

Dr inż. Anna Barszcz

Politechnika Warszawska
Wydział Inżynierii Lądowej

**Wniosek o przeprowadzenie postępowania
habilitacyjnego w dziedzinie nauk technicznych
w dyscyplinie budownictwo**

Załącznik 3

Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych
w języku polskim i angielskim

Warszawa 2019

Załącznik 3 Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych
w języku polskim i angielskim

A.	Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych w języku polskim	3
B.	Summary report of author's research work and scientific achievements – English version	36

A. Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych w języku polskim

Spis treści

1. Imię i nazwisko	5
2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe	5
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	5
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789)	5
a) Tytuł osiągnięcia naukowego.....	5
b) Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe	5
c) Omówienie celu naukowego cyklu publikacji oraz osiągniętych wyników	6
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych	26
a) Osiągnięcia naukowo-badawcze inne niż wskazane w rozdziale 4.	26
b) Osiągnięcia naukowo-badawcze w obszarze nauk technicznych wg kryteriów z § 3 Rozporządzenia MNiSW	28
c) Osiągnięcia naukowo-badawcze we wszystkich obszarach wiedzy wg kryteriów z § 4 Rozporządzenia MNiSW.....	28
d) Omówienie działalności dydaktycznej i popularyzatorskiej oraz współpracy międzynarodowej po uzyskaniu stopnia doktora wg kryteriów z § 5 Rozporządzenia MNiSW	33

1. Imię i nazwisko

Anna Barszcz

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

- dyplom magistra inżyniera budownictwa, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, 1977,
- stopień naukowy doktora nauk technicznych w zakresie budownictwa, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, 1989. Tytuł rozprawy doktorskiej: *Nośność pręta stalowej kratownicy przestrzennej z uwzględnieniem przystosowania.*

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:

- od 1977.11.01 do 1978.09.30 - asystent stażysta, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej,
- od 1978.10.01 do 1980.09.30 - asystent, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej,
- od 1980.10.01 do 1989.09.30 - starszy asystent, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej,
- od 1988.08.01 do 1989.01.31 - staż przemysłowy w COBPKM Mostostal, Warszawa, Krucza 20/22
- od 1989.10.01 - adiunkt, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789)

a) Tytuł osiągnięcia naukowego

Podstawą do ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego jest cykl publikacji powiązanych tematycznie pt.: **Degradacja sztywności elementów prętowych z kątownika w analizie zaawansowanej CSD stężonych ram płaskich.**

b) Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe

W skład osiągnięcia naukowego wchodzi 3 samodzielne artykuły, stanowiące cykl publikacji powiązanych tematycznie, opublikowane w czasopiśmie „Archives of Civil Engineering” w latach 2014-2018. Artykuły te wyszczególniłam poniżej w kolejności chronologicznej, z podaniem danych bibliograficznych:

- 1) Barszcz A. M., 2014, **Experimentally assisted modelling of the behaviour of steel angle brace**, „Archives of Civil Engineering”, vol. 60 (1), ss. 3-39.
- 2) Barszcz A. M., 2018, **Validation of CSD advanced analysis of braced frame responses using subframe experimental investigations**, „Archive of Civil Engineering”, vol. 64 (2), ss. 111-146.
- 3) Barszcz A. M., 2018, **Direct design and assessment of the limit states of steel planar frames using CSD advanced analysis**, „Archives of Civil Engineering”, vol. 64 (4), [39 stron, status potwierdzony przez wydawcę: w druku].

Kopie artykułów stanowiących cykl publikacji powiązanych tematycznie zamieściłam w Załączniku 5.

c) Omówienie celu naukowego cyklu publikacji oraz osiągniętych wyników

Wprowadzenie

Analiza statyczna i projektowanie konstrukcji stalowych wg metody stanów granicznych są w praktyce inżynierskiej wspomagane komputerowo. Programy komputerowe najczęściej wykorzystują dwuetapowe podejście do projektowania. W pierwszym etapie przeprowadza się analizę statyczną konstrukcji w zakresie sprężystym, w stanach granicznych nośności i użyteczności wg teorii I rzędu, a obecnie częściej już wg teorii II rzędu oraz z uwzględnieniem podatności węzłów, ale z pominięciem wpływu imperfekcji i bez przyrostowego śledzenia ścieżki równowagi konstrukcji. Wpływ imperfekcji uwzględnia się w drugim etapie, podczas sprawdzania warunków nośności (stateczności) elementów, czyli prętów i węzłów konstrukcji.

Tradycyjny sposób projektowania, aczkolwiek dający rozwiązania bezpieczne, nie prowadzi do rozwiązań ekonomicznych z uwagi na fakt, że projektowanie wg stanów granicznych nie jest odniesione do faktycznego obciążenia granicznego konstrukcji w stanie granicznym nośności. Obciążenie graniczne wyznaczyć można z analizy zaawansowanej, która uwzględnia wszystkie najistotniejsze czynniki wpływające na zachowanie się konstrukcji pod wzrastającym obciążeniem, takie jak: nieliniowość geometryczną i materiałową, podatność węzłów, imperfekcje geometryczne i materiałowe. Realizowana jest przyrostowo i umożliwia śledzenie zachowania się konstrukcji na ścieżce równowagi w zakresie sprężystym, a następnie w obszarze niesprężystym, aż do chwili ujawnienia się stanu granicznego w wyniku utraty zdolności konstrukcji do przejmowania wzrastającego obciążenia (tzn. do chwili osiągnięcia punktu granicznego na ścieżce równowagi), bądź też w wyniku utraty zdolności do niesprężystej redystrybucji sił przekrojowych z powodu ograniczonej zdolności węzła lub przekroju pręta do obrotu. Projektowanie wykorzystujące

analizę zaawansowaną pozwala na odniesienie warunku bezpieczeństwa konstrukcji nie do pojedynczego elementu, pręta lub węzła, ale do całego układu konstrukcyjnego.

Zaawansowaną analizę układów konstrukcyjnych można prowadzić przy różnych założeniach wstępnych i za pomocą różnych algorytmów obliczeniowych. Jedną z nich jest metoda analizy alternatywna w stosunku do propozycji ujętych w normalizacji projektowania, wykorzystująca algorytm ciągłej degradacji sztywności [z ang. Continuous Stiffness Degradation (CSD)]. Imperfekcje lokalne, związane z wstępną strzałką wygięcia, niejednorodnością materiału i naprężeniami własnymi, uwzględnione są nie w wartości zastępczej (równoważnej) strzałki wygięcia pręta, ale w wartościach tzw. zastępczej (równoważnej) sztywności giętnej $(EI)_T$ oraz sztywności podłużnej $(EA)_T$.

Zagadnienia dotyczące procesu degradacji sztywności konstrukcji były przedmiotem moich zainteresowań badawczych od początku pracy zawodowej. Na etapie doktoratu dotyczyły one prętów ściskanych kratownic przestrzennych poddanych zmiennemu obciążeniu osiowemu, modelowanych z uwzględnieniem dużych przemieszczeń. W zakresie liniowo sprężystym pręt traktowany był jak element idealny o stałej sztywności. Po osiągnięciu obciążenia krytycznego, w sensie normowym, następowała degradacja jego sztywności do zera. Pozostawała ona niezmienną również w zakresie pokrytycznym, w którym charakterystyka siła – skrócenie osi pręta jest opadająca. Oddziaływanie pręta na układ w obszarze reprezentowanym przez jego zerową sztywność styczną modelowane było przez uwzględnienie reaktywnych sił węzłowych dodawanych do wektora obciążeń zewnętrznych. Wyniki badań zrealizowanych na etapie doktoratu zostały opublikowane w artykule w „Archiwum Inżynierii Lądowej” [Zał. 4 – II E 22] oraz były prezentowane na konferencjach krajowych [Zał. 4 – II L 53] i zagranicznych [Zał. 4 – II L 51, 54, 55, 56].

Takie podejście pozwalało na przybliżone odtworzenie opadającej gałęzi charakterystyki siła - wzajemne przemieszczenie końców pręta, ale nie zapewniało modelowania kontynuualnej degradacji sztywności. To zagadnienie stało się przedmiotem dalszych moich badań, tym razem w kontekście analizy stalowych, stężonych ram płaskich z węzłami podatnymi. Punktem startowym był algorytm zaawansowanej analizy opracowany w Purdue University pod kierunkiem W. F. Chena i przedstawiony w pracach opublikowanych wspólnie z jego współpracownikami, następnie zmodyfikowany i rozszerzony w zakresie modelowania węzłów podatnych przez M. A. Giżejowskiego. Jeżeli natomiast chodzi o degradację sztywności elementów ramy, to w prostej metodzie przyrostowej zaawansowanej analizy konstrukcji opracowanej w Purdue University przyjęto, że do połowy nośności ramowego i kratowego pręta niewrażliwego na utratę stateczności miejscowej i dystorsyjnej (określonej dla stanu uplastycznienia przekroju) występuje stała redukcja sztywności związana z wpływem imperfekcji geometrycznych, a powyżej połowy tej nośności:

- w przypadku pręta ramowego - następuje stopniowa redukcja modułu sprężystości związana z wpływem naprężeń własnych, aż do chwili osiągnięcia stanu granicznego pod wpływem wzrastającej siły podłużnej oraz momentu zginającego;
- w przypadku pręta kratowego - następuje stopniowa redukcja modułu sprężystości związana z wpływem naprężeń własnych, aż do chwili osiągnięcia nośności pod wpływem wzrastającej siły podłużnej; w przypadku elementów ściskanych kresem nośności jest osiągnięcie siły granicznej wg odpowiedniej krzywej wyboczeniowej, natomiast w wypadku prętów rozciąganych jest osiągnięcie siły granicznej przy pełnym uplastycznieniu przekroju najbardziej wyciężonego.

W obu powyższych przypadkach degradacja sztywności odbywała się według tej samej funkcji degradacji. W proponowanej metodzie ciągłej degradacji sztywności odstępiono od przybliżonego założenia, że degradacja sztywności giętnej i podłużnej elementów ramowego i kratowego odbywa się wg tej samej funkcji. Wykorzystując metodę hipotez statystycznych Murzewskiego, zbudowano dwa modele obliczeniowe hipotetycznych elementów idealnych, które odtwarzają – za pomocą dobranych funkcji sztywności zastępczych – nośność i sztywność elementów nieidealnych:

- model bifurkacyjny Shanleya (modułu stycznego) liniowej utraty stateczności elementu niesprężystego do wyznaczenia sztywności stycznej elementu ramowego,
- model dywergencyjny (punktu granicznego na ścieżce równowagi) nieliniowej utraty stateczności elementu niesprężystego do wyznaczenia sztywności stycznej elementu kratowego.

Ten etap prac był dokumentowany, począwszy od roku 2000, referatami na licznych konferencjach krajowych i zagranicznych, w sprawozdaniach z prac badawczych i w artykułach naukowych. Wyniki teoretyczne zostały też skonfrontowane z wynikami badań pojedynczych kątowników (projekt realizowany w University of Botswana wspólnie z Politechniką Warszawską w 2003 r. [Zał. 4 – II L 21]). Finalną wersję z uwzględnieniem kalibrowania parametrów modeli – tak, aby nośność elementów odpowiadała krzywom wyboczeniowym w PN-EN 1993-1-1 – zamieszczono w artykule [Zał. 4 – II A 1].

Opracowanie modeli utraty stateczności elementów podyktowane było chęcią udoskonalenia analizy zaawansowanej układów konstrukcyjnych, w których występują elementy o różnym przekroju oraz różnym wpływie imperfekcji na nośność przy wyboczeniu. Moje uczestnictwo w badaniach związanych z analizą konstrukcji stalowych, szczególnie w aspekcie degradacji sztywności jej elementów, udokumentowane zostało współautorstwem artykułów [Zał. 4 – II A: 2, 3, E: 12, 16, 18] i referatów prezentowanych na konferencjach w latach 2003-2017.

Dla potrzeb weryfikacji modeli obliczeniowych prętów ściskanych oraz metod analizy konstrukcji wykorzystujących opracowane modele prętów przeprowadziłam pilotażowe badania doświadczalne elementów stężeń w układach ramowych. Analiza wstępnych wyników uzyskanych z badań ram o pręcie stężającym z kątownika, przeprowadzonych w Laboratorium Zakładu Konstrukcji Metalowych Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej [Zał. 4 – II L: 8, 9, 10, 11] zasugerowała konieczność rozszerzenia opracowanego wcześniej modelu teoretycznego pręta ściskanego osiowo na przypadki osiowo ściskanych elementów ulegających wyboczeniu nieeulerowskiemu (skrętnemu i giętno-skrętnemu) oraz elementów ściskanych mimośrodowo, gdy jednokierunkowy lub dwukierunkowy mimośród wynika z rozwiązania szczegółów połączenia pręta w jego węzłach końcowych.

Podjęłam prace badawcze w tym kierunku, zarówno od strony teoretycznej, jak i doświadczalnej. Zaplanowałam rozbudowę modelu dywergencyjnego w celu uwzględnienia dwóch typowych sposobów zamocowania kątownika na końcach, w których pręt z kątownika usytuowany jest względem blach węzłowych symetrycznie (zamocowany spoinami do blachy węzłowej) oraz kątownika połączonego z blachami węzłowymi jednym ramieniem (zamocowany za pomocą śrub). Dla tych dwóch przypadków zaplanowałam i zrealizowałam program badań doświadczalnych ze środków, które pochodziły z grantu dziekańskiego [Zał. 4 – II F 11] oraz z pracy statutowej [Zał. 4 – II F 10]. Po przeprowadzeniu walidacji zaproponowanych modeli obliczeniowych zaplanowałam ich implementację do programu komputerowego ECIDA (European Continuously Integrated Design Approach) zmodyfikowanego przeze mnie pod kątem możliwości przeprowadzenia analizy zaawansowanej CSD.

Przedmiot, cel i zakres cyklu publikacji powiązanych tematycznie

Przedmiotem cyklu publikacji powiązanych tematycznie są rezultaty:

- modelowania degradacji sztywności stężenia wykonanego z kątownika połączonego z konstrukcją stalową za pomocą spoin lub śrub;
- modelowania degradacji sztywności stężonych ram płaskich;
- implementacji tego modelu do programu komputerowego ECIDA, który opracowano na potrzeby analizy zaawansowanej płaskich układów konstrukcyjnych z węzłami podatnymi;
- praktycznego wykorzystania opracowanego programu komputerowego do oceny bezpieczeństwa ramowych konstrukcji stalowych na podstawie autorskiego algorytmu obliczeniowego.

Wiarygodność zaproponowanych rozwiązań analitycznych i programowych została potwierdzona za pomocą walidacji modeli teoretycznych na podstawie wyników, które

uzyskano z badań doświadczalnych stężonego podukładu ramowego. Zbadano w nich zarówno zachowanie się pręta stężenia, jak i układu zbudowanego z elementów ramowych oraz z elementu kratowego. Badaniom doświadczalnym zostało poddanych 19 takich podukładów ramowych. Wyniki testów posłużyły do walidacji formuł analitycznych opisujących zachowanie się elementu stężenia, a także – do otrzymanych numerycznie ścieżek równowagi stężonych podukładów ramowych. Zaproponowaną metodę analizy zastosowano do obliczeń układu kratowego i stężonych ram wielokondygnacyjnych.

