szer. półki górnej	160	200	200	160
gr. półki górnej	10	10	10	10
szer. półki dolnej	260	160	160	260
gr. półki dolnej	8	12	12	8
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 22,91 (słupy: 15,87, rygiel: 7,03)				
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,12				

Tablica A.52 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-12(4)-12-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy				
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 12 000 mm			
rozpiętość rygla	12 000 mm			
podział rygla	na 4 elementy po 3 000 mm długości każdy			
wysokość słupa	12 000 mm			
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy			
Wyniki optymalizacji				
Słup ramy (geometria w mm)				
fundament → naroże ramy				
nr elementu	1	2	3	
wys. średnika	850	850	850	
gr. średnika	6	7	7	
szer. półki górnej	240	120	140	
gr. półki górnej	6	18	14	
szer. półki dolnej	220	260	340	
gr. półki dolnej	8	12	16	
Rygiel ramy (geometria w mm)				
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy				
nr elementu	1	2	3	4
wys. średnika	850	850	850	850
gr. średnika	7	6	6	7
szer. półki górnej	140	160	160	140
gr. półki górnej	8	14	14	8
szer. półki dolnej	240	160	160	240
gr. półki dolnej	14	12	12	14
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 19,41 (słupy: 13,59, rygiel: 6,01)				
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,15				

Tablica A.53 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-12(4)-12-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy				
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm			
rozpiętość rygla	12 000 mm			
podział rygla	na 4 elementy po 3 000 mm długości każdy			
wysokość słupa	12 000 mm			
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy			
Wyniki optymalizacji				
Słup ramy (geometria w mm)				
fundament → naroże ramy				
nr elementu	1	2	3	
wys. środника	750	750	750	
gr. środnika	6	6	7	
szer. półki górnej	140	320	200	
gr. półki górnej	8	6	14	
szer. półki dolnej	220	260	320	
gr. półki dolnej	12	12	18	
Rygiel ramy (geometria w mm)				
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy				
nr elementu	1	2	3	4
wys. środnika	1000	1000	1000	1000
gr. środnika	7	7	7	7
szer. półki górnej	100	260	260	100
gr. półki górnej	18	8	8	18
szer. półki dolnej	220	160	160	220
gr. półki dolnej	10	10	10	10
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 19,65 (słupy: 12,97, rygiel: 6,67)				
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 1,91				

Tablica A.54 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-18(5)-6-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy					
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 6 000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	12 000 mm				
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3		
wys. środnika	700	700	700		
gr. środnika	5	5	7		
szer. półki górnej	200	260	280		
gr. półki górnej	6	6	12		
szer. półki dolnej	180	260	260		
gr. półki dolnej	10	12	16		
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. środnika	850	850	850	850	850
gr. środnika	6	6	6	6	6
szer. półki górnej	140	200	260	200	140
gr. półki górnej	6	14	8	14	6
szer. półki dolnej	260	220	260	220	260
gr. półki dolnej	14	6	6	6	14
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 26,84 (słupy: 15,17, rygiel: 11,67)					
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,06					

Tablica A.55 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-18(5)-6-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy					
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6 000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	12 000 mm				
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3		
wys. średnika	650	650	650		
gr. średnika	5	5	7		
szer. półki górnej	180	220	180		
gr. półki górnej	8	12	18		
szer. półki dolnej	200	280	320		
gr. półki dolnej	10	10	16		
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. średnika	750	750	750	750	750
gr. średnika	7	6	7	6	7
szer. półki górnej	100	240	200	240	100
gr. półki górnej	16	10	14	10	16
szer. półki dolnej	260	240	120	240	260
gr. półki dolnej	16	8	18	8	16
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 28,47 (słupy: 15,88, rygiel: 12,59)					
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,07					

Tablica A.56 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-18(5)-9-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy					
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 9 000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	12 000 mm				
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3		
wys. średnika	700	700	700		
gr. średnika	5	7	8		
szer. półki górnej	280	160	260		
gr. półki górnej	6	12	18		
szer. półki dolnej	220	260	260		
gr. półki dolnej	8	18	20		
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. średnika	850	850	850	850	850
gr. średnika	6	6	8	6	6
szer. półki górnej	140	240	180	240	140
gr. półki górnej	12	14	20	14	12
szer. półki dolnej	280	260	160	260	280
gr. półki dolnej	12	6	16	6	12
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 21,60 (słupy: 12,66, rygiel: 8,95)					
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,06					

Tablica A.57 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-18(5)-9-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy					
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 9 000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	12 000 mm				
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3		
wys. środника	600	600	600		
gr. środnika	6	7	7		
szer. półki górnej	100	280	260		
gr. półki górnej	14	10	16		
szer. półki dolnej	260	260	320		
gr. półki dolnej	10	16	16		
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. środnika	950	950	950	950	950
gr. środnika	7	7	7	7	7
szer. półki górnej	100	260	200	260	100
gr. półki górnej	16	12	18	12	16
szer. półki dolnej	220	280	180	280	220
gr. półki dolnej	16	8	18	8	16
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 22,40 (słupy: 12,09, rygiel: 10,31)					
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 1,90					

Tablica A.58 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-18(5)-12-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy					
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 12 000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	12 000 mm				
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3		
wys. środnika	750	750	750		
gr. środnika	7	8	7		
szer. półki górnej	320	320	340		
gr. półki górnej	6	12	16		
szer. półki dolnej	240	340	320		
gr. półki dolnej	8	10	18		
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. środnika	900	900	900	900	900
gr. środnika	7	7	7	7	7
szer. półki górnej	240	300	200	300	240
gr. półki górnej	10	12	18	12	10
szer. półki dolnej	300	140	260	140	300
gr. półki dolnej	12	16	14	16	12
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 18,66 (słupy: 10,82, rygiel: 7,84)					
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,07					