Celem ogólnym cyklu publikacji powiązanych tematycznie było przedstawienie opracowanej metody zaawansowanej analizy CSD, w której uwzględniony jest dywergencyjny model nieliniowej utraty stateczności elementów kratowych z kątowników o zróżnicowanych sposobach mocowania, między innymi skutkujących mimośrodowym przyłożeniem siły ściskającej.

Szczegółowymi celami przeprowadzonych analiz, modelowania i badań były:

- sformułowanie charakterystyk siła – przemieszczenie i sztywność – przemieszczenie pojedynczego stężenia z kątownika poddanego jednokrotnemu obciążeniu ściskającemu, z uwzględnieniem wpływu połączeń na jego końcach na tę charakterystykę;
- walidacja i kalibracja wybranych parametrów opracowanego modelu analitycznego w oparciu o wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych ram ze stężeniem połączonym spoinami "na widelec" i za pośrednictwem śrub łączących jedno ramię;
- modyfikacja programu komputerowego ECIDA w zakresie odpowiedzi elementu kratowego na przykładane obciążenie, z uwzględnieniem jego zachowania się przy rozciąganiu i ściskaniu, w tym po wyboczeniu;
- walidacja opracowanego modelu obliczeniowego ram stężonych na podstawie ścieżek równowagi badanych doświadczalnie ram stężonych kątownikiem;
- propozycja algorytmu szacowania bezpieczeństwa konstrukcji ramowych przy użyciu analizy CSD dla układów płaskich, uwzględniającego ocenę stanów granicznych nośności i użytkowania w jednym przebiegu analizy;
- zastosowanie zaproponowanego algorytmu oceny stanów granicznych do rzeczywistej konstrukcji ramowej.

W pierwszej pracy cyklu [Zał. 5 – 1] sformułowałam charakterystykę siła – zbliżenie końców pręta stężającego, wykonanego z kątownika, poddanego jednokrotnemu obciążeniu ściskającemu. Przetworzyłam swój wkład w rozwój wspomaganych testami modeli analitycznych opisujących ścieżkę równowagi ściskanego pręta stężenia. Model pręta o przekroju kątownika opracowałam z uwzględnieniem wpływu sposobu połączenia jego

końców z konstrukcją ramy na przebieg charakterystyki siła - przemieszczenie. Rozpatrzyłam dwa różne rodzaje połączeń, typowe w praktyce inżynierskiej, odpowiadające połączeniu spawanemu „na widelec” i połączeniu jednym ramieniem za pomocą śrub. Dla kątownika równoramiennego w pierwszym typie połączenia uwzględniłam mimośród obciążenia w płaszczyźnie symetrii przekroju, w drugim zaś - mimośród w obu kierunkach osi głównych. Opisałam badania doświadczalne zachowania się pręta z kątownika równoramiennego stanowiącego stężenie podukładu ramowego. Przedstawiłam wyniki tych badań i wykorzystałam je do walidacji opracowanego modelu analitycznego zachowania się pręta.

Druga praca cyklu [Zał. 5 – 2] dotyczy analizy zaawansowanej CSD stalowych stężonych układów szkieletowych. Pionowe stężenia ram składają się z elementów kratownicowych połączonych z elementami ramowymi. Technika modelowania oparta jest na koncepcji stopniowej degradacji sztywności elementów ramy i kratownicy. Nowatorstwo podejścia przedstawionego w tym artykule związane jest z wprowadzeniem odpowiedzi elementu stężającego, traktowanego jako element nieidealny w całym zakresie jego zachowania przy rozciąganiu i ściskaniu, w tym – w zakresie opadającej charakterystyki siły podłużnej i wzajemnego zbliżenia końców po osiągnięciu nośności na wyobczenie. Walidacja proponowanej zaawansowanej analizy jest przeprowadzana dla podsystemu ramowego, składającego się z dwuteowników stanowiących ramę podstawową oraz z pręta stężającego z kątownika walcowanego, dla którego walidacja zależności siła – przemieszczenie została przedstawiona w pierwszej publikacji cyklu [Zał. 5 – 1]. Przedstawiłam krótki przegląd propozycji analizy konstrukcji ram stalowych z uzasadnieniem wyboru zaawansowanej analizy CSD i określeniem jej odmienności w stosunku do zaawansowanej analizy opracowanej w Purdue University, tzw. analizy udoskonalonego przegubu plastycznego (z ang. RPH). Zamieściłam wzory analityczne do wyznaczania współczynników redukcji sztywności i na wykresach pokazałam przebieg ich zmienności przy obciążeniu momentem zginającym i siłą podłużną w przypadku elementów ramowych, a w przypadku elementów kratowych tylko siłą podłużną. Krótko omówiłam program badań doświadczalnych stężonych podukładów (rozumianych jako stężona rama portalowa), który przedstawiony był szczegółowo we wcześniejszych publikacjach, w tym w pierwszej publikacji cyklu [Zał. 5 – 1]. Zamieściłam wyniki badań doświadczalnych w postaci ścieżek równowagi ram badanych doświadczalnie $F-\bar{\delta}_F$, z zaznaczonymi punktami granicznymi i innymi punktami charakterystycznymi, za które uznałam osiągnięcie nośności wyobczeniowej przez pręt stężenia ramy. Wyniki te wykorzystałam do walidacji opracowanego modelu obliczeniowego ram stężonych. Porównałam przebieg ścieżek równowagi w zakresie sztywności i nośności układów oraz pokazałam przebieg degradacji sztywności pręta stężenia i najbardziej

obciążonego elementu rygla ramy. Porównałam otrzymane analitycznie i numerycznie przebiegi zależności siła – przemieszczenie oraz współczynnik redukcji sztywności w funkcji odkształcenia podłużnego pręta stężenia.

Trzecia praca cyklu [Zał. 5 – 3] dotyczy opracowania algorytmu oceny stanów granicznych konstrukcji nowo projektowanych oraz konstrukcji już eksploatowanych, z wykorzystaniem zaawansowanej analizy CSD w wersji przyjętej do walidacji modelu w drugiej publikacji cyklu [Zał. 5 – 2]. Przedstawiłam krótki przegląd aktualnego stanu badań w tym zakresie i własny wkład w rozwój bezpośredniego projektowania i oceny konstrukcji stalowych przy użyciu zaawansowanej analizy CSD, która jest najbardziej zbliżona do rzeczywistego zachowania się stalowych szkieletowych ustrojów nośnych. Zaproponowałam schemat oceny stanów granicznych przy użyciu analizy CSD dla układów płaskich, uwzględniający ocenę stanów granicznych nośności i użyteczności w jednym przebiegu analizy. Do zaprezentowania różnic w modelowaniu konstrukcji za pomocą zaawansowanej metody udoskonalonego przegubu plastycznego (RPH) i proponowanej metody ciągłej degradacji sztywności (CSD) wykorzystałam kratownicę Misesa, wrażliwą na duże przemieszczenia. Przykład ten pokazuje różnice między obu podejściami analitycznymi w przypadku, gdy elementy kratownicy są wykonane z kątowników połączonych z konstrukcją za pomocą spoin lub śrub. Główny cel tego artykułu - ocenę bezpieczeństwa przy użyciu analizy CSD - zilustrowałam praktycznym zastosowaniem zaproponowanego algorytmu do oceny stanów granicznych nośności i użyteczności (ULS i SLS) ustroju wielokondygnacyjnego o schemacie ramy stężonej. Szczegółowe rozważania dotyczyły konstrukcji rzeczywistej, o węzłach rygiel – słup nominalnie przegubowych, której ocena nośności oraz użyteczności była przedmiotem ekspertyzy realizowanej na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej. Konstrukcję rozważano w wersji pierwotnie zrealizowanej, a także wersji zmodyfikowanej, po wzmocnieniu niektórych jej elementów, gdy po pewnym okresie eksploatacji zmianie uległa funkcja obiektu, a konstrukcja przestała spełniać normowe kryteria nośności ujęte w znowelizowanych normach projektowania. Przedstawiłam wyniki obliczeń ramy, a następnie skutki wzmocnień jej elementów i porównałam obie sytuacje projektowe. Rozważałam też tę samą geometrię ramy, ale z uwzględnieniem podatnych i nominalnie sztywnych węzłów rygiel – słup. Porównałam stopnie wykorzystania nośności oraz granicznych przemieszczeń, a także wpływ innego przebiegu degradacji sztywności elementów na nośność i sztywność ramowego ustroju nośnego. Ukazałam przydatność prezentowanego podejścia w ocenie stanów granicznych konstrukcji obiektu istniejącego i ogólniej – przy projektowaniu ramowych konstrukcji stalowych.

Omówienie osiągniętych wyników

Zgodnie z przyjętym planem podjęłam prace badawcze zarówno od strony teoretycznej jak i doświadczalnej. Rozpoczęłam od wprowadzenia w stanie przedkrytycznym nieliniowej zależności opisującej wyężenie pręta wg teorii II rzędu w przypadku prętów mimośrodowo ściskanych. Pierwsze propozycje z lat 2008-2010 koncentrowały się na próbach uproszczenia tych zależności, jednak ostatecznie w referatach na konferencjach w latach 2011-2013 przedstawione zostały dokładniejsze rozwiązania analityczne. Poszukiwania w tym obszarze zakończyłam modelem przedstawionym w artykule [Zał. 5 – 1]. Do opisu zachowania się elementów osiowo ściskanych zastosowałam, podobnie jak w poprzednich pracach, modelowanie wykorzystujące podejście Murzewski-Rankine-Merchant (M-R-M).

Wzór na bezwymiarowe naprężenie przyjęłam w następującej postaci

$$\bar{\sigma} = \left(\bar{\sigma}_E^{-n} + \sum_{j \leq 2} \bar{\sigma}_{bif,j}^{-n} + \bar{\sigma}_{har}^{-n} + \bar{\sigma}_{ult}^{-n} \right)^{-\frac{1}{n}} \quad (1)$$

- $\bar{\sigma}_E$ dotyczy sytuacji przed osiągnięciem siły krytycznej i w przypadku obciążenia mimośrodowego obliczane jest zgodnie z teorią II rzędu. W przypadku ściskania w płaszczyźnie zawierającej oś główną obliczenie tego składnika sprowadza się do wyznaczenia pierwiastków rzeczywistych dodatnich równania 3. stopnia, co jest osiągalne analitycznie, natomiast przy ściskaniu względem obu głównych osi bezwładności równanie jest 5. stopnia i trzeba szukać rozwiązań numerycznych albo znaleźć rozwiązania przybliżone redukujące stopień równania. W artykule wykorzystałam tę drugą możliwość.

Badania kątowników zamocowanych jednym ramieniem sugerowały dodatkową redukcję sztywności spowodowaną skręcaniem elementu połączonego z blachą węzłową za pomocą śrub, co uwzględniłam szacunkowym parametrem ψ zależnym od stosunku minimalnej siły krytycznej wyboczenia giętnego do siły krytycznej wyboczenia skrętnego.

- $\bar{\sigma}_{bif,j}$ jest bezwymiarowym naprężeniem krytycznym wyznaczonym zgodnie z liniową teorią stateczności sprężystej. Uwzględnia nieskorelowane postacie wyboczenia, których ilość określa indeks j ($j = 2$ dla przekrojów bisymetrycznych, dla których deterministycznie niezależne są wyboczenia giętne i skrętne, oraz dla przekrojów monosymetrycznych, dla których niezależne są wyboczenie w płaszczyźnie symetrii i wyboczenie giętno-skrętne, $j = 1$ dla przekrojów bez osi symetrii).
- $\bar{\sigma}_{har}$ jest składnikiem związanym z mechanizmem odkształcenia plastycznego I rzędu w obszarze wzmocnienia materiału; składnik ten nie był modyfikowany na tym etapie badań.

- $\bar{\sigma}_{ult}$ jest składnikiem związanym z mechanizmem nieliniowego odkształcenia plastycznego II rzędu; zaproponowałam modyfikację tego składnika dla kątowników zamocowanych jednym ramieniem.

Dwa pierwsze składniki dotyczą sprężystych mechanizmów odkształcenia i właśnie w nich zostały uwzględnione efekty mimośrodowego przyłożenia obciążenia. Ilustracją wzoru (1) są wykresy pokazane na Rys. 1 dla kątownika równoramiennego o dwóch smukłościach i dwóch sposobach połączenia z blachą węzłową.

Mimośród w płaszczyźnie symetrii powoduje spadek nośności zależny tylko od wartości mimośrodu. Mimośród przestrzenny, w przypadku pręta krępego, powoduje wyraźną redukcję nośności, czego nie obserwuje się dla prętów wiotkich. Obserwuje się natomiast inne zachowanie pokrywiczne. Wynika to ze zintegrowanego efektu zginania w dwóch kierunkach i skręcania, wpływającego na inne zachowanie się pręta w obszarach sprężystych i plastycznych.

Odpowiednikami wykresów z Rys. 1 są wykresy degradacji sztywności pokazane na Rys. 2. Zależności te są obliczane ze wzoru:

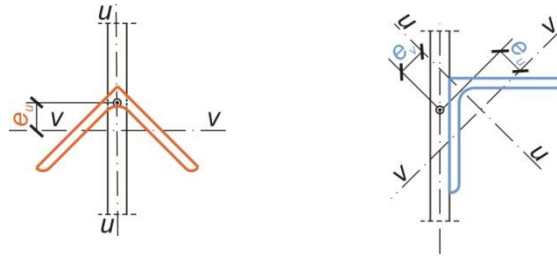
$$\bar{\kappa} = \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} = [\bar{\sigma}_E^{-n} + \sum_{j \leq 2} \bar{\sigma}_{bif,j}^{-n} + \bar{\sigma}_{har}^{-n} + \bar{\sigma}_{ult}^{-n}]^{-(1+n)/n} [\bar{\sigma}_E^{-n-1} \bar{\kappa}_E + \bar{\sigma}_{har}^{-n-1} \bar{\kappa}_{har} + \bar{\sigma}_{ult}^{-n-1} \bar{\kappa}_{ult}] \quad (2)$$

gdzie: $\bar{\kappa}_E = \frac{d\bar{\sigma}_E}{d\bar{\varepsilon}}$, $\bar{\kappa}_{har} = \frac{d\bar{\sigma}_{har}}{d\bar{\varepsilon}}$, $\bar{\kappa}_{ult} = \frac{d\bar{\sigma}_{ult}}{d\bar{\varepsilon}}$

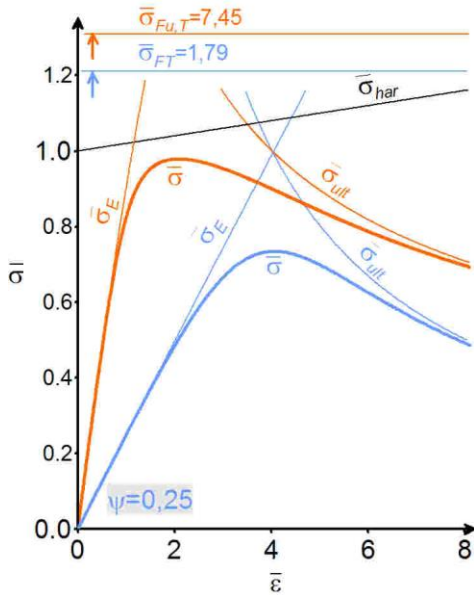
Wykresy pokazane na Rys. 1 i 2 uwzględniają efekty kalibracji niektórych parametrów występujących w zależnościach (1) i (2). Ten etap prac wymagał konfrontacji z badaniami doświadczalnymi, które przeprowadzono dla płaskich podukładów ramowych pokazanych na Rys. 3. Seria badań obejmowała 19 ram (9 ze stężeniem połączonym spoinami, 10 ze stężeniem połączonym śrubami). Dla każdego typu połączenia przewidziano 3 długości L_b . Dobór przekrojów elementów ramy badawczej przeprowadzono przy przyjęciu założeń, że:

- wyboczenie pręta stężenia nastąpi wcześniej niż utworzenie się przegubu plastycznego w węźle ramy;
- połączenia pręta stężenia ze słupami będą odwzorowywać typowe połączenia tych elementów stosowane w rzeczywistych konstrukcjach;
- połączenie pręta stężenia z ramą będzie miało nośność nie mniejszą niż nośność na wyboczenie pręta stężenia.

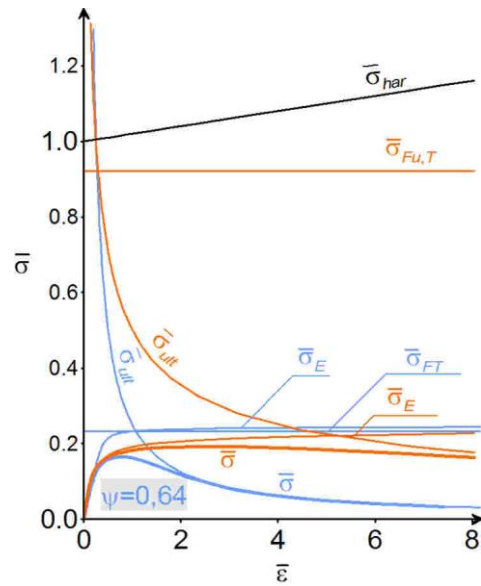
Kalibrację przeprowadzono na podstawie pośrednich pomiarów siły (za pomocą tensometrów) oraz bezpośrednich pomiarów przemieszczenia końców pręta stężenia.



a) $\bar{\lambda}_{Fv}=0,5$

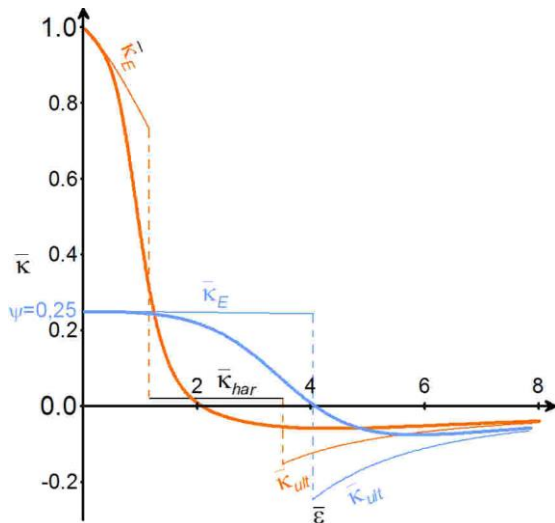


b) $\bar{\lambda}_{Fv}=2,0$

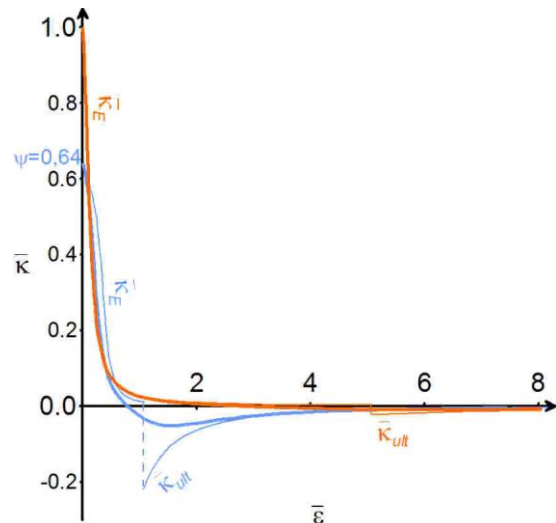


Rys. 1. Porównanie deterministycznych i probabilistycznych bezwymiarowych charakterystyk siła-przemieszczenie stężenia z kątownika: a) pręt krępy, b) pręt smukły.

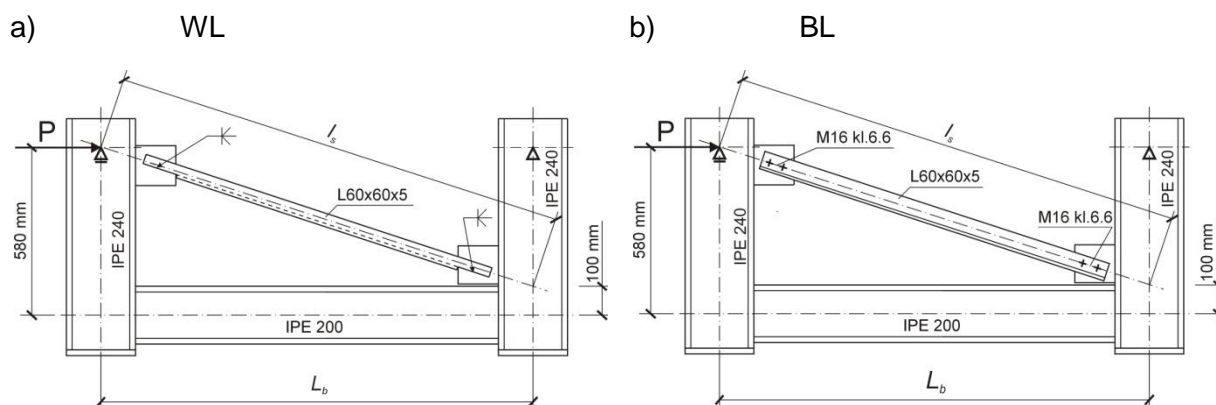
a) $\bar{\lambda}_{Fv}=0,5$



b) $\bar{\lambda}_{Fv}=2,0$



Rys. 2. Porównanie deterministycznych i probabilistycznych bezwymiarowych sztywności podłużnych odpowiadających charakterystyk z Rys. 1: a) pręt krępy, b) pręt smukły.



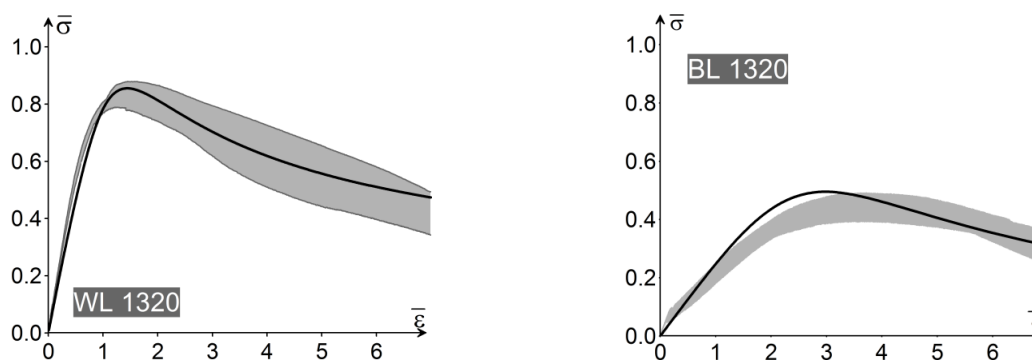
Rys. 3 Geometria badanych ram portalowych (widok z boku): a) połączenie spawane, b) połączenie śrubowe.

Zgodnie z przewidywaniami badania doświadczalne wykazały, że istnieją zasadnicze różnice między zachowaniem stężeń o spawanych połączeniach końców pręta (połączenie symetryczne względem płaszczyzny ramy) a tych o połączeniach na śruby (połączenie asymetryczne względem płaszczyzny ramy). Różnice wynikają nie tylko z rodzaju złącza, ale przede wszystkim ze względu na sposób mimośrodowego przekazywania siły podłużnej oraz odmienny efekt niedoskonałości obu rodzajów elementów. Zasadniczo udowodniono, że kątowniki z połączeniami śrubowymi są „słabsze”, to znaczy wykazują mniejszą nośność na wyboczenie i niższe położenie charakterystyki naprężenie - odkształcenie niż odpowiadające kątownikom spawanym do blachy węzłowej. W związku z tym zdecydowałam, że kalibracja parametrów modelu analitycznego wykonana będzie oddzielnie dla każdej z tych grup elementów stężających.

Przedmiotem kalibracji były głównie: n - zastępczy parametr imperfekcji ($n = 5$ dla kątownika spawanego i $n = 3,5$ dla kątowników połączonych śrubami), współczynnik długości wyboczeniowej (zredukowany dla stężeń mocowanych symetrycznie), współczynnik redukcji sztywności początkowej ψ (równy jedności w przypadku stężenia z symetrycznym połączeniem spawanym) i dwa parametry a_u i m odpowiedzialne za przebieg charakterystyki siły podłużnej oraz zbliżenia końców pręta podczas rozwoju stref plastycznych po osiągnięciu nośności na wyboczenie.

W przypadku kątowników ze złączami spawanymi stężenie było usytuowane w płaszczyźnie symetrii ramy i w związku z tym miało naturalną skłonność do wyboczenia w płaszczyźnie ramy, a zatem blacha węzłowa wykazywała dużą sztywność obrotową i długość wyboczeniowa została przesunięta w kierunku wartości teoretycznej dla sztywno połączonego elementu ($\mu = 0,5$). W przypadku połączeń śrubowych, stężenie miało tendencję do skręcenia (deformacji z płaszczyzny ramy), płyta węzłowa wykazywała wówczas znacznie mniejszą sztywność obrotową, a długość wyboczeniowa okazała się bliższa teoretycznej wartości dla elementu połączonego nominalnie przegubowo ($\mu = 1,0$).

Przeprowadziłam porównanie charakterystyk siły podłużnej oraz wzajemnego zbliżenia końców pręta, skonstruowanych analitycznie z wykorzystaniem wyżej wymienionych parametrów modelu z otrzymanymi doświadczalnie. Stwierdziłam, że zaproponowana formuła analityczna zastosowana razem ze skalibrowanymi parametrami modelu prowadzi do wystarczająco dokładnego opisu zachowania się kratowego pręta stężenia, zarówno dla kątowników przyspawanych, jak i mocowanych na śruby. Przykład takiego porównania przedstawiony jest na Rys. 4 dla ramy, której stężenie ma względną smukłość giętną równą 1,05 (przy współczynniku długości wybozeniowej równym 1,0). Kolorem szarym zaznaczony jest obszar, w którym mieszczą się wyniki badań eksperymentalnych, a linią czarną zależność analityczna. Ten etap badań, związany z walidacją zachowania się pręta stężenia o różnym sposobie mocowania na końcach, uznałam za zakończony.



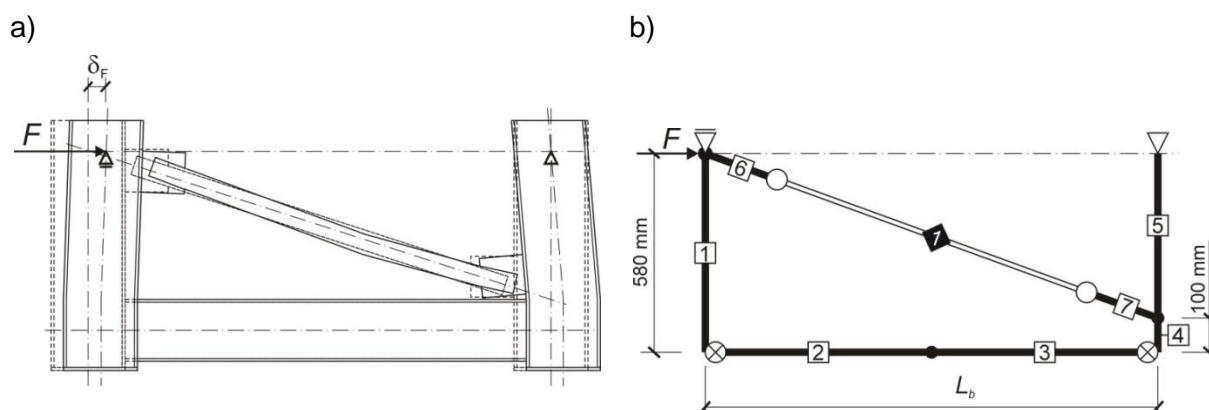
Rys. 4 Porównanie charakterystyki analitycznej siła-odkształcenie z obwiednią wyników doświadczalnych.

W 2010 roku w artykule [Załącznik 4 – II E 8] przedstawiłam wyniki serii badań stężonych podukładów ramowych, a ich porównanie z obliczeniami przeprowadzonymi przez Waela A. Salaha Khalila programem ABAQUS (modelowanie powłokowe) zostało zaprezentowane w referacie [Załącznik 4 – II L 7].

Do weryfikacji i walidacji modelu ramy stężonej z zastosowaniem opracowanego modelu pręta kratowego potrzebowałam narzędzia w postaci odpowiedniego programu komputerowego (umożliwiającego prowadzenie zaawansowanej analizy CSD). Skorzystałam z mojego wcześniejszego zaangażowania w badaniach prowadzonych w ramach projektu E!3034 w programie Eureka/SEFIE “Steelbiz jako E-forum do wdrażania Eurokodów dotyczących budownictwa stalowego”, koordynowanego przez Instytut Konstrukcji Stalowych w Wielkiej Brytanii oraz Instytut Techniki Budowlanej, jako podzadanie finansowane ze środków Komitetu Badań Naukowych, które dotyczyły analizy zaawansowanej z wykorzystaniem programu ECIDA. Na potrzeby praktycznej analizy zmodyfikowałam program ECIDA, uwzględniając opracowany model pręta stężenia. W programie tym podstawowe równania równowagi analizy CSD są analogiczne do analizy RPH (udoskonalonego przegubu plastycznego), gdyż założenie skoncentrowanej plastyczności

(tworzenie przegubów plastycznych na końcach elementów) zastąpione jest przybliżonym modelowaniem rozwoju stref plastycznych od końców pręta (wzdłuż ich długości). W artykule [Zał. 5 – 2] opisałam zasadę działania programu, podałam równania równowagi ze szczególnym uwzględnieniem podmacierzy sztywności elementów ramowych i kratowych. Zmodyfikowałam procedurę obliczania sztywności ściskanych elementów ramowych w zakresie redukcji modułu sprężystości ze względu na imperfekcje geometryczne. Całkowicie zmieniłam procedurę obliczania sztywności elementów kratowych zgodnie z zależnościami opracowanymi dla kątowników.

Walidację zachowania się układu ramowego przeprowadziłam na podstawie porównania ścieżek równowagi otrzymanych doświadczalnie z obliczonymi programem komputerowym. Posłużyły do tego pomiary siły F obciążającej ramę i odpowiadającego jej przemieszczenia δ_F (Rys. 5a). Do obliczeń programem ECIDA ramę podzielono na minimalną liczbę elementów skończonych (Rys. 5b) po uprzednim sprawdzeniu praktycznie braku wpływu wielkości elementów skończonych na wynik obliczeń ramy.