Tablica A.59 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-18(5)-12-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy					
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	12 000 mm				
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3		
wys. średnika	750	750	750		
gr. średnika	6	6	7		
szer. półki górnej	200	260	300		
gr. półki górnej	8	14	18		
szer. półki dolnej	240	300	340		
gr. półki dolnej	12	12	18		
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. średnika	900	900	900	900	900
gr. średnika	7	7	7	7	7
szer. półki górnej	140	300	260	300	140
gr. półki górnej	16	12	18	12	16
szer. półki dolnej	280	160	180	160	280
gr. półki dolnej	16	16	18	16	16
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 18,65 (słupy: 10,46, rygiel: 8,19)					
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,04					

Tablica A.60 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-24(6)-6-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy						
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 6 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	12 000 mm					
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3			
wys. średnika	750	750	750			
gr. średnika	6	6	8			
szer. półki górnej	140	280	220			
gr. półki górnej	10	10	20			
szer. półki dolnej	240	280	320			
gr. półki dolnej	10	10	14			
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. średnika	950	950	950	950	950	950
gr. średnika	7	7	7	7	7	7
szer. półki górnej	140	280	300	300	280	140
gr. półki górnej	12	12	12	12	12	12
szer. półki dolnej	320	180	280	280	180	320
gr. półki dolnej	12	6	6	6	6	12
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 28,96 (słupy: 14,07, rygiel: 14,88)						
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,15						

Tablica A.61 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-24(6)-6-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy						
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	12 000 mm					
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3			
wys. środника	850	850	850			
gr. środnika	6	6	7			
szer. półki górnej	100	260	280			
gr. półki górnej	10	10	16			
szer. półki dolnej	240	280	340			
gr. półki dolnej	12	12	16			
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. środnika	750	750	750	750	750	750
gr. środnika	7	6	6	6	6	7
szer. półki górnej	260	280	280	280	280	260
gr. półki górnej	18	10	12	12	10	18
szer. półki dolnej	320	140	200	200	140	320
gr. półki dolnej	14	12	14	14	12	14
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 29,47 (słupy: 15,13, rygiel: 14,34)						
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,47						

Tablica A.62 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-24(6)-9-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy						
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 9 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	12 000 mm					
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3			
wys. środnika	700	700	700			
gr. środnika	5	6	8			
szer. półki górnej	140	280	340			
gr. półki górnej	10	14	14			
szer. półki dolnej	260	260	340			
gr. półki dolnej	12	14	20			
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. środnika	1050	1050	1050	1050	1050	1050
gr. środnika	8	8	8	8	8	8
szer. półki górnej	260	300	320	320	300	260
gr. półki górnej	6	12	14	14	12	6
szer. półki dolnej	300	200	260	260	200	300
gr. półki dolnej	12	18	18	18	18	12
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 23,63 (słupy: 10,44, rygiel: 13,20)						
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 1,97						

Tablica A.63 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-24(6)-9-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy						
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 9 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	12 000 mm					
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3			
wys. średnika	800	800	800			
gr. średnika	6	7	8			
szer. półki górnej	280	360	260			
gr. półki górnej	6	8	20			
szer. półki dolnej	240	260	320			
gr. półki dolnej	10	14	20			
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. średnika	1150	1150	1150	1150	1150	1150
gr. średnika	8	8	8	8	8	8
szer. półki górnej	140	320	320	320	320	140
gr. półki górnej	6	10	12	12	10	6
szer. półki dolnej	280	300	280	280	300	280
gr. półki dolnej	20	10	12	12	10	20
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 24,32 (słupy: 10,97, rygiel: 13,35)						
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 1,99						

Tablica A.64 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-24(6)-12-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy						
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 12 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	12 000 mm					
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3			
wys. średnika	950	950	950			
gr. średnika	7	7	9			
szer. półki górnej	140	360	260			
gr. półki górnej	10	10	22			
szer. półki dolnej	240	260	340			
gr. półki dolnej	16	16	22			
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. średnika	1100	1100	1100	1100	1100	1100
gr. średnika	9	8	8	8	8	9
szer. półki górnej	340	280	320	320	280	340
gr. półki górnej	10	14	14	14	14	10
szer. półki dolnej	360	260	260	260	260	360
gr. półki dolnej	12	10	16	16	10	12
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 20,65 (słupy: 10,08, rygiel: 10,57)						
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,19						

Tablica A.65 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-24(6)-12-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy						
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	12 000 mm					
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3			
wys. środника	1000	1000	1000			
gr. środnika	7	7	9			
szer. półki górnej	260	200	300			
gr. półki górnej	6	18	22			
szer. półki dolnej	280	300	340			
gr. półki dolnej	12	16	20			
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. środnika	1100	1100	1100	1100	1100	1100
gr. środnika	8	9	8	8	9	8
szer. półki górnej	220	260	320	320	260	220
gr. półki górnej	16	22	14	30	22	16
szer. półki dolnej	340	220	300	300	220	340
gr. półki dolnej	14	10	18	18	10	14
Wskaźnik zużycia stali (kg / m³): 21,62 (słupy: 10,41, rygiel: 11,22)						
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,23						

Tablica A.66 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-30(8)-6-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy								
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 6 000 mm							
rozpiętość rygla	30 000 mm							
podział rygla	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	12 000 mm							
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3					
wys. środnika	850	850	850					
gr. środnika	6	6	9					
szer. półki górnej	160	200	240					
gr. półki górnej	8	14	22					
szer. półki dolnej	240	300	320					
gr. półki dolnej	12	14	20					
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. środnika	900	900	900	900	900	900	900	900
gr. środnika	7	7	7	7	7	7	7	7
szer. półki górnej	220	260	320	280	280	320	260	220
gr. półki górnej	14	6	10	16	16	10	6	14
szer. półki dolnej	320	200	320	280	280	320	200	320
gr. półki dolnej	18	10	10	12	12	10	10	18
Wskaźnik zużycia stali (kg / m³): 30,29 (słupy: 13,81, rygiel: 16,49)								
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,50								