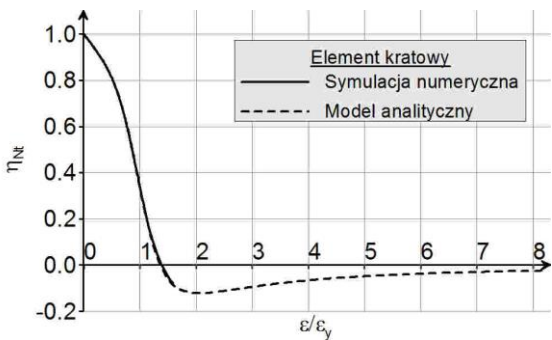
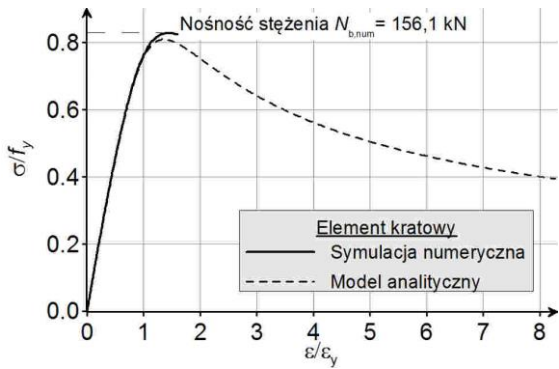
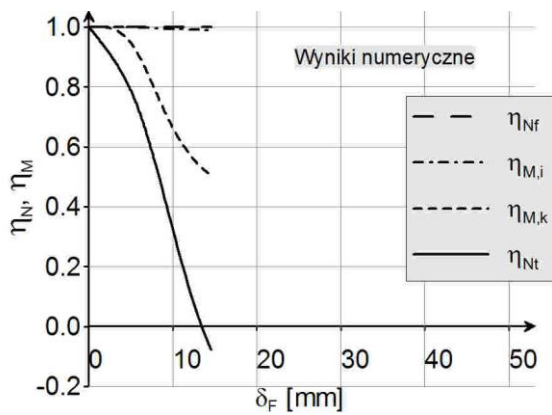
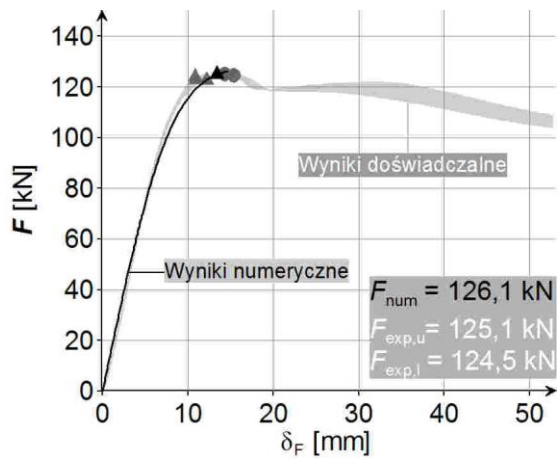


Rys. 5 Badany układ ramowy: a) schematyczne przedstawienie obciążenia i deformacji ramy, b) model numeryczny ramy.

Na Rys. 6 jako przykładowe pokazane są wyniki porównań dla tych samych ram, dla których na Rys. 4 porównano eksperymentalne i analitycznie wyznaczone bezwymiarowe charakterystyki naprężenia – odkształcenie stężenia. Kolejno są to:

- eksperymentalne i numeryczne charakterystyki obciążenia i przesunięcia obciążanego węzła ramy $F-\delta_F$; obwiednia wyników eksperymentu ma kolor szary; kółka określają ostateczny stan graniczny ram, trójkąty – poziom obciążenia odpowiadający osiągnięciu nośności wybozeniowej (zerowej sztywności) elementu stężającego;
- numeryczne funkcje degradacji sztywności η dla elementów ramowego nr 3, mianowicie η_{Nf} , η_{Mi} , η_{Mki} i dla stężenia η_{Nb} ; wybrany został element 3. i węzły na jego końcach: lewy "i" i prawy "k", ponieważ koniec "k" charakteryzuje się najniższymi wartościami funkcji degradacji sztywności;

a)



b)

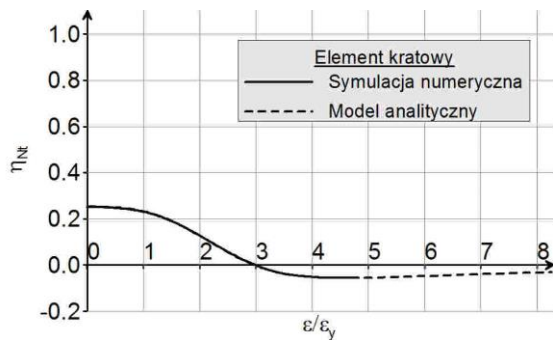
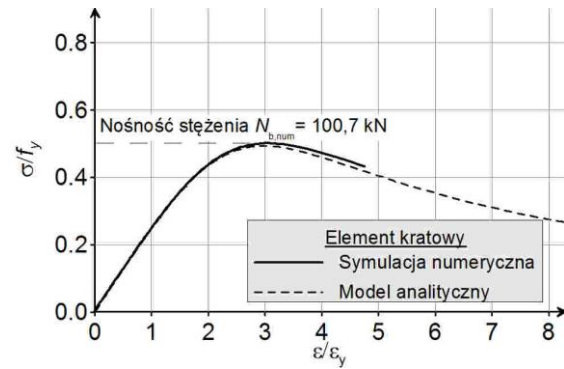
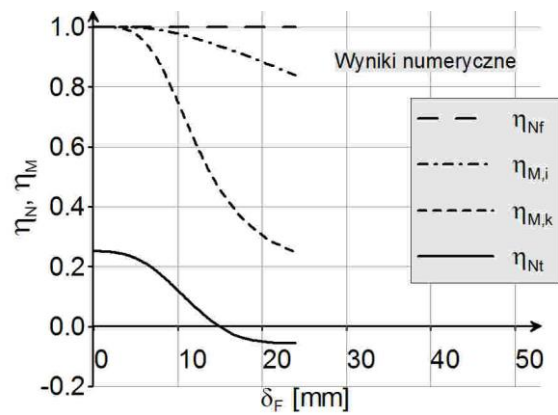
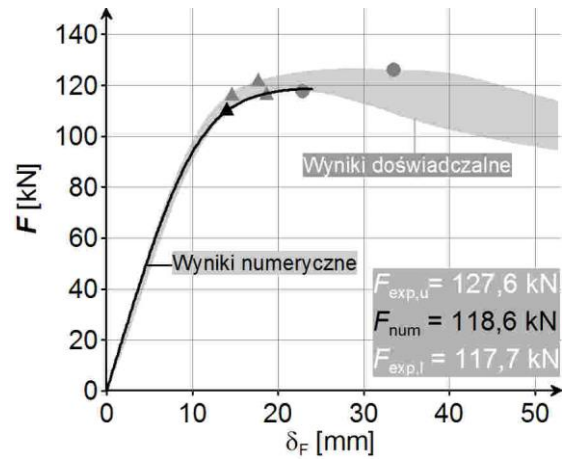


Fig. 6 Porównanie doświadczalnych i numerycznych oraz numerycznych i analitycznych wyników dla ram: a) WL 1320, b) BL 1320

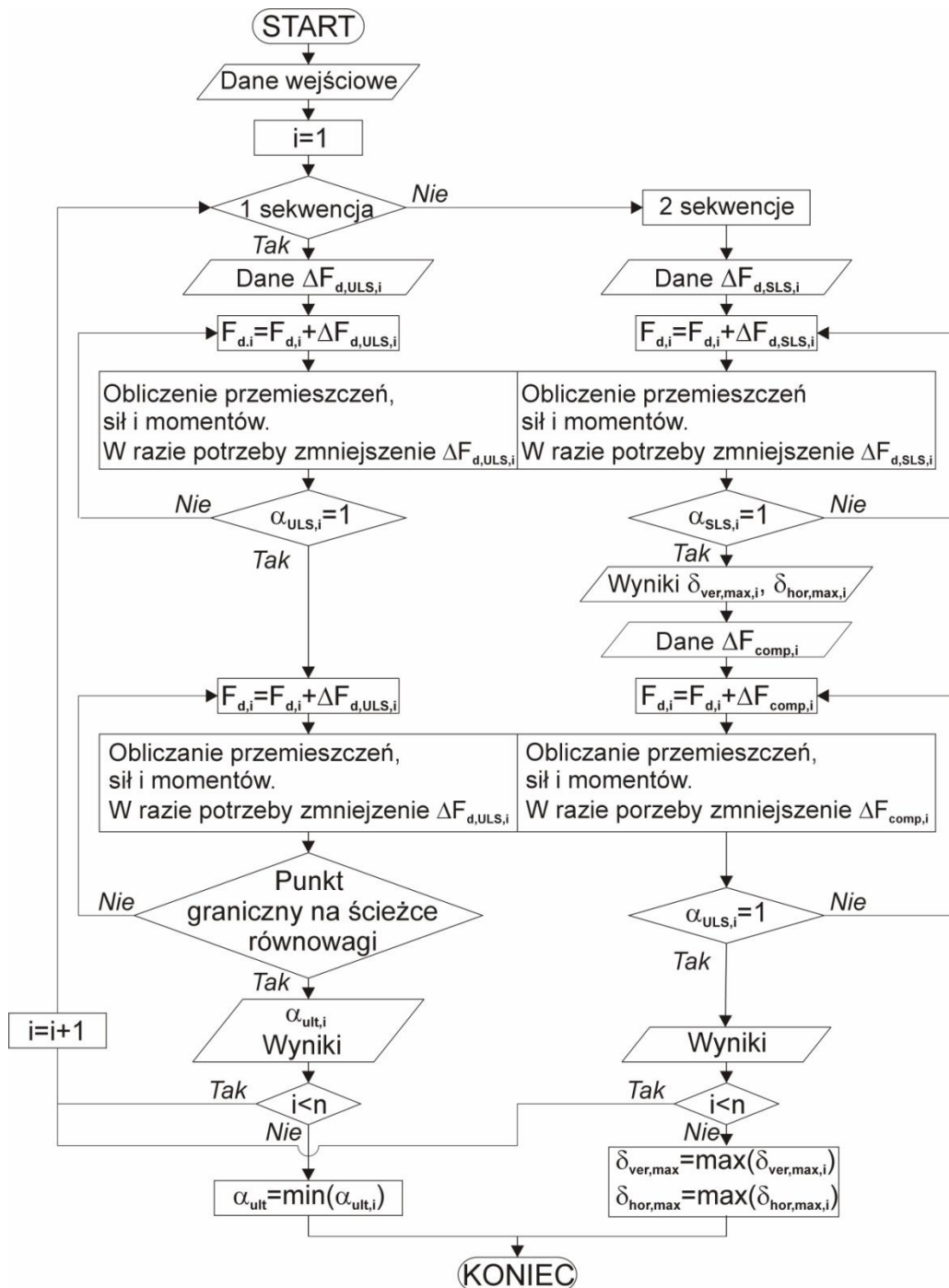
- numeryczne i analityczne bezwymiarowe charakterystyki odkształcenie-naprężenie stężenia;
- numeryczne i analityczne funkcje degradacji sztywności osiowej η_{Nt} dla stężenia.

Analiza porównawcza wskazuje, że ścieżki równowagi uzyskane numerycznie za pomocą zaawansowanej analizy CSD są w dobrej zgodności ze ścieżkami doświadczalnymi w odniesieniu zarówno do sztywności początkowej, jak i do nośności. Stan graniczny nośności ramy jest związany z przekroczeniem poziomu deformacji pręta stężenia odpowiadającego jego nośności na wyboczenie. Przemieszczenia ram BL wskazują, że elementy konstrukcyjne doznają znacznych odkształceń plastycznych. W wyniku tego, funkcje degradacji sztywności elementów ramowych w stanie granicznym nośności ramy mają niskie wartości dodatnie, a dla elementów kratowych nawet wartości ujemne. Połączenia spawane stężeń poprawiają sztywność ramy, ale zmniejszają ciągliwość. W rezultacie przemieszczenia ram WL są mniejsze od tych, które odnoszą się do ram BL o tej samej długości stężenia. Sztywność elementów ramowych w chwili osiągnięcia stanu granicznego jest w analizie CSD podobna lub większa dla ram WL niż dla ram BL.

Wyniki tego etapu badań przekonały mnie, że opracowana wersja zaawansowanej analizy ram stężonych, w której uwzględnia się wpływ opadającej charakterystyki siły podłużnej oraz wzajemnego skrócenia końców pręta na redystrybucję sił wewnętrznych szkieletu stalowego, ma walory użyteczne oraz może być wykorzystana w praktycznej ocenie bezpieczeństwa konstrukcji stalowych. Jest ona typu GMNIA, tzn. jest zdolna do odtworzenia nieliniowej ścieżki równowagi konstrukcji szkieletowych w sposób możliwie najbliższy ich rzeczywistemu zachowaniu się. Oznacza to, że przynajmniej takie efekty, jak nieliniowość geometryczna, materiałowa i strukturalna, efekty imperfekcji geometrycznych i materiałowych, a także nieliniowe charakterystyki węzłów są uwzględnione poprawnie w globalnej ocenie zachowania się stężonych konstrukcji ramowych pod wzrastającym obciążeniem. W rezultacie podejście projektowe oparte na takiej analizie jest w stanie prześledzić ścieżkę równowagi stalowego ustroju nośnego budynku, a także ocenić punkt graniczny na ścieżce równowagi w warunkach różnych kombinacji obciążeń projektowych.

Powyższe wnioski skłoniły mnie do zaproponowania procedury oceny bezpieczeństwa stalowych konstrukcji z prętami kratowymi z kątownika, z wykorzystaniem zmodyfikowanego przeze mnie programu ECIDA. Temu zagadnieniu poświęcony został trzeci z artykułów w wykazie publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe [Zał. 5 – 3]. Proponowany algorytm oceny bezpieczeństwa ram stalowych przedstawiłam na Rys. 7 dla wybranych kombinacji obciążeń wymaganych do oceny bezpieczeństwa konstrukcji już eksploatowanej lub konstrukcji nowo projektowanej. W zależności od zapotrzebowania, dla każdej kombinacji można wybrać jedną z dwóch ścieżek obliczeniowych do oceny ścieżki równowagi i punktu granicznego na tej ścieżce. Jeżeli istotne jest wyznaczenie rezerwy nośności konstrukcji,

obliczenia należy przeprowadzić dla jednej sekwencji obciążeń z kombinacji ULS, aż do osiągnięcia punktu granicznego na ścieżce równowagi, który może być sygnalizowany na kilka sposobów:



Rys. 7 Schemat ścieżek oceny konstrukcji.