Tablica A.67 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-30(8)-6-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy								
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6 000 mm							
rozpiętość rygla	30 000 mm							
podział rygla	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	12 000 mm							
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3					
wys. średnika	950	950	950					
gr. średnika	7	8	8					
szer. półki górnej	180	320	280					
gr. półki górnej	14	12	18					
szer. półki dolnej	220	220	340					
gr. półki dolnej	10	20	20					
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. średnika	950	950	950	950	950	950	950	950
gr. średnika	7	7	7	7	7	7	7	7
szer. półki górnej	300	100	320	280	280	320	100	300
gr. półki górnej	12	16	10	16	16	10	16	12
szer. półki dolnej	340	200	220	260	260	220	200	340
gr. półki dolnej	16	10	14	10	10	14	10	16
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 32,45 (słupy: 15,78, rygiel: 16,68)								
Współczynnik wybocheniowy dla słupa ramy (-): 2,74								

Tablica A.68 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-30(8)-9-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy								
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 9 000 mm							
rozpiętość rygla	30 000 mm							
podział rygla	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	12 000 mm							
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3					
wys. średnika	850	850	850					
gr. średnika	7	7	9					
szer. półki górnej	120	320	340					
gr. półki górnej	16	14	22					
szer. półki dolnej	280	280	340					
gr. półki dolnej	12	16	24					
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. średnika	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
gr. średnika	8	7	7	7	7	7	7	8
szer. półki górnej	320	220	300	280	280	300	220	320
gr. półki górnej	18	12	12	18	18	12	12	18
szer. półki dolnej	320	160	240	360	360	240	160	320
gr. półki dolnej	18	18	18	14	14	18	18	18
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 24,76 (słupy: 11,18, rygiel: 13,58)								
Współczynnik wybocheniowy dla słupa ramy (-): 2,30								

Tablica A.69 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-30(8)-9-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy								
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 9 000 mm							
rozpiętość rygla	30 000 mm							
podział rygla	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	12 000 mm							
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3					
wys. środника	950	950	950					
gr. środnika	7	8	9					
szer. półki górnej	160	320	340					
gr. półki górnej	14	12	22					
szer. półki dolnej	260	300	340					
gr. półki dolnej	12	18	22					
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. środnika	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
gr. środnika	8	8	8	9	9	8	8	8
szer. półki górnej	280	260	320	280	280	320	260	280
gr. półki górnej	14	10	12	20	20	12	10	14
szer. półki dolnej	340	140	280	240	240	280	140	340
gr. półki dolnej	16	12	16	22	22	16	12	16
Wskaźnik zużycia stali (kg / m³): 26,42 (słupy: 11,80, rygiel: 14,61)								
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,44								

Tablica A.70 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-30(8)-12-EC-S2]

Parametry optymalizowanej ramy								
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa II, rozstaw co 12 000 mm							
rozpiętość rygla	30 000 mm							
podział rygla	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	12 000 mm							
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3					
wys. środnika	1100	1100	1100					
gr. środnika	8	9	10					
szer. półki górnej	220	200	300					
gr. półki górnej	10	22	26					
szer. półki dolnej	280	340	360					
gr. półki dolnej	12	16	26					
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. środnika	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250
gr. środnika	10	9	9	9	9	9	9	10
szer. półki górnej	260	200	280	320	320	280	200	260
gr. półki górnej	14	6	18	16	16	18	6	14
szer. półki dolnej	320	260	220	220	220	220	260	320
gr. półki dolnej	24	10	14	20	20	14	10	24
Wskaźnik zużycia stali (kg / m³): 22,94 (słupy: 10,48, rygiel: 12,46)								
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,47								

Tablica A.71 Wyniki optymalizacji ramy [12(3)-30(8)-12-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy								
obc. i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm							
rozpiętość ryglu	30 000 mm							
podział ryglu	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	12 000 mm							
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3					
wys. środnika	1200	1200	1200					
gr. środnika	8	9	10					
szer. półki górnej	320	300	360					
gr. półki górnej	10	20	22					
szer. półki dolnej	320	260	360					
gr. półki dolnej	10	22	26					
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przęsło ryglu → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. środnika	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150
gr. środnika	10	8	8	8	8	8	8	10
szer. półki górnej	340	180	280	320	320	280	180	340
gr. półki górnej	16	10	16	20	20	16	10	16
szer. półki dolnej	360	240	280	360	360	280	240	360
gr. półki dolnej	20	10	18	20	20	18	10	20
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 23,80 (słupy: 11,37, rygiel: 12,43)								
Współczynnik wyboczeniowy dla słupa ramy (-): 2,85								

Załącznik B – wyniki optymalizacji RBI zgodnie z EC-3

Tablica B.1 Wyniki optymalizacji ramy [B-12(3)-30(8)-12-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy								
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm							
rozpiętość rygla	30 000 mm							
podział rygla	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	12 000 mm							
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3					
wys. średnika	1200	1200	1200					
gr. średnika	9	9	10					
szer. półek	220	280	360					
gr. półek	16	20	24					
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. średnika	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250
gr. średnika	10	9	9	9	9	9	9	10
szer. półek	360	260	280	300	300	280	260	360
gr. półek	18	8	18	20	20	18	8	18
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 25,03 (słupy: 11,15, rygiel: 12,87)								
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,67								

Tablica B.2 Wyniki optymalizacji ramy [B-12(3)-30(8)-6-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy								
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6 000 mm							
rozpiętość rygla	30 000 mm							
podział rygla	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	12 000 mm							
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3					
wys. średnika	950	950	950					
gr. średnika	7	7	7					
szer. półek	260	240	360					
gr. półek	8	18	16					
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. średnika	950	950	950	950	950	950	950	950
gr. średnika	8	7	7	7	7	7	7	8
szer. półek	280	200	280	260	260	280	20	280
gr. półek	20	8	10	14	14	10	8	20
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 32,35 (słupy: 14,97, rygiel: 17,38)								
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,66								