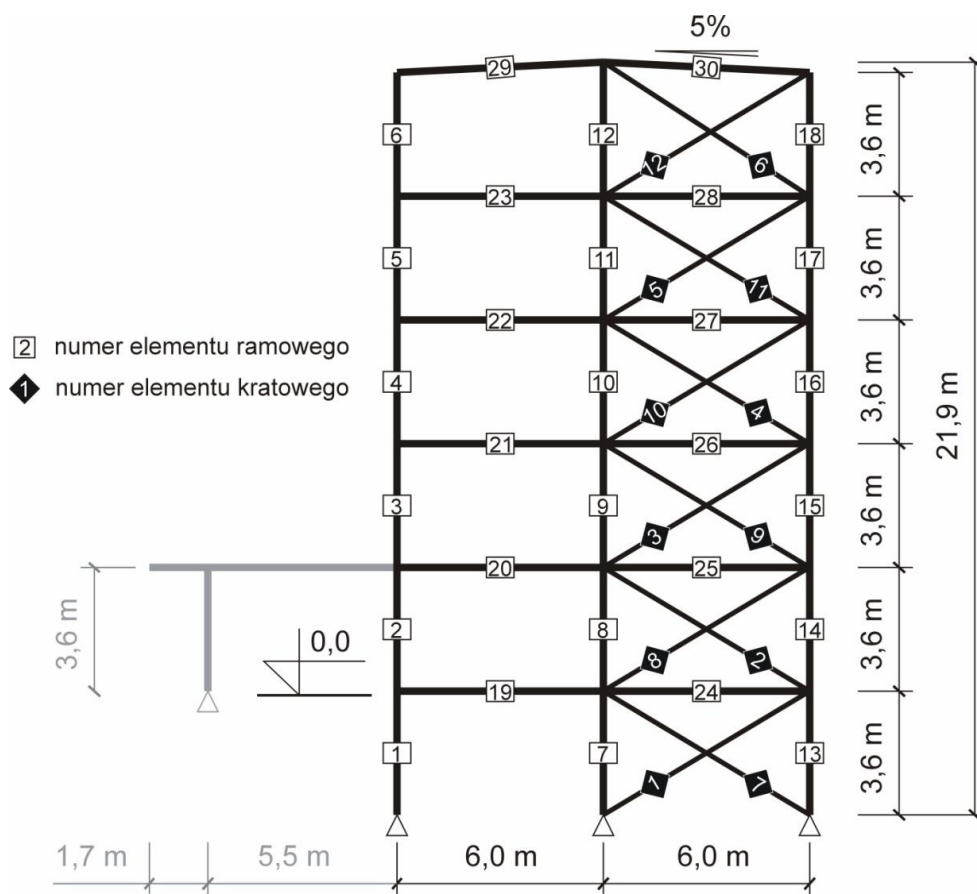
- ujemną wartością wyznacznika macierzy sztywności;
- osiągnięciem nośności plastycznej na zginanie zredukowanej ze względu na wpływ siły podłużnej w najbardziej wyężonym przekroju elementu ramowego;
- przekroczeniem maksymalnej odkształcalności elementu kratowego;

- zbyt dużą różnicą współczynników redukcji nośności w kolejnych krokach obciążenia lub brakiem możliwości osiągnięcia równowagi w kolejnym, mocno zredukowanym kroku obciążenia.

Przy standardowym projektowaniu wygodniejsza jest druga ścieżka obliczeniowa, w której maksymalne obciążenie w kombinacji ULS dzieli się na dwie sekwencje. Pierwsza jest właściwa dla odpowiadającej wybranej kombinacji SLS, a druga stanowi dopełnienie obciążenia $F_{d,SLS}$ do wartości $F_{d,ULS}$. Wartości przemieszczeń przy osiągnięciu obciążenia $F_{d,SLS}$ ($\alpha_{SLS}=1$) są miarodajne dla weryfikacji stanu granicznego użytkowania, natomiast osiągnięcie obciążeń $F_{d,ULS}$ ($\alpha_{ULS}=1$) mówi o wystarczającej nośności konstrukcji.

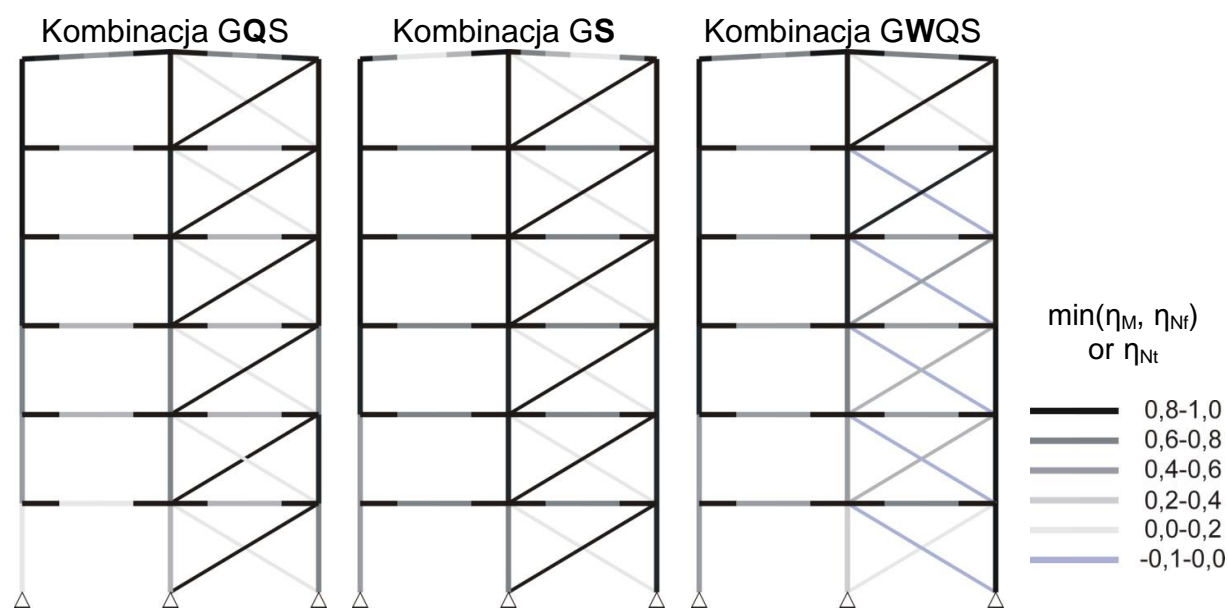
Zaproponowany sposób postępowania zilustrowałam przykładem kratownicy Misesa, obciążonej siłą pionową i/lub poziomą w celu pokazania różnic między modelowaniem konstrukcji za pomocą zaawansowanej metody RPH (w wersji CRC i LRFD) oraz proponowanej metody CSD (dla elementów kratownicy wykonanych z kątowników połączonych z konstrukcją za pomocą spoin lub śrub).

Ocenę stanów granicznych wg zaproponowanego algorytmu postępowania przeprowadziłam dla ramy (Rys. 8), która była przedmiotem ekspertyzy technicznej wykonywanej na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej (rama A-CS 1).



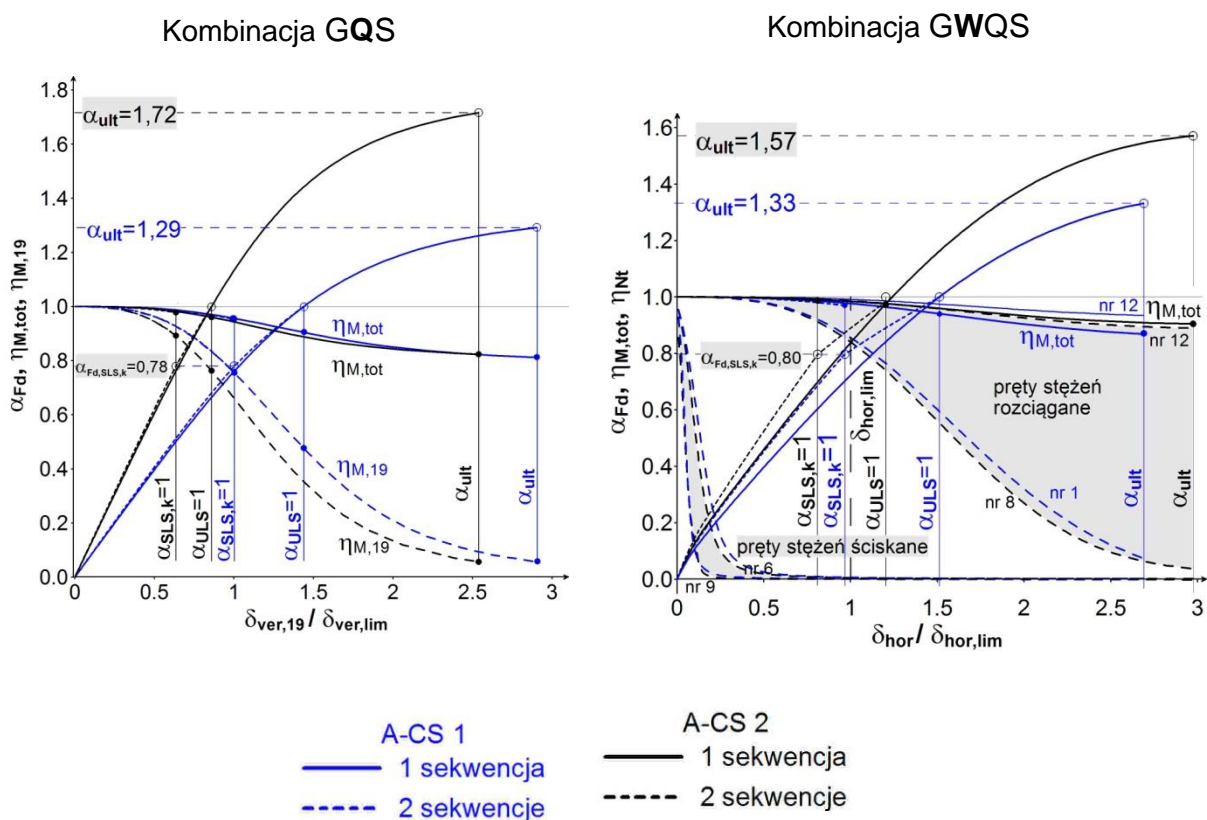
Rys. 8 Konstrukcja uwzględniona w obliczeniach stanów granicznych

Rygle ramy połączone są ze słupami przegubowo, stężenia zaś – wykonane z kątowników – mocowane śrubami do blach węzłowych. Uwzględniłam 13 kombinacji ULS, 9 kombinacji charakterystycznych SLS, 4 kombinacje częste SLS i 2 kombinacje quasi-stałe SLS. Wyniki obliczeń ramy A-CS 1 wskazały na kombinację **GS**: ULS – $1,35 \cdot 0,85 \cdot G_k + 1,5 \cdot S_k$ jako tę, w której mnożnik obciążenia α_{ult} jest najmniejszy, ale biorąc pod uwagę składniki obciążeń w kombinacji oraz fakt, że wartość tę otrzymano ze względu na zbyt dużą redukcję sztywności elementu w dwóch krokach przyrostowych o bardzo małej wartości przyrostu mnożnika obciążenia – można przyjąć, że ten stan graniczny związany jest z lokalnym wyczerpaniem nośności rygla dachowego. Trochę większy mnożnik α_{ult} otrzymano dla kombinacji **GQS**: ULS – $1,35 \cdot 0,85 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_k + 1,5 \cdot 0,5 \cdot S_k$ przy $\det \mathbf{K} = 0$, co oznacza, że rezerwa nośności dotyczy globalnego wyczerpania nośności, a więc jest bardziej pożądana. Obciążenie odpowiadające kombinacji charakterystycznej SLS (związanej z ww. kombinacją ULS) powoduje osiągnięcie kryterium stanu granicznego użyteczności przez rygle kondygnacji pośrednich. O maksymalnym przechyle decyduje kombinacja charakterystyczna **GWQS**: SLS – $G_k + W_k + 0,7 \cdot Q_k + 0,5 \cdot S_k$, stanowiąca pierwszą sekwencję obciążeń dla kombinacji ULS – $1,35 \cdot 0,85 \cdot G_k + 1,5 \cdot W_k + 1,5 \cdot 0,7 \cdot Q_k + 1,5 \cdot 0,5 \cdot S_k$. Program ECIDA pozwala uzyskać też wyniki dotyczące redukcji sztywności elementów. Ponieważ informacja ta pozwala zlokalizować najsłabsze fragmenty konstrukcji, na Rys. 9 pokazałam rozkład sztywności w elementach w chwili osiągnięcia stanu granicznego nośności w przypadku przytoczonych trzech kombinacji ULS. W kombinacji **GWQS** zwraca uwagę bardzo mała sztywność stężeń, nawet o wartości ujemnej w prętach ściskanych.



Rys. 9 η_M , η_{Nf} , η_{Nt} – sztywności: odpowiednio giętna i styczna elementów ramowych oraz styczna elementów kratowych

O ile porównanie sztywności poszczególnych elementów ramy nie następuje większych trudności, o tyle trudno jest zdefiniować wskaźnik redukcji sztywności całego układu konstrukcyjnego, który byłby miarodajny podczas porównywania sztywności konstrukcji przy różnych kombinacjach obciążeń, czy też porównania sztywności różnych konstrukcji. W artykule podano kilka propozycji takich globalnych wskaźników i jeden z nich wykorzystano do ilustracji redukcji sztywności ramy z węzłami przegubowymi (rama A). Podobne obliczenia przeprowadzono dla ramy A wzmocnionej (A-CS 2). Wyniki przedstawiono na Rys. 10 w postaci globalnej odpowiedzi ramowej zarówno na poziomie granicznym nośności, jak i na poziomie granicznym użyteczności oraz globalnego współczynnika redukcji sztywności giętej, a także w formie lokalnych odpowiedzi elementów ramowych i stężeń.



Rys. 10 Ścieżki równowagi i globalny współczynnik redukcji sztywności giętej ramy A oraz lokalne odpowiedzi elementu ramowego nr 19 i stężeń nr 1, 6, 8, 9, 12

Inną ilustracją zastosowania programu ECIDA jest porównanie zachowania się ram o różnych węzłach słup – rygiel. Do porównań przyjęto oryginalną ramę (bez wzmocnień A-CS 1) zwaną teraz ramą A, taką samą ramę, ale z węzłami podatnymi (zwaną B) i ramę z węzłami sztywnymi (C). Uzyskane wyniki potwierdziły przydatność programu ECIDA do oceny bezpieczeństwa stężonych konstrukcji ramowych o różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych węzłów (różnych charakterystykach podatnościowych węzłów ramowych).