Tablica B.3 Wyniki optymalizacji ramy [B-6(2)-30(8)-12-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy								
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm							
rozpiętość rygla	30 000 mm							
podział rygla	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	6 000 mm							
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2						
wys. średnika	1000	1000						
gr. średnika	10	9						
szer. pótek	220	360						
gr. pótek	16	22						
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. średnika	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
gr. średnika	10	8	8	8	8	8	8	10
szer. pótek	340	220	280	320	320	280	220	340
gr. pótek	24	10	14	16	16	14	10	24
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 17,36 (słupy: 5,30, rygiel: 12,06)								
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 3,23								

Tablica B.4 Wyniki optymalizacji ramy [B-6(2)-30(8)-6-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy								
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6 000 mm							
rozpiętość rygla	30 000 mm							
podział rygla	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	6 000 mm							
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2						
wys. średnika	850	850						
gr. średnika	6	7						
szer. pótek	240	300						
gr. pótek	10	18						
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. średnika	850	850	850	850	850	850	850	850
gr. średnika	7	6	6	6	6	6	6	7
szer. pótek	340	180	240	280	280	240	180	340
gr. pótek	16	10	12	14	14	12	10	16
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 22,47 (słupy: 6,40, rygiel: 15,96)								
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 3,40								

Tablica B.5 Wyniki optymalizacji ramy [B-12(3)-24(6)-12-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy						
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	12 000 mm					
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3			
wys. średnika	1000	1000	1000			
gr. średnika	7	7	9			
szer. półek	260	300	320			
gr. półek	10	14	22			
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. średnika	1050	1050	1050	1050	1050	1050
gr. średnika	8	8	8	8	8	8
szer. półek	360	300	300	300	300	360
gr. półek	14	12	20	20	12	14
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 22,01 (słupy: 10,61, rygiel: 11,40)						
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,27						

Tablica B.6 Wyniki optymalizacji ramy [B-12(3)-24(6)-6-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy						
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	12 000 mm					
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3			
wys. średnika	600	600	600			
gr. średnika	5	5	7			
szer. półek	260	280	320			
gr. półek	8	12	16			
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. średnika	850	850	850	850	850	850
gr. średnika	6	6	9	9	6	6
szer. półek	320	260	200	200	260	320
gr. półek	10	12	22	22	12	10
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 30,04 (słupy: 13,33, rygiel: 16,72)						
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,00						

Tablica B.7 Wyniki optymalizacji ramy [B-6(2)-24(6)-12-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy						
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	6 000 mm					
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2				
wys. średnika	800	800				
gr. średnika	7	7				
szer. półek	220	360				
gr. półek	14	16				
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. średnika	950	950	950	950	950	950
gr. średnika	7	7	7	7	7	7
szer. półek	340	220	300	300	220	340
gr. półek	16	16	16	16	16	16
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 14,59 (słupy: 4,57, rygiel: 10,02)						
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,60						

Tablica B.8 Wyniki optymalizacji ramy [B-6(2)-24(6)-6-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy						
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	6 000 mm					
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2				
wys. średnika	500	500				
gr. średnika	6	6				
szer. półek	180	320				
gr. półek	14	14				
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. średnika	750	750	750	750	750	750
gr. średnika	6	6	6	6	6	6
szer. półek	280	220	280	280	220	280
gr. półek	12	12	12	12	12	12
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 20,17 (słupy: 6,41, rygiel: 13,76)						
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,39						

Tablica B.9 Wyniki optymalizacji ramy [B-12(3)-18(5)-12-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	12 000 mm				
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3		
wys. średnika	700	700	700		
gr. średnika	6	5	7		
szer. półek	200	300	360		
gr. półek	12	12	16		
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. średnika	950	950	950	950	950
gr. średnika	7	7	9	7	7
szer. półek	260	220	360	220	260
gr. półek	12	16	10	16	12
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 18,79 (słupy: 10,11, rygiel: 8,68)					
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 1,97					

Tablica B.10 Wyniki optymalizacji ramy [B-12(3)-18(5)-6-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6 000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	12 000 mm				
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3		
wys. średnika	700	700	700		
gr. średnika	6	5	5		
szer. półek	260	220	320		
gr. półek	6	12	12		
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. średnika	750	750	750	750	750
gr. średnika	6	6	6	6	6
szer. półek	240	240	200	240	240
gr. półek	12	10	12	10	12
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 27,46 (słupy: 15,27, rygiel: 12,20)					
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,12					

Tablica B.11 Wyniki optymalizacji ramy [B-6(2)-18(5)-12-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	6 000 mm				
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2			
wys. średnika	450	450			
gr. średnika	5	7			
szer. półek	220	320			
gr. półek	12	16			
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. średnika	800	800	800	800	800
gr. średnika	6	6	7	6	6
szer. półek	240	260	240	260	240
gr. półek	12	12	18	12	12
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 11,78 (słupy: 4,45, rygiel: 7,33)					
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,09					

Tablica B.12 Wyniki optymalizacji ramy [B-6(2)-18(5)-6-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6 000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	6 000 mm				
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2			
wys. średnika	500	500			
gr. średnika	4	5			
szer. półek	200	280			
gr. półek	8	12			
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. średnika	550	550	550	550	550
gr. średnika	5	4	4	4	4
szer. półek	240	220	240	220	280
gr. półek	12	10	10	10	10
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 15,59 (słupy: 6,12, rygiel: 9,48)					
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,45					

Tablica B.13 Wyniki optymalizacji ramy [B-6(2)-12(5)-6-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6 000 mm				
rozpiętość rygla	12 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 2 400 mm długości każdy				
wysokość słupa	6 000 mm				
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2			
wys. średnika	400	400			
gr. średnika	4	4			
szer. półek	180	220			
gr. półek	6	10			
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. średnika	500	500	500	450	450
gr. średnika	4	4	4	4	4
szer. półek	200	140	160	140	160
gr. półek	6	10	10	12	8
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 12,15 (słupy: 6,18, rygiel: 5,98)					
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,11					

Tablica B.14 Wyniki optymalizacji ramy [B-12(3)-12(4)-6-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6 000 mm				
rozpiętość rygla	12 000 mm				
podział rygla	na 4 elementy po 3 000 mm długości każdy				
wysokość słupa	12 000 mm				
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3		
wys. średnika	700	700	700		
gr. średnika	5	5	7		
szer. półek	140	240	200		
gr. półek	12	10	16		
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	
wys. średnika	850	850	850	850	
gr. średnika	6	8	8	6	
szer. półek	200	180	180	200	
gr. półek	8	8	8	8	
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 32,92 (słupy: 21,81, rygiel: 11,11)					
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,03					

Tablica B.15 Wyniki optymalizacji ramy [B-6(2)-12(3)-12-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy			
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm		
rozpiętość rygla	12 000 mm		
podział rygla	na 3 elementy po 4 000 mm długości każdy		
wysokość słupa	6 000 mm		
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy		
Wyniki optymalizacji			
Słup ramy (geometria w mm)			
fundament → naroże ramy			
nr elementu	1	2	
wys. środka	450	450	
gr. środka	4	5	
szer. półek	200	260	
gr. półek	8	12	
Rygiel ramy (geometria w mm)			
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy			
nr elementu	1	2	3
wys. środka	550	550	550
gr. środka	5	5	5
szer. półek	280	220	280
gr. półek	8	12	8
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 8,98 (słupy: 4,24, rygiel: 4,73)			
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,17			

Tablica B.16 Wyniki optymalizacji ramy [B-12(3)-12(4)-12-EC-S3]

Parametry optymalizowanej ramy				
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z EC, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm			
rozpiętość rygla	12 000 mm			
podział rygla	na 4 elementy po 3 000 mm długości każdy			
wysokość słupa	12 000 mm			
podział słupa	na 3 elementy po 4 000 mm wysokości każdy			
Wyniki optymalizacji				
Słup ramy (geometria w mm)				
fundament → naroże ramy				
nr elementu	1	2	3	
wys. środka	800	800	800	
gr. środka	6	6	6	
szer. półek	160	280	300	
gr. półek	14	10	14	
Rygiel ramy (geometria w mm)				
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy				
nr elementu	1	2	3	4
wys. środka	850	850	850	850
gr. środka	7	6	6	7
szer. półek	280	260	260	280
gr. półek	8	8	8	8
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 19,48 (słupy: 13,44, rygiel: 6,04)				
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,14				

Załącznik C – wyniki optymalizacji RBI zgodnie z PN

Tablica C.1 Wyniki optymalizacji ramy [B-6(2)-18(5)-6-PN-S3]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z PN, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6 000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	6 000 mm				
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2			
wys. średnika	600	600			
gr. średnika	4	6			
szer. pótek	200	200			
gr. pótek	8	14			
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. średnika	700	700	700	700	700
gr. średnika	6	5	7	5	6
szer. pótek	160	160	200	160	160
gr. pótek	16	8	6	8	16
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 15,88 (słupy: 6,25, rygiel: 9,64)					
Współczynnik wybozeniowy dla słupa ramy (-): 2,45					

Tablica C.2 Wyniki optymalizacji ramy [B-6(2)-18(5)-12-PN-S3]

Parametry optymalizowanej ramy					
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z PN, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm				
rozpiętość rygla	18 000 mm				
podział rygla	na 5 elementów po 3 600 mm długości każdy				
wysokość słupa	6 000 mm				
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy				
Wyniki optymalizacji					
Słup ramy (geometria w mm)					
fundament → naroże ramy					
nr elementu	1	2			
wys. średnika	600	600			
gr. średnika	5	8			
szer. pótek	220	240			
gr. pótek	12	20			
Rygiel ramy (geometria w mm)					
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy					
nr elementu	1	2	3	4	5
wys. średnika	900	900	900	900	900
gr. średnika	8	7	7	7	8
szer. pótek	220	200	200	200	220
gr. pótek	12	12	16	12	12
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 12,37 (słupy: 4,79, rygiel: 7,58)					
Współczynnik wybozeniowy dla słupa ramy (-): 2,26					

Tablica C.3 Wyniki optymalizacji ramy [B-6(2)-12(3)-12-PN-S3]

Parametry optymalizowanej ramy			
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z PN, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm		
rozpiętość rygla	12 000 mm		
podział rygla	na 3 elementy po 4 000 mm długości każdy		
wysokość słupa	6 000 mm		
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy		
Wyniki optymalizacji			
Słup ramy (geometria w mm)			
fundament → naroże ramy			
nr elementu	1	2	
wys. średnika	500	500	
gr. średnika	5	6	
szer. półek	140	240	
gr. półek	10	10	
Rygiel ramy (geometria w mm)			
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy			
nr elementu	1	2	3
wys. średnika	650	650	650
gr. średnika	7	5	7
szer. półek	200	180	200
gr. półek	8	12	8
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 8,94 (słupy: 4,11, rygiel: 4,83)			
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,17			

Tablica C.4 Wyniki optymalizacji ramy [B-6(2)-24(6)-12-PN-S3]

Parametry optymalizowanej ramy						
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z PN, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	6 000 mm					
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2				
wys. średnika	900	900				
gr. średnika	10	10				
szer. półek	220	260				
gr. półek	12	24				
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. średnika	1050	1050	1050	1050	1050	1050
gr. średnika	9	7	8	8	7	9
szer. półek	320	220	240	240	220	320
gr. półek	16	10	12	12	10	16
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 15,22 (słupy: 5,64, rygiel: 9,58)						
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 2,79						