Podsumowanie

Za najważniejsze osiągnięcia naukowe prezentowanego cyklu publikacji powiązanych tematycznie pt.: **Degradacja sztywności elementów prętowych z kątownika w analizie zaawansowanej CSD stężonych ram płaskich**, stanowiące mój wkład w rozwój dyscypliny, uważam:

- wykazanie, że podejście analityczne oparte na metodzie hipotez statystycznych Murzewskiego, zastosowanej we wcześniejszych opracowaniach do rekonstrukcji normowych krzywych wyboczeniowych oraz budowy charakterystyk siła – zbliżenie końców elementu ściskanego osiowo, może być rozszerzone na elementy z kątownika zamocowanego na końcach mimośrodowo;
- wykazanie, że charakterystyki siły oraz zbliżenia końców pręta stężenia z kątowników z pojedynczym mimośrodem (połączenie spawane, symetryczne) i z przestrzennym mimośrodem (połączenie na śruby jednym ramieniem kątownika, asymetryczne) są zupełnie inne i proces kalibracji parametrów modelu trzeba prowadzić dla nich niezależnie. Badania zrealizowano dla jednego typu kątownika równoramiennego (jedna szerokość i grubość ramienia kątownika), ale o trzech różnych smukłościach. Aby postulować uogólniony zestaw parametrów modelu, obejmujących wszystkie rozmiary elementów, mimośrodów i smukłości, potrzebne są szersze badania doświadczalne i/lub symulacje numeryczne;
- wykazanie, że model analityczny zaproponowany do opisu charakterystyki siły i wzajemnego zbliżenia końców pręta jest w przypadku mimośrodowo połączonych kątowników bardzo użyteczny, ponieważ pozwala na dokładne odwzorowanie doświadczalnej charakterystyki, więc może być zaimplementowany do programu komputerowego, który wspomaga ocenę bezpieczeństwa stalowych szkieletów ramowych z wykorzystaniem zaawansowanej analizy i zgodnie z koncepcją stanów granicznych;
- dokonanie istotnych uzupełnień oraz ulepszeń w zaawansowanej analizie CSD w porównaniu z koncepcją analizy RPH opracowaną w Purdue University, odnoszących się zarówno do elementów ramowych, jak i – w szczególności – do kątowników kratowych stężeń pionowych szkieletowych ustrojów nośnych budynków;
- pozytywna walidacja opracowanej wersji zaawansowanej analizy i jej implementacji do programu komputerowego ECIDA na podstawie danych eksperymentalnych z autorskich badań laboratoryjnych przeprowadzonych w Politechnice Warszawskiej;
- wdrożenie opracowanej zaawansowanej analizy CSD w bezpośredniej ocenie bezpieczeństwa stalowych szkieletów nośnych (projektowanych lub będących w trakcie eksploatacji) na podstawie śledzenia ścieżki równowagi;

- uzyskanie nowych możliwości oceny stanów granicznych konstrukcji, gdyż oprócz oceny rezerwy nośności istnieje możliwość prześledzenia redukcji sztywności elementów konstrukcyjnych w stanach pośrednich na ścieżce równowagi pod wpływem oddziaływań kombinacji SLS i ULS. Ułatwia to proces decyzyjny dotyczący:
 - modyfikacji nośności elementów konstrukcji w trakcie kształtowania optymalnej struktury z uwagi na osiągnięcie punktu granicznego na ścieżce równowagi (w ULS),
 - optymalnej dystrybucji sztywności elementów konstrukcji z uwagi na osiągnięcie kryterium użyteczności (w SLS);
- wykazanie, że proces oceny konstrukcji szkieletu ramowego jest złożony i wymaga bardzo starannego monitorowania redukcji sztywności konstrukcji w miarę wzrostu mnożnika obciążenia, co wynika z redystrybucji sił wewnętrznych pod wpływem „osłabienia geometrycznego” prętów stężenia po osiągnięciu ich nośności na wyboczenie;
- wskazanie, że zaproponowane podejście CSD oraz program komputerowy ECIDA mają charakter badawczy; opracowanie przyjaznego oprogramowania z uwzględnieniem zaawansowanej analizy CSD byłoby bardzo pomocne w praktyce projektowej, mianowicie do symulacji złożonych procesów oceny bezpieczeństwa i użyteczności stalowych szkieletów nośnych budynków.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

a) Osiągnięcia naukowo-badawcze inne niż wskazane w rozdziale 4

Poza tematyką przedstawioną w poprzednim rozdziale interesowałam się innymi zagadnieniami z zakresu konstrukcji metalowych. Należały do nich:

- 1) zagadnienia związane z normalizacją projektowania,**
- 2) nośność i sztywność ram stalowych z węzłami podatnymi,**
- 3) stateczność elementów aluminiowych,**
- 4) nośność kształtowników profilowanych na zimno**

Ad. 1) Zainteresowanie zagadnieniami normalizacyjnymi wynikało w dużej mierze z wprowadzenia do normalizacji polskiej eurokodów. Interpretacja stosowanych w nich zapisów stanowiła w niektórych obszarach poważne wyzwanie, z którym próbowały się zmierzyć zespoły badawcze różnych uczelni technicznych w kraju.

Jestem współautorką monografii *Sztywność i nośność stalowych ram przechyłowych o węzłach podatnych* opracowanej pod kierunkiem prof. J. Bródki, w której twórczo rozszerzono zakres stosowania eurokodowych metod projektowania. Opracowałam rozdział 7. [Zał. 4 – II E 4] dotyczący zastosowania metody Merchanta-Rankine'a do

szacowania nośności ram o węzłach podatnych oraz byłam współautorką rozdziału 10. [Załącznik 4 – II E 5] zawierającego 3 przykłady obliczeniowe. Każdy z przykładów stanowił studium projektowe głównego układu nośnego konstrukcji stalowej, w której węzły rygle – słupy były podatne. Ramy hali magazynowej, trzykondygnacyjnego budynku biurowego i sześciokondygnacyjnego budynku mieszkalnego zaprojektowano w zakresie sprężystym, a następnie oceniono ich rezerwy nośności na podstawie obliczeń w zakresie sprężysto-plastycznym.

Jestem też współautorką monografii opracowanej pod kierunkiem prof. M. Giżejowskiego oraz prof. J. Ziółki, w której wraz z dr. Lucjanem Ślęczką wykonałam – zgodnie z procedurami zamieszczonymi w eurokodach – obliczenia kilku głównych układów nośnych. Były to trzy konstrukcje hal (dwie z dźwigarami pełnościennymi [Załącznik 4 – II E 1] i jedna z wiązaniem [Załącznik 4 – II E 2] oraz jedna konstrukcja budynku szkieletowego o węzłach podatnych [Załącznik 4 – II E 3].

Grono naukowców skupionych wokół prof. M. Giżejowskiego zajmowało się głównie różnymi aspektami analizy konstrukcji i weryfikacji stanów granicznych jej elementów. W obszarze moich zainteresowań były to zagadnienia związane z doбором stali, analizą globalną, statecznością elementów i układów konstrukcyjnych, węzłami podatnymi i stężeniami. Wynikiem tych prac jest cykl artykułów w czasopiśmie „Inżynieria i Budownictwo” [Załącznik 4 – II E: 9, 10, 11, 14, 18].

Ad. 2) W zasadzie po ukończeniu doktoratu dalsze pogłębianie wiedzy dotyczącej zachowania się elementu ściskanego odnosiło się nie, jak dotychczas, do kratownic przestrzennych, ale do układów ramowych, głównie z węzłami podatnymi. Wiązało się to z rozpoczęciem współpracy w zespole prof. M. Giżejowskiego i zaowocowało publikacjami dotyczącymi głównie metod analizy takich konstrukcji, w szczególności analiz zaawansowanych [Załącznik 4 – II E: 14, 16, 17]

Ad. 3) Do obszaru moich zainteresowań badawczych zaliczam też zagadnienia stateczności elementów oraz ustrojów ramowych, w które wpisuje się również szereg publikacji dotyczących elementów ze stopów aluminium [np. Załącznik 4 – II E: 19, 20]. Przedstawiono w nich zunifikowany sposób określania krzywych niestateczności miejscowej ścianek oraz krzywych niestateczności ogólnej aluminiowych prętów ściskanych. Do porównania krzywych wybożenia wykorzystano statystyki empiryczne. Przedstawione propozycje zostały zharmonizowane z normą EC 9 oraz z krajową normą projektowania konstrukcji stalowych PN-90/B-03200. Powstały one w kontekście wznowionych wówczas prac nad nowelizacją normy PN-64/B-03220.

Ad. 4) Na styku zainteresowań statecznością i normalizacją plasują się moje badania związane z projektowaniem konstrukcji z kształtowników profilowanych na zimno. Miały one

miejsce pod koniec XX wieku, a wynikające z nich sugestie zostały opublikowane w artykule zamieszczonym w „Inżynierii i Budownictwie” [Zał. 4 – II E 21]

b) Osiągnięcia naukowo-badawcze w obszarze nauk technicznych wg kryteriów z § 3 Rozporządzenia MNiSW

Podsumowanie osiągnięć naukowo-badawczych po uzyskaniu stopnia doktora właściwe dla obszaru nauk technicznych przedstawiłam zgodnie z kolejnością kryteriów zawartych w § 3 *Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 1 września 2011 r. w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego* (Dz. U. nr 196).

1) Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie JCR

Jestem współautorką 3 artykułów opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora w czasopismach znajdujących się w części A listy czasopism punktowanych MNiSW, ujętych w bazie Journal Citation Reports (JCR), w tym:

- 2 artykułów w czasopiśmie „Journal of Constructional Steel Research” (Elsevier)
- 1 artykułu w czasopiśmie „Journal of Civil Engineering and Management” (Taylor & Francis)

Wykaz publikacji zamieściłam w Załączniku 4 – II A.

2) Autorstwo zrealizowanego oryginalnego osiągnięcia projektowego, konstrukcyjnego lub technologicznego

Brak.

3) Udzielone patenty międzynarodowe lub krajowe

Brak.

4) Wzory użytkowe, które uzyskały ochronę i zostały wystawione na międzynarodowych targach

Brak.

c) Osiągnięcia naukowo-badawcze we wszystkich obszarach wiedzy wg kryteriów z § 4 Rozporządzenia MNiSW

Podsumowanie osiągnięć naukowo-badawczych po uzyskaniu stopnia doktora dotyczące wszystkich obszarów wiedzy przedstawiłam zgodnie z kolejnością kryteriów zawartych w § 4 *Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 1 września 2011 r. w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego* (Dz. U. nr 196).

1) Monografie, publikacje naukowe w czasopismach międzynarodowych lub krajowych innych niż znajdujące się w bazie JCR

Jestem współautorką 3 monografii (jednej o zasięgu międzynarodowym i dwóch o zasięgu krajowym).

Jestem autorką lub współautorką artykułów w czasopismach o zasięgu międzynarodowym i ogólnokrajowym, nieumieszczonych w bazie JCR, w tym:

- w czasopismach znajdujących się w części B listy czasopism punktowanych MNiSW:
 - 3 artykułów w czasopiśmie „Archive of Civil Engineering” (De Gruyter), (nie uwzględniając 3 artykułów wchodzących w skład habilitacyjnego osiągnięcia naukowego),
 - 9 artykułów w czasopiśmie „Inżynieria i Budownictwo”,
- w czasopismach o zasięgu międzynarodowym nie znajdujących się na listach czasopism punktowanych MNiSW:
 - 1 artykuł w czasopiśmie „Botswana Journal of Technology” (University of Botswana),
- w czasopismach o zasięgu krajowym, nie znajdujących się na listach czasopism punktowanych MNiSW:
 - 1 artykułu w czasopiśmie „Konstrukcje Stalowe” (PIKS),
 - 1 artykułu w „Zeszytach Naukowych Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska”,
 - 1 artykułu w „Zeszytach Naukowych Politechniki Gdańskiej. Budownictwo Lądowe”

Wykaz publikacji zamieściłam w Załączniku 4 – II E.

2) Dokumentacje prac badawczych i ekspertyz

Jestem autorką i współautorką 21 prac niepublikowanych. Prace te zawierały elementy badawcze i 15 z nich zostało udokumentowanych jako raporty z prac statutowych, 1 jako raport z grantu rektorskiego i 1 jako raport z grantu dziekańskiego. Tematyka tych prac dotyczyła obliczeń ram stężonych z węzłami podatnymi, modelowania zachowania się tężników w ramach stalowych, weryfikacji doświadczalnej zaproponowanych modeli pręta stężenia i stężonego układu ramowego oraz opracowania numerycznego zaawansowanej analizy CSD dla ram stężonych kątownikami. Cztery raporty dotyczyły projektów badawczych:

- 2 raporty z projektu Eureka/SEFIE "Steelbiz jako e-forum do wdrażania eurokodów dotyczących budownictwa stalowego" obejmujące 2 etapy zadania dotyczącego

zintegrowanego podejścia ciągłego w analizie i projektowaniu konstrukcji stalowych z uwzględnieniem nieliniowych charakterystyk elementów i połączeń;

- 2 raporty z projektu MONIT "Monitorowanie Stanu Technicznego Konstrukcji i Ocena jej Żywotności", obejmujące 2 zadania dotyczące identyfikacji i klasyfikacji obciążeń oraz programu symulacji numerycznych elementów i połączeń.

Wykaz niepublikowanych prac badawczych zamieściłam w Załączniku 4 – II F.

3) Sumaryczny *impact factor* publikacji naukowych według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania

Sumaryczny *impact factor* publikacji naukowych według listy JCR wynosi **1,364** (wg bazy Web of Science).

4) Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS)

Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science wynosi **11** (bez autocytowań). Liczba cytowanych prac (bez autocytowań) wynosi **6**. Prace były cytowane między innymi przez naukowców z Imperial College London, Politechniki w Mediolanie, Uniwersytetu Techniczno-Ekonomicznego w Budapeszcie, Federalnego Uniwersytetu w Minas Geras, sklasyfikowanych odpowiednio w 1., 3., 4. i 5. setce najlepszych szkół wyższych na świecie w sporządzonym w 2018 roku Academic Ranking of World Universities (ARWU). Jedna praca była cytowana przez pracowników Instytutu Pojazdów Szynowych „TABOR” [Zał. 4 – IV]

5) Index Hirscha opublikowanych publikacji według bazy Web of Science (WoS)

Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS) wynosi **2** [Zał. 4 – IV]

6) Kierowanie międzynarodowymi lub krajowymi projektami badawczymi lub udział w takich projektach

Brałam udział w 3 projektach badawczych. Były to:

- Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka: MONIT – Monitorowanie Stanu Technicznego Konstrukcji i Ocena Jej Żywotności, projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego, Politechnika Warszawska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN i Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego PAN, 2008-2012;
- Inicjatywa Eureka E! 3034 SEFIE: STEELBIZ jako E-forum do wdrażania Eurokodów dotyczących budownictwa stalowego, Instytut Techniki Budowlanej, 2004-2005;
- Investigations into the behaviour of compressed components of engineering structures with the postbuckling stiffness degradation effects taken into account, University of Botswana and Warsaw University of Technology, 2003.

7) Międzynarodowe lub krajowe nagrody za działalność naukową

Otrzymałam nagrody zespołowe JM Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia naukowe w latach 1989, 1999, 2005, 2006, 2007, 2013-2014.

W 2006 roku otrzymałam wyróżnienie zespołowe Ministra Transportu i Budownictwa za publikację pt. *Sztywność i nośność stalowych ram przechyłowych o węzłach podatnych* wydaną przez Oficynę Wydawniczą Politechniki Rzeszowskiej.