Tablica C.5 Wyniki optymalizacji ramy [B-6(2)-24(6)-6-PN-S3]

Parametry optymalizowanej ramy						
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z PN, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6 000 mm					
rozpiętość rygla	24 000 mm					
podział rygla	na 6 elementów po 4 000 mm długości każdy					
wysokość słupa	6 000 mm					
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy					
Wyniki optymalizacji						
Słup ramy (geometria w mm)						
fundament → naroże ramy						
nr elementu	1	2				
wys. środника	750	750				
gr. środnika	7	8				
szer. półek	140	300				
gr. półek	14	12				
Rygiel ramy (geometria w mm)						
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy						
nr elementu	1	2	3	4	5	6
wys. środnika	650	650	650	650	650	650
gr. środnika	8	5	6	6	5	8
szer. półek	300	180	180	180	180	300
gr. półek	14	10	14	14	10	14
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 19,52 (słupy: 7,10, rygiel: 12,43)						
Współczynnik wybozeniowy dla słupa ramy (-): 3,31						

Tablica C.6 Wyniki optymalizacji ramy [B-6(2)-30(8)-6-PN-S3]

Parametry optymalizowanej ramy								
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z PN, Strefa śniegowa III, rozstaw co 6 000 mm							
rozpiętość rygla	30 000 mm							
podział rygla	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	6 000 mm							
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2						
wys. środnika	750	750						
gr. środnika	10	10						
szer. półek	200	240						
gr. półek	12	24						
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przeszło rygla → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. środnika	850	850	850	850	850	850	850	850
gr. środnika	8	6	6	6	6	6	6	8
szer. półek	300	160	240	220	220	240	160	300
gr. półek	18	12	10	14	14	10	12	18
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 23,22 (słupy: 8,00, rygiel: 15,22)								
Współczynnik wybozeniowy dla słupa ramy (-): 3,23								

Tablica C.7 Wyniki optymalizacji ramy [B-6(2)-30(8)-12-PN-S3]

Parametry optymalizowanej ramy								
obciążenia i rozstaw ram	zgodnie z PN, Strefa śniegowa III, rozstaw co 12 000 mm							
rozpiętość rygla	30 000 mm							
podział rygla	na 8 elementów po 3 750 mm długości każdy							
wysokość słupa	6 000 mm							
podział słupa	na 2 elementy po 3 000 mm wysokości każdy							
Wyniki optymalizacji								
Słup ramy (geometria w mm)								
fundament → naroże ramy								
nr elementu	1	2						
wys. średnika	1100	1100						
gr. średnika	8	10						
szer. półek	320	360						
gr. półek	16	24						
Rygiel ramy (geometria w mm)								
naroże ramy → przęsło rygla → naroże ramy								
nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
wys. średnika	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150
gr. średnika	10	9	8	9	9	8	9	10
szer. półek	320	180	260	200	200	260	180	320
gr. półek	26	14	14	22	22	14	14	26
Wskaźnik zużycia stali (kg / m²): 18,46 (słupy: 5,97, rygiel: 12,49)								
Współczynnik wybożeniowy dla słupa ramy (-): 3,49								

**Załącznik D – aktywność ograniczeń dla RMO
(optymalizacja zgodnie z EC-3)**

Tablica D.1 Aktywność ograniczeń dla ram w rozstawach 6m (2 strefa śniegowa)

Symbol (Tablica)	Pręt słupa / rygiel	Aktywność ograniczeń (w przypadku ograniczenia aktywnego -)															
		g ₁	g ₂	g ₃	g ₄	g ₅	g ₆	g ₇	g ₈	g ₉	g ₁₀	g ₁₁	g ₁₂	g ₁₃	g ₁₄	g ₁₅	g ₁₆
6(2)-12(5)- 6-EC-S2 (T. 6.2.2.1)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
		3															
	6(2)-18(5)- 6-EC-S2 (T. A.4)	Słup	1														
2																	
Rygiel		1															
		2															
		3															
6(2)-24(6)- 6-EC-S2 (T. A.24)		Słup	1														
	2																
	Rygiel	1															
		2															
		3															
	6(2)-30(8)- 6-EC-S2 (T. A.36)	Słup	1														
2																	
Rygiel		1															
		2															
		3															
4																	
9(2)-12(5)- 6-EC-S2 (T. A.2)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
		3															
	9(2)-18(5)- 6-EC-S2 (T. A.6)	Słup	1														
2																	
Rygiel		1															
		2															
		3															
9(2)-24(6)- 6-EC-S2 (T. A.26)		Słup	1														
	2																
	Rygiel	1															
		2															
		3															
	9(2)-30(8)- 6-EC-S2 (T. A.38)	Słup	1														
2																	
Rygiel		1															
		2															
		3															
4																	
12(3)- 12(4)- 6-EC-S2 (T. A.48)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
		3															
	12(3)- 18(5)- 6-EC-S2 (T. A.54)	Słup	1														
2																	
Rygiel		1															
		2															
		3															
12(3)- 24(6)- 6-EC-S2 (T. A.60)		Słup	1														
	2																
	Rygiel	1															
		2															
		3															
	12(3)- 30(8)- 6-EC-S2 (T. A.66)	Słup	1														
2																	
Rygiel		1															
		2															
		3															
4																	

Tablica D.2 Aktywność ograniczeń dla ram w rozstawach 9m (2 strefa śniegowa)

Symbol (Tablica)	Pręt słupa / rygla	Aktywność ograniczeń (w przypadku ograniczenia aktywnego -)															
		<i>g</i> ₁	<i>g</i> ₂	<i>g</i> ₃	<i>g</i> ₄	<i>g</i> ₅	<i>g</i> ₆	<i>g</i> ₇	<i>g</i> ₈	<i>g</i> ₉	<i>g</i> ₁₀	<i>g</i> ₁₁	<i>g</i> ₁₂	<i>g</i> ₁₃	<i>g</i> ₁₄	<i>g</i> ₁₅	<i>g</i> ₁₆
6(2)-12(3)- 9-EC-S2 (T. A.16)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
6(2)-18(5)- 9-EC-S2 (T. A.8)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
		3															
6(2)-24(6)- 9-EC-S2 (T. A.28)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
		3															
6(2)-30(8)- 9-EC-S2 (T. A.40)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
		3															
9(2)-12(3)- 9-EC-S2 (T. A.18)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
		3															
9(2)-18(5)- 9-EC-S2 (T. A.10)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
		3															
9(2)-24(6)- 9-EC-S2 (T. A.30)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
		3															
9(2)-30(8)- 9-EC-S2 (T. A.42)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
		3															
12(3)- 12(4)- 9-EC-S2 (T. A.50)	Słup	1															
		2															
		3															
	Rygiel	1															
		2															
12(3)- 18(5)- 9-EC-S2 (T. A.56)	Słup	1															
		2															
		3															
	Rygiel	1															
		2															
12(3)- 24(6)- 9-EC-S2 (T. A.62)	Słup	1															
		2															
		3															
	Rygiel	1															
		2															
12(3)- 30(8)- 9-EC-S2 (T. A.68)	Słup	1															
		2															
		3															
	Rygiel	1															
		2															

Tablica D.3 Aktywność ograniczeń dla ram w rozstawach 12m (2 strefa śniegowa)

Symbol (Tablica)	Pręt słupa / rygla	Aktywność ograniczeń (w przypadku ograniczenia aktywnego -)															
		g ₁	g ₂	g ₃	g ₄	g ₅	g ₆	g ₇	g ₈	g ₉	g ₁₀	g ₁₁	g ₁₂	g ₁₃	g ₁₄	g ₁₅	g ₁₆
6(2)-12(3)- 12-EC-S2 (T. A.20)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
6(2)-18(5)- 12-EC-S2 (T. A.12)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
6(2)-24(6)- 12-EC-S2 (T. A.32)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
6(2)-30(8)- 12-EC-S2 (T. A.44)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
9(2)-12(3)- 12-EC-S2 (T. A.22)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
9(2)-18(5)- 12-EC-S2 (T. A.14)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
9(2)-24(6)- 12-EC-S2 (T. A.34)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
9(2)-30(8)- 12-EC-S2 (T. A.46)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
12(3)- 12(4)- 12-EC-S2 (T. A.52)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
12(3)- 18(5)- 12-EC-S2 (T. A.58)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
12(3)- 24(6)- 12-EC-S2 (T. A.64)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
12(3)- 30(8)- 12-EC-S2 (T. A.70)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															

**Załącznik E – aktywność ograniczeń dla RBI
(optymalizacja zgodnie z EC-3)**

Tablica E.1 Aktywność ograniczeń dla ram w rozstawach 6m (3 strefa śniegowa)

Symbol (Tablica)	Pręt słupa / rygiel	Aktywność ograniczeń (w przypadku ograniczenia aktywnego -)															
		g ₁	g ₂	g ₃	g ₄	g ₅	g ₆	g ₇	g ₈	g ₉	g ₁₀	g ₁₁	g ₁₂	g ₁₃	g ₁₄	g ₁₅	g ₁₆
B-6(2)- 12(5)-6- EC-S3 (T. B.13)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
		3															
	B-6(2)- 18(5)-6- EC-S3 (T. B.12)	Słup	1														
2																	
Rygiel		1															
		2															
		3															
B-6(2)- 24(6)-6- EC-S3 (T. B.8)		Słup	1														
	2																
	Rygiel	1															
		2															
		3															
	B-6(2)- 30(8)-6- EC-S3 (T. B.4)	Słup	1														
2																	
Rygiel		1															
		2															
		3															
		4															
B-12(3)- 12(4)- 6-EC-S3 (T. B.14)	Słup	1															
		2															
		3															
	Rygiel	1															
		2															
		3															
B-12(3)- 18(5)- 6-EC-S3 (T. B.10)	Słup	1															
		2															
		3															
	Rygiel	1															
		2															
		3															
B-12(3)- 24(6)- 6-EC-S3 (T. B.6)	Słup	1															
		2															
		3															
	Rygiel	1															
		2															
		3															
B-12(3)- 30(8)- 6-EC-S3 (T. B.2)	Słup	1															
		2															
		3															
	Rygiel	1															
		2															
		3															
4																	

Tablica E.2 Aktywność ograniczeń dla ram w rozstawach 12m (3 strefa śniegowa)

Symbol (Tablica)	Pręt słupa / rygla	Aktywność ograniczeń (w przypadku ograniczenia aktywnego -)															
		<i>g</i> ₁	<i>g</i> ₂	<i>g</i> ₃	<i>g</i> ₄	<i>g</i> ₅	<i>g</i> ₆	<i>g</i> ₇	<i>g</i> ₈	<i>g</i> ₉	<i>g</i> ₁₀	<i>g</i> ₁₁	<i>g</i> ₁₂	<i>g</i> ₁₃	<i>g</i> ₁₄	<i>g</i> ₁₅	<i>g</i> ₁₆
B-6(2)-12(3)-12-EC-S3 (T. B.15)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
B-6(2)-18(5)-12-EC-S3 (T. B.11)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
		3															
B-6(2)-24(6)-12-EC-S3 (T. B.7)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
B-6(2)-30(8)-12-EC-S3 (T. B.3)	Słup	1															
		2															
	Rygiel	1															
		2															
		3															
B-12(3)-12(4)-12-EC-S3 (T. B.16)	Słup	1															
		2															
		3															
	Rygiel	1															
		2															
B-12(3)-18(5)-12-EC-S3 (T. B.9)	Słup	1															
		2															
		3															
	Rygiel	1															
		2															
B-12(3)-24(6)-12-EC-S3 (T. B.5)	Słup	1															
		2															
		3															
	Rygiel	1															
		2															
B-12(3)-30(8)-12-EC-S3 (T. B.1)	Słup	1															
		2															
		3															
	Rygiel	1															
		2															