8) Wygłoszenie referatów na międzynarodowych lub krajowych konferencjach tematycznych

Po uzyskaniu stopnia doktora byłam autorką lub współautorką 35 referatów, które zostały wygłoszone na konferencjach międzynarodowych, w tym:

- 4 referaty na International Colloquium Stability and Ductility of Steel Structures (SDSS) w latach 1990 w Budapeszcie (Węgry), 1999 w Timisoarze (Rumunia), 2006 w Lizbonie (Portugalia) i w 2010 w Rio de Janerio (Brazylia),
- 3 referaty na European Conference on Steel and Composite Structures (Eurosteel) w latach 2005 w Maastricht (Holandia), 2011 Budapeszt (Węgry) i 2017 Kopenhaga (Dania),
- 3 referaty na Annual International Symposium of the IASS w latach 1989 w Madrycie (Hiszpania), 2002 w Warszawie i 2006 w Pekinie (Chiny),
- 3 referaty na International Conference *Modern Building materials, structures and techniques* w latach 1999, 2001 i 2004 w Wilnie (Litwa),
- 3 referaty na Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej *Konstrukcje Metalowe* w 2001 w Gdańsku i w 2006 roku w Rzeszowie
- 2 referaty na International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation (SEMC) w latach 2004 i 2013 w Cape Town (Południowa Afryka),
- 2 referaty na 20th Czech and Slovak National Conferene with International Participation *Steel Structures and Bridges 2003* w 2003 roku w Pradze (Czechy),

oraz po jednym referacie na konferencjach:

- 7th International Structural Engineering and Construction Conference (ISEC 7) w 2013 roku w Honolulu (Hawaje),
- 1st Australasia and South-East Asia Structural Engineering and Construction Conference w 2012 roku w Perth (Australia),
- SSRC Annual Technical Session and Meeting w 2006 roku w Baltimore (USA),
- Seminarium polsko-litewsko-ukraińskie w 2006 roku w Warszawie
- Australian Structural Engineering Conference w roku 2005 w Newcastle (Australia),
- International Conference on Civil Engineering (CE'2005) w 2005 roku w Jeglavie (Łotwa),
- International colloquium of Polish chapter IASS w 2005 roku w Warszawie,

A Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych w języku polskim

- International Conference on Advances in Structures - Steel, Concrete, Composite and aluminium w 2003 roku w Rotterdamie (Holandia),
- International Conference: Safety, Risk, and Reliability - Trends in Engineering w 2001 roku na Malcie,
- Międzynarodowe sympozjum *Węzły podatne w konstrukcjach metalowych i zespolonych* w 2000 roku w Warszawie,
- 8th Polish-Ukrainian Seminary w 2000 roku w Warszawie,
- International Conference *Structural Steel Developing Africa* w 1996 roku w Sandto (Południowa Afryka),
- Asian-Pacific Conference On Shell and Spatial Structure w 1996 roku w Pekinie (Chiny),
- Polish-Russian Symposium *Theoretical Basis of Civil Engineering* w 1994 roku w Warszawie,
- XVII Czech and Slovak International Conference on Steel Structures and Bridges w 1994 roku w Bratysławie (Słowacja)
- International Symposium *Theoretical Basis of Building* w 1993 roku w Moskwie (Rosja)

Na konferencjach krajowych zostało wygłoszonych 21 referatów, w tym:

- 8 referatów na Konferencjach Naukowych KILiW PAN oraz KN PZITB w Krynicy w latach 1994, 1997, 1999, 2001, 2004, 2006, 2007 i 2010,
- 7 referatów na Local seminar of IASS Polish chapter w latach 1999, 2006, 2007 i 2012 w Warszawie, 2001 we Wrocławiu, 2003 w Rzeszowie i 2004 w Częstochowie,
- 2 referaty na Konferencjach Naukowo-Technicznych *Aktualne problemy naukowo-badawcze budownictwa* w Olsztynie w latach 2000 (Łańsk) i 2003 (Kortowo),
- 2 referaty na Konferencjach Naukowych *Badanie nośności granicznej konstrukcji metalowych* we Wrocławiu w latach 1998 (Szklarska-Poręba) i 2001 (Karpacz).
- 1 referat na IX Konferencji Naukowej *Połączenia i węzły w Konstrukcjach Metalowych i Zespolonych* w 2008 roku w Rzeszowie - Bezmiechowej,
- 1 referat na Konferencji Naukowej *Zagadnienia stanów granicznych konstrukcji stalowych* w 2004 roku w Krakowie,

Wykaz referatów wygłoszonych na konferencjach zamieściłam w Załączniku 4 – II L w odwrotnej kolejności chronologicznej.

9) Zestawienie monografii, artykułów i referatów

Szczegółowa lista wszystkich prac znajduje się w Załączniku 4 – II. Podsumowanie publikacji zamieściłam w poniższej tabeli.

Rodzaj publikacji	Ogółem	Opublikowane po uzyskaniu stopnia doktora
Artykuły w czasopismach znajdujących się w bazie JCR	3	3
Rozdziały w monografiach o zasięgu międzynarodowym	1	1
Rozdziały w monografiach o zasięgu krajowym	5	5
Artykuły w czasopismach międzynarodowych innych niż znajdujące się w bazie JCR	1	1
Artykuły w czasopismach krajowych innych niż znajdujące się w bazie JCR	19	18
Referaty na konferencjach międzynarodowych	39	35
Referaty na konferencjach krajowych	26	21
Razem	94	84

d) Omówienie działalności dydaktycznej i popularyzatorskiej oraz współpracy międzynarodowej po uzyskaniu stopnia doktora wg kryteriów z § 5 Rozporządzenia MNiSW

Omówienie działalności dydaktycznej i popularyzatorskiej oraz współpracy międzynarodowej po uzyskaniu stopnia doktora uszeregowałem zgodnie z kolejnością kryteriów zawartych w § 5 *Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 1 września 2011 r. w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego* (Dz. U. nr 196).

1) Uczestnictwo w programach europejskich i innych programach międzynarodowych lub krajowych

Brak.

2) Udział w międzynarodowych lub krajowych konferencjach naukowych lub udział w komitetach organizacyjnych tych konferencji

Od 2011 roku jestem członkiem "Stałego Komitetu Organizacyjnego IASS-PC" wchodzącego corocznie w skład komitetów organizacyjnych seminariów LSCE – Lightweight Structures in Civil Engineering.

Jestem współautorką referatu zamówionego na sesję plenarną [Zał. 4 – II L 14] międzynarodowej konferencji „Konstrukcje Metalowe” (ICMS2006).

Współprowadziłam sesję p.t. *Towers and Masts* na corocznym międzynarodowym sympozjum International Association for Shell and Spatial Structures – IASS 2002 w Warszawie.

Jestem współredaktorką monografii konferencyjnej międzynarodowego sympozjum „Węzły podatne w konstrukcjach metalowych i zespolonych” [Załącznik 4 – III B 2 I, które odbyło się w 2000 roku w Warszawie.

3) Otrzymane nagrody i wyróżnienia

Dwukrotnie otrzymałam nagrodę zespołową JM Rektora PW za osiągnięcia dydaktyczne: 2005/2006, 2008/2009.

4) Udział w konsorcjach i sieciach badawczych

Brak.

5) Kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z naukowcami z innych ośrodków polskich i zagranicznych, a w przypadku badań stosowanych we współpracy z przedsiębiorcami

Brak.

6) Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism

Brak.

7) Członkostwo w międzynarodowych lub krajowych organizacjach i towarzystwach naukowych

Od 2007 r. jestem członkiem z wyboru Sekcji Konstrukcji Metalowych Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN (powołanie na kadencję 2007-2010, 2011-2015, 2016-2020)

Od 2009 r. jestem przedstawicielem grupy Poland 2 w International Association for Shell and Spatial Structures. Wcześniej byłam członkiem tej grupy.

8) Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki

Prowadziłam zajęcia dydaktyczne z kursów „Konstrukcje metalowe” na studiach I stopnia (ćwiczenia projektowe) i II stopnia (wykłady, ćwiczenia projektowe). W tych ostatnich miałam możliwość wykorzystania moich zainteresowań badawczych w obszarze konstrukcji z elementów profilowanych na zimno, konstrukcji aluminiowych i konstrukcji z węzłami podatnymi w przygotowaniu programów i materiałów dydaktycznych.

Byłam opiekunem 114 prac dyplomowych, w tym 86 prac inżynierskich i 28 prac magisterskich.

Dwie prace dyplomowe, jedna inżynierska i jedna magisterska, otrzymały wyróżnienia Ministra Budownictwa. Ich wykaz zamieściłam w Załączniku 4 – III D

Napisałam ponad 40 recenzji prac dyplomowych.

W zakresie popularyzacji nauki wskazać mogę współautorstwo sprawozdania z Międzynarodowego Sympozjum „Węzły podatne w konstrukcjach metalowych i zespolonych” w czasopiśmie „Inżynieria i Budownictwo” i autorstwo sprawozdania z konferencji w Krynicy zamieszczonego w czasopiśmie „Konstrukcje Stalowe” oraz z Konferencji „Structural steel developing Africa” w „Inżynierii i Budownictwie”.

Wykaz tych sprawozdań zamieściłam w Załączniku 4 - III I

9) Opieka naukowa nad studentami

Brak.

10) Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego

Brak.

11) Staże w zagranicznych lub krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich

Odbyłam kilka kursów zaawansowanego szkolenia zawodowego w International Centre for Mechanical Sciences (CISM) z siedzibą w Udine (Włochy).

Wykaz kursów zamieściłam w Załączniku 4 – III L.

12) Wykonanie ekspertyz lub innych opracowań na zamówienie organów władzy publicznej, samorządu terytorialnego, podmiotów realizujących zadania publiczne lub przedsiębiorców

Brak.

13) Udział w zespołach eksperckich

Brak.

14) Recenzowanie projektów międzynarodowych lub krajowych oraz publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych

Recenzowałam publikacje w Archive of Civil Engineering (De Gruyter).

15) Inne osiągnięcia

W 2010 r. otrzymałam Medal Złoty za Długoletnią Służbę.

**B. Summary report of author's research work
and scientific achievements – English version**

Table of contents

1. First name and surname	38
2. Diplomas and academic degrees	38
3. Employment in research units	38
4. Indication of achievement resulting from Article 16 para. 2 of the Act of 14 March 2003 on Academic Degrees and Titles and on Degrees and Title in the Art (Journal of Laws 2017 item 1789)	38
a) Scientific achievement title	38
b) Thematically related publications included in the scientific achievement	38
c) Overview of the scientific purpose in submitted publications and their main result.....	39
5. Overview of other research and scientific achievements	59
a) Scientific achievements other than presented in chapter 4	59
b) Scientific achievements in the field of technical sciences as per criteria set in § 3 of the Regulation of the Minister of Science and Higher Education.....	61
c) Scientific achievements in all areas of knowledge as per criteria set in § 4 of the Regulation of the Minister of Science and Higher Education.....	61
d) Discussing didactic and popularizing activities as well as international cooperation after obtaining the doctoral degree as per criteria set in § 5 of the Regulation of the Minister of Science and Higher Education.....	66

1. First name and surname

Anna Barszcz

2. Diplomas and academic degrees:

- Master of Science, Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering, 1977,
- Doctor of Technical Sciences in civil engineering, Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering, 1989. Thesis title: *Load carrying capacity of space deck member accounted for shakedown effects.*

3. Employment in research units:

- from 1977.11.01 to 1978.09.30 - junior assistant, Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering,
- from 1978.10.01 to 1980.09.30 - assistant professor, Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering,
- from 1980.10.01 to 1989.09.30 - senior assistant/lecturer?, Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering,
- from 1988.08.01 to 1989.01.31 - work practice in COBPKM Mostostal, Warsaw, Krucza 20/22
- from 1989.10.01 - associate professor, Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering.

4. Indication of achievement resulting from Article 16 para. 2 of the Act of 14 March 2016 on Academic Degrees and Titles and on Degrees and Title in the Art (Journal of Laws 2017 item 1789):

a) Scientific achievement title

The basis for applying for the DSc degree is a series of thematically related publications, entitled **Stiffness degradation of angle bar elements in advanced analysis CSD of braced plane frames.**

b) Thematically related publications included in the scientific achievement

The scientific achievement consists of **3** self-authored articles, which are a series of thematically related publications, published in journal *Archives of Civil Engineering*, in 2014-2018. I listed these articles in chronological order below, with bibliographic data:

- 1) Barszcz A. M., 2014, **Experimentally assisted modelling of the behaviour of steel angle brace**, Archives of Civil Engineering, vol. 60 (1), pp. 3-39.
- 2) Barszcz A. M., 2018, **Validation of CSD advanced analysis of braced frame responses using subframe experimental investigations**, Archive of Civil Engineering, vol. 64 (2), pp. 111-146.
- 3) Barszcz A. M., 2018, **Direct design and assessment of the limit states of steel planar frames using CSD advanced analysis**, Archives of Civil Engineering, vol. 64 (4), [39 pages, status potwierdzony przez wydawcę: w druku].

Copies of articles constituting a series of thematically related publications I have included in Appendix 5.

c) Overview of the scientific purpose in submitted publications and their main result

Introduction

Static analysis and limit state design of steel structures are computer-aided processes in a current engineering practice. Software packages often provide a two stage approach to design. In the first stage the structure is subject to an elastic first order analysis and a verification of ultimate and serviceability limit states, although nowadays more frequently a second-order analysis is applied with a consideration of semi-rigid joints but with omission of any effects of imperfections and incremental tracking of equilibrium path of structures. The effects of imperfections are considered in the second stage during verification of buckling capacity of elements i.e. structural members and joints.

The traditional design approach provides safe but not necessarily economical solutions due to the fact that the design based on limit states does not relate to the actual ultimate load applied to the structure in the ultimate limit state. The ultimate load can be derived from an advanced analysis, which takes into consideration all the most important factors influencing behaviour of the structure under increasing load such as: geometrical and material nonlinearities, flexibility of joints, geometrical and material imperfections. It is achieved by gradual load increments and it allows following of the behaviour of the structure on the equilibrium path, first in an elastic range, then in an inelastic range until the limit state is reached when the structure is not capable to carry any more of the increasing load (i.e. until the limit point on the equilibrium path is reached), or the structure loses its ability to inelastic redistribution of internal forces due to a limited rotational capacity of either the member section or the joint. The design that applies advanced analysis allows referencing of the structure safety condition not to a single structural member, a bar element or a joint, but to a whole structural system.

Advanced analysis of structures can be carried out based on various initial assumptions and using various numerical algorithms. One of the methods is the analysis method alternative to those included in design standards, utilising the Continuous Stiffness Degradation (CSD) algorithm. Local imperfections, associated with an initial bow imperfection, non-uniform material and residual stresses are considered not in a substitute (equivalent) value of bar element bow but in a substitute (equivalent) flexural stiffness $(EI)_T$ and an axial stiffness $(EA)_T$.

Aspects regarding process of structure stiffness degradation have been the subject of my research interests since the beginning of my work carrier. During the work associated with doctorate thesis my studies concentrated on bar elements in space trusses subject to variable axial loads, modelled with an assumption of large displacements. In a linear-elastic range the bar was considered as ideal element with a constant stiffness. Once the ultimate (critical) load, in accordance with design standards, had been reached there was a degradation of the element stiffness to zero. It remained unchanged also in post-ultimate condition where relation of the force to the shortening of the bar axis is represented by a descending curve. Interaction the bar with the structural system, for the condition where its stiffness was zero, was modelled by consideration of re-active forces in the joints added to the vector of the applied external loads. Results of the research studies carried out during work associated with my doctorate thesis have been published in the article in Archives of Civil Engineering [Appendix 4 – II E 22] and have been presented at the conferences in Poland [Appendix 4 – II L 53] and abroad [Appendix 4 – II L: 51, 54, 55, 56].