**Załącznik F – aktywność ograniczeń dla RBI
(optymalizacja zgodnie z PN)**

Tablica F.1 Aktywność ograniczeń dla ram w rozstawach 6m
i wysokości słupa 6m (3 strefa śniegowa)

Symbol (Tablica)	Pręt słupa / rygla	Aktywność ograniczeń (w przypadku ograniczenia aktywnego - ■)											
		<i>g</i> ₁	<i>g</i> ₂	<i>g</i> ₃	<i>g</i> ₄	<i>g</i> ₅	<i>g</i> ₆	<i>g</i> ₇	<i>g</i> ₈	<i>g</i> ₉	<i>g</i> ₁₀	<i>g</i> ₁₁	
B-6(2)- 12(5)-6- PN-S3 (T. 7.1)	Słup	1											
		2											
	Rygie 1	1											
		2											
		3											
B-6(2)- 18(5)-6- PN-S3 (T. C.1)	Słup	1											
		2											
	Rygie 1	1											
		2											
		3											
B-6(2)- 24(6)-6- PN-S3 (T. C.5)	Słup	1											
		2											
	Rygie 1	1											
		2											
		3											
B-6(2)- 30(8)-6- PN-S3 (T. C.6)	Słup	1											
		2											
	Rygie 1	1											
		2											
		3											
		4											

Tablica F.2 Aktywność ograniczeń dla ram w rozstawach 12m
i wysokości słupa 6m (3 strefa śniegowa)

Symbol (Tablica)	Pręt słupa / rygla	Aktywność ograniczeń (w przypadku ograniczenia aktywnego - ■)											
		<i>g</i> ₁	<i>g</i> ₂	<i>g</i> ₃	<i>g</i> ₄	<i>g</i> ₅	<i>g</i> ₆	<i>g</i> ₇	<i>g</i> ₈	<i>g</i> ₉	<i>g</i> ₁₀	<i>g</i> ₁₁	
B-6(2)- 12(3)-12- PN-S3 (T. C.3)	Słup	1											
		2											
	Rygie 1	1											
		2											
B-6(2)- 18(5)-12- PN-S3 (T. C.2)	Słup	1											
		2											
	Rygie 1	1											
		2											
		3											
B-6(2)- 24(6)-12- PN-S3 (T. C.4)	Słup	1											
		2											
	Rygie 1	1											
		2											
		3											
B-6(2)- 30(8)-12- PN-S3 (T. C.7)	Słup	1											
		2											
	Rygie 1	1											
		2											
		3											
		4											

CONCEPTION OPTIMALE DES PORTIQUES AVEC LA PRISE EN COMPTE DES PROBLEMES DE STABILITE

L'utilisation des portiques métalliques est très courante dans le génie civil. Au cours du processus de conception les ingénieurs cherchent à réduire les coûts de la construction, en diminuant ainsi le coût total de l'investissement. La complexité du problème et l'absence des outils assistant le processus d'optimisation rendent difficile l'usage efficace de matériau. Dans la thèse, les algorithmes génétiques ont été appliqués afin de résoudre les problèmes d'optimisation des portiques métalliques.

La première partie concerne l'analyse de la problématique de conception des portiques et la définition du cahier de charges. Les normes européennes et polonaises de conception des structures métalliques et de chargement ont été comparées. Les procédures de dimensionnement des sections et d'éléments ont été développées, en respectant toutes les contraintes imposées par des structures réelles.

Ensuite, une version d'algorithme génétique adapté à l'optimisation des portiques a été présentée. Un logiciel complet, comportant des modules d'analyse statique, de calcul de stabilité, de dimensionnement et d'optimisation a été développé.

Le logiciel créé a été appliqué aux problèmes d'optimisation des portiques métalliques. Les solutions ont été calculées d'abord en accord avec les normes de conception européennes et ensuite polonaises. L'optimisation des 96 exemples des portiques de géométrie et chargement différentes a été effectuée.

L'analyse des solutions a permis de formuler la conclusion ainsi que les recommandations concernant la conception optimale des portiques. Les résultats obtenus peuvent être utiles dans les problèmes réels de conception.

Mots-clés : structures métalliques, portiques, optimisation, algorithmes génétiques, conception optimale, stabilité, Eurocode

OPTIMAL DESIGN OF FRAME STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT STABILITY PROBLEMS

The use of portal frames in building engineering is very common. Engineers, during the design process, aim to reduce the cost of the structure and, consequently, the whole investment. The complexity of the problem and lack of proper tools assisting the optimisation process, hamper the effective use of material. In the thesis, the genetic algorithms were used to solve the problem of optimization of steel portal frames.

In the first part of dissertation, the problems of steel portal frames design were analysed and design assumptions were done. European and Polish codes for steel structures design and standards for loads got acquainted. Procedures for section and element dimensioning were built taking into account all essential applied to real structures.

Next, a version of the genetic algorithm adapted for the optimization of frame structures was presented. A complete computer program containing modules of static analysis, stability analysis, dimensioning and optimization has been created.

The developed software was applied to the problem of optimization of steel portal frames. The solutions were calculated according to European standards, and afterwards Polish standards. The optimization of 96 frame examples of different geometry and loading was carried out.

The analysis of solutions enabled us to formulate conclusion and recommendations concerning optimal design of portal frames. The obtained results can be useful in real design problems.

Keywords: steel structures métalliques, frames, optimisation, genetic algorithms, optimal design, stability, Eurocode