Such approach allowed an approximate re-creation of the descending branch of the relation of the force to the relative displacement of the bar ends, but it did not allow modelling of continuous stiffness degradation. This issue became the subject of my further research studies, in context of analysis of braced, steel plane frames with semi-rigid joints. The algorithm of advanced analysis developed in Purdue University under direction of W. F. Chen and presented in publications issued jointly with his associates, subsequently modified and extended in the area of modelling of semi-rigid joints by M. A. Giżejowski was the starting point. In regard to stiffness degradation of frame elements, in a simple increment method of advanced structural analysis developed in Purdue University it was assumed that until 50% of the capacity of a frame bar or a truss bar insusceptible to local and distortional buckling (determined for plastic section) is reached, there is a constant reduction of stiffness due to geometrical imperfections and beyond 50% of the capacity:

- in case of a frame bar - there is a gradual reduction of the elastic stiffness modulus due to effect of residual stresses until the ultimate limit state due to increasing longitudinal force and bending moment is reached,
- in case of a truss bar - there is a gradual reduction of the elastic stiffness modulus due to effect of residual stresses until the ultimate capacity of the bar due to increasing longitudinal force is reached; in case of elements subject to compression the ultimate capacity is reached when the axial force reaches the ultimate value as per relevant buckling curve, however in case of elements subject to tension the ultimate capacity is reached when the most utilised section gets fully plastic.

In both cases above a stiffness degradation followed the same degradation function. In the proposed method of continuous stiffness degradation the assumption that degradation of the flexural stiffness and the axial stiffness of frame and truss elements follow the same function has been abandoned. Using method of statistical hypothesis by Murzewski, two numerical models, utilising adequately selected functions of equivalent stiffness, and representing the capacity and the stiffness of non-ideal elements have been defined:

- the Shanley's model of bifurcation (tangent modulus) of linear loss of equilibrium by non-elastic element to determine the tangent stiffness of a frame element,
- the divergency model (limit point on the equilibrium path) of non-linear loss of equilibrium by non-elastic element to determine the tangent stiffness of a truss element,

This stage of the research work has been documented, since 2000, with papers presented on number of conferences in Poland and abroad, in research studies reports and articles published in scientific journals. The theoretical results have been confronted with the results of the experimental testing of single angles (the project was carried out in cooperation of Warsaw University of Technology and University of Botswana in 2003 [Appendix. 4 – II L 21]. The final version that included a calibration of the model parameters so that the capacity of the elements matched the relevant buckling curves in PN-EN 1993-1-1 has been included in the article [Appendix 4 – II A 1].

The development of models of loss of equilibrium by elements has been driven by the will of improvement of advanced analysis of structural systems, which consist of elements of various cross-sections and various influence of imperfections on buckling capacity. My involvement in the research studies associated with analysis of steel structures, especially in the aspect of the stiffness degradation of their elements, has been documented in co-authored articles [Appendix 4 – II A: 2, 3, E: 12, 16, 18] and papers presented at conferences between 2003 and 2017.

For the purpose of the verification of the numerical models of bar elements under compression and the methods of structural analysis using the developed models I have carried out pilot experimental studies of frame brace elements. The review of the initial results from tests carried out in Laboratory of the Department of Metal Structures of the Faculty of Civil Engineering of the Warsaw University of Technology [Appendix 4 – II L: 8, 9, 10, 11] of on brace angle elements, has suggested the necessity of further extension of the previously developed theoretical model of a bar under axial compression, to account for cases of axially compressed elements subject to torsional and lateral-torsional buckling modes (different to Euler buckling modes) and elements compressed with an eccentricity, where eccentricity, either one-directional or bi-directional is the result of the specific connection detail in end element nodes.

I have undertaken research studies on the subject that have covered both theoretical and laboratory testing aspects. I have come up with a plan for further development of the divergent model that has included two typical end attachment details of the angle member, one where the angle member have been placed symmetrically in reference to gusset plates (and welded to the gusset plate) and the other where the angle member has been attached to gusset plates by bolting through one of its flanges. For those two arrangements I have developed and completed the programme of experimental studies, funded by the research grant [Appendix 4 – II F 11] and the statutory work [Appendix 4 – II F 10]. Following the validation of the proposed numerical models I have implemented those models in the computer program ECIDA (European Continuously Integrated Design Approach) that has been adjusted to facilitate an advanced CSD analysis.

Subject, purpose and scope of a series of publications related thematically

The subject of the series of publications related thematically are following results:

- modelling of stiffness degradation of angle brace member connected with the structure by welds or bolts,
- modelling of stiffness degradation of braced plane frames,
- implementation of the model in the computer program ECIDA developed for the purpose of advanced analysis of plane structures with semi-rigid joints,
- practical application of the developed computer program based on original numerical algorithm for assessment of safety of steel frame structures

An adequacy of the proposed analytical solutions and the computer program has been confirmed by validation of theoretical models, based on the results from the experimental testing of the braced steel frame, where the behaviour of the brace element as well as the structural system comprising of frame elements and a truss element has been investigated. Experimental testing has been carried out on 19 no. of sub-frames. Test results have been

used to validate analytical formulas describing behaviour of the brace element and also numerical equilibrium paths braced sub-frames. The proposed method of the analysis has been also used in calculations of a truss structure and a multi-storey braced frames.

The general purpose of the series of publications related thematically is presentation of the developed advanced CSD analysis, in which the divergent model of non-linear loss of equilibrium by truss angle elements with various types of attachment resulting in certain cases in eccentric application of the compressive force is considered.

The specific objective of the analysis, modelling and research studies undertaken included the following:

- determination of force-displacement and stiffness-displacement relations of a single brace angle element under a single compressive load with consideration of type of the end connections on these relations,
- validation and calibration of the selected parameters of the prepared analytical model based on results of experimental testing on frames with brace angle elements attached by "fork" welds and by bolting through the angle flange,
- modification of the computer program ECIDA (European Continuously Integrated Design Approach) in scope of the truss element response to the applied load, with consideration of its behaviour under tension and compression, including post-buckling stage,
- validation of the prepared numerical model of braced frame structures based on equilibrium paths derived from experimental testing of frame structures with a brace angle element,
- proposal of the algorithm for assessment of safety of steel frame structures that applies CSD analysis in planar structural systems and performs verification of ultimate and serviceability limit states in same analysis run,
- application of the proposed algorithm in verification of limit states of the actual frame structure.

In the first publication of the serie [Appendix 5 – 1] I have determined the relation of force to shortening of a distance between element ends for a single brace angle element under a single compressive load. I have presented my involvement in development, supported by experimental testing, of analytical models defining an equilibrium path of a brace element under compression. The model of brace angle element I have prepared with consideration of an influence of types of end attachments with the main frame on force-displacement relation. I have reviewed two different types of attachments, both common in engineering practice, one with symmetrical welds and the other with bolting through the

angle flange. In case of the equal angle I have considered the eccentricity of the load within the plane of the symmetry of the section, while in the other case - the eccentricity in directions defined by principle axes. I have provided detailed description of the experimental testing of a sub-frame brace element made of equal angle. I have presented the outcome of the testing and I have used the results to validate the prepared analytical model of the bar element behaviour.

The second publication of the serie [Appendix 5 – 2] is about advance CSD analysis of braced skeletal steel structures. Vertical brace members consist of truss elements connected to frame elements. The modelling technique is based on the concept of gradual stiffness degradation of frame and truss elements. The innovative approach describe in the article is based on introduction of a response of the brace element, which is treated as a non-ideal within entire range of its behaviour under tension and compression, including the range of declining curve of relation of axial force to relative displacement of elements end towards each other once the buckling capacity is reached. Validation of the proposed advanced analysis is carried out for the frame sub-system consisting of I-beams forming the main frame and the brace element made of rolled angle section, for which the validation of force-displacement relation has been described in the first publication of the serie [Appendix 5 – 1]. I have included a brief overview of proposals for analysis steel frame structures with justification of the selection of the advanced CSD analysis and description its differences in comparison to the advanced analysis developed in Purdue University, so called refined plastic hinge (RPH) analysis. I have included analytical equations to calculate coefficients of stiffness reduction and I have presented in graphs the variability of coefficients due to loading of frame elements by a bending moment and an axial force and due to loading of truss elements by a longitudinal force only. I have briefly discussed the experimental testing braced sub-systems (braced portal frames in this case), which had been described in details in earlier publications, including the first publication of the serie [Appendix 5 – 1]. I have included results of the experimental testing in form of equilibrium paths of tested frames $F-\delta_F$ with indicated limit points and other characteristic points, in which the buckling capacity of the brace element of the frame has been reached. The results I have used to validate the prepared numerical model of braced frames. I have compared the equilibrium path curves in regard to stiffness and capacity of systems and I have presented progress of the stiffness degradation of the brace bar element and the most loaded rafter element of the frame. I have compared derived by numerical analysis and by testing the force-displacement relations and the coefficients of the stiffness reduction in function of a longitudinal deformation of the brace bar element.

The third publication of the serie [Appendix 5 – 3] refers to the developed algorithm for validation of ultimate states in design of new structures as well as in assessment of existing structures based on the advanced CSD analysis - the version used before for validation of the model as described in the second publication of the serie [Appendix 5 – 2]. I have presented a brief overview of the current status of the research studies in that area and my own involvement in the development of direct method of design and assessment of steel structures using the advanced CSD analysis, which is considered the most accurate representation of the actual behaviour of steel skeleton structures. I have proposed a scheme for validation of limit states using the CSD analysis for planar structural systems, with consideration of validation of both ultimate and serviceability limit states in a single analysis run. In order to show differences in modelling between the advanced method of refined plastic hinge (RPH) and the proposed method of Continuous Stiffness Degradation (CSD) I have utilised von Misses truss, sensitive to large displacement. This example shows differences between both analytical methods in case where truss elements consist of angles connected to the structure either by welds or by bolts. The main objective of the article, the assessment of safety using CSD analysis, I have illustrated by an example of practical application of the proposed algorithm for validation of ultimate and serviceability limit states (ULS and SLS) of the multi-storey braced frame structure. Detailed considerations have been given to the actual structure with nominally pinned beam-column joints that has been subject to the experimental testing carried out in Faculty of Civil Engineering of Warsaw University of Technology. The structure has been considered first in its initial form, and subsequently in a modified form, where some of the structure elements have been strengthened after some period of the structure service life when the function of the building has changed and the structure ceased to comply with capacity criterion defined in revised version of design standards. I have presented the results of the frame structure analysis and also effects of the strengthening of the frame elements and I have compared those both design situations. I have also analysed same geometry of the frame but with consideration of semi-rigid and nominally rigid beam-column joints. I have compared utilisation ratios of the ultimate capacity and limiting displacements and also the effect of different progress of the stiffness degradation of structural elements on the capacity and the stiffness of the frame structure as a whole. I have presented the benefit of the proposed approach in verification of limit states of the existing structure and more generally in design of steel frame structures.

Overview of the achieved results

In accordance with the assumed plan I undertook research studies both in theoretical and experimental areas. I started with introduction of a non-linear relation describing

utilisation of a bar element in accordance with 2nd order theory in case of bars subject to an eccentric compression in pre-critical stage. The first proposals, in 2008-2010, were focused on attempts to simplify these relations, however the conference papers from 2011-2013 presented more accurate analytical solutions. The studies regarding this aspect I concluded with the model presented in the article [Appendix 5 – 1]. For the purpose of the description of behaviour of elements subject to eccentric compression I applied, similarly to the previous studies, the modelling based on Murzewski-Rankine-Merchant (M-R-M) approach. I assumed the following equation for dimensional stress:

$$\bar{\sigma} = \left(\bar{\sigma}_E^{-n} + \sum_{j \leq 2} \bar{\sigma}_{bif,j}^{-n} + \bar{\sigma}_{har}^{-n} + \bar{\sigma}_{ult}^{-n} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

- $\bar{\sigma}_E$ represents the (non-dimensional) stress before the axial force reaches its critical value and for an eccentric load it is calculated in accordance with 2nd order theory. In case of compression in the plane containing principal axis the calculation of this component of the equation is carried out by determination of positive real roots of a 3rd degree equation, which is achievable by analytical means, however in case of compression with consideration of both principal axes the equation is of a 5th degree and the roots have to be sought either numerically or an approximate roots can be found by reducing the degree of the equation. In the article I applied the latter approach.

The experimental testing of brace angle elements attached by a single flange indicated an additional reduction of the stiffness caused by torsion of the element connected to the gusset plate with bolts which I considered in the estimated parameter ψ that depends on the relation of the critical flexural buckling force to the critical tensional buckling force.

- $\bar{\sigma}_{bif,j}$ is the non-dimensional critical stress determined in accordance with the linear elastic equilibrium theory. It considers non-correlated modes of buckling, which number is determined by the index j ($j = 2$ for bisymmetrical sections, for which flexural and torsional buckling modes? are deterministically independent and also for mono-symmetrical sections, for which the buckling in the plane of the symmetry and the flexural-torsional buckling are independent, $j = 1$ for unsymmetrical section).
- $\bar{\sigma}_{har}$ is the component related to the mechanism of a plastic deformation of the 1st order in range of the material stiffening; this component was not subject to any modification at that stage of the research studies.

- $\bar{\sigma}_{ult}$ is the component related to the mechanism of a non-linear plastic deformation of the 2nd order; I proposed a modification of that component for angle elements attached by a single flange.

The first two components relate to mechanisms of elastic deformation and these are where the effects of the eccentric load application are in accounted for. The line charts of the equal angles with two different slendernesses and two different details of the attachment to the gusset plate as shown in the Fig. 1 are graphical representation of the Equation (1).

The eccentricity in the plane of symmetry results in a reduction of the capacity dependent on the value of the eccentricity only. The spatial eccentricity, in case of the stocky element, results in a substantial results in a reduction of the capacity, which is not observed in case of slender bar elements. There are other types of behaviour which are observed in the post-critical stage. These are the consequence of combined effects of a biaxial bending and a torsion that affect the bar element behaviour in elastic stage and plastic stage.

The line charts equivalent to those presented in the Fig.1 are the line charts of the stiffness degradation shown in Fig.2. These relations are calculated based on the following equation:

$$\bar{\kappa} = \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} = \left[\bar{\sigma}_E^{-n} + \sum_{j \leq 2} \bar{\sigma}_{bif,j}^{-n} + \bar{\sigma}_{har}^{-n} + \bar{\sigma}_{ult}^{-n} \right]^{-(1+n)/n} \left[\bar{\sigma}_E^{-n-1} \bar{\kappa}_E + \bar{\sigma}_{har}^{-n-1} \bar{\kappa}_{har} + \bar{\sigma}_{ult}^{-n-1} \bar{\kappa}_{ult} \right] \quad (2)$$

$$\text{gdzie: } \bar{\kappa}_E = \frac{d\bar{\sigma}_E}{d\bar{\varepsilon}}, \bar{\kappa}_{har} = \frac{d\bar{\sigma}_{har}}{d\bar{\varepsilon}}, \bar{\kappa}_{ult} = \frac{d\bar{\sigma}_{ult}}{d\bar{\varepsilon}}$$

The line charts shown in Fig. 1 and Fig. 2 take into consideration the effects of calibration of some of the parameters in the Equations (1) and (2). This element of the research studies needed to be confronted with the experimental testing of plane frame sub-systems shown in the Fig. 3. The testing included 19 no. of frames (9 with the brace element attached by welds, 10 with the brace element attached by bolts). For each type of the connection 3 different lengths L_b have been considered. The selection of the tested frame elements cross-sections have been conducted based on the following assumptions:

- the brace bar element would buckle before a plastic hinge would be formed in a frame node,
- connections of the brace bar element would be reflecting the typical connections details as used in steel structures,
- the capacity of the brace bar element connections would be equal or greater than the buckling capacity of the brace bar element.

The calibration has been carried out based on intermediate readings of the axial force (using tensometers) as well as direct measurements of the brace bar element end displacements.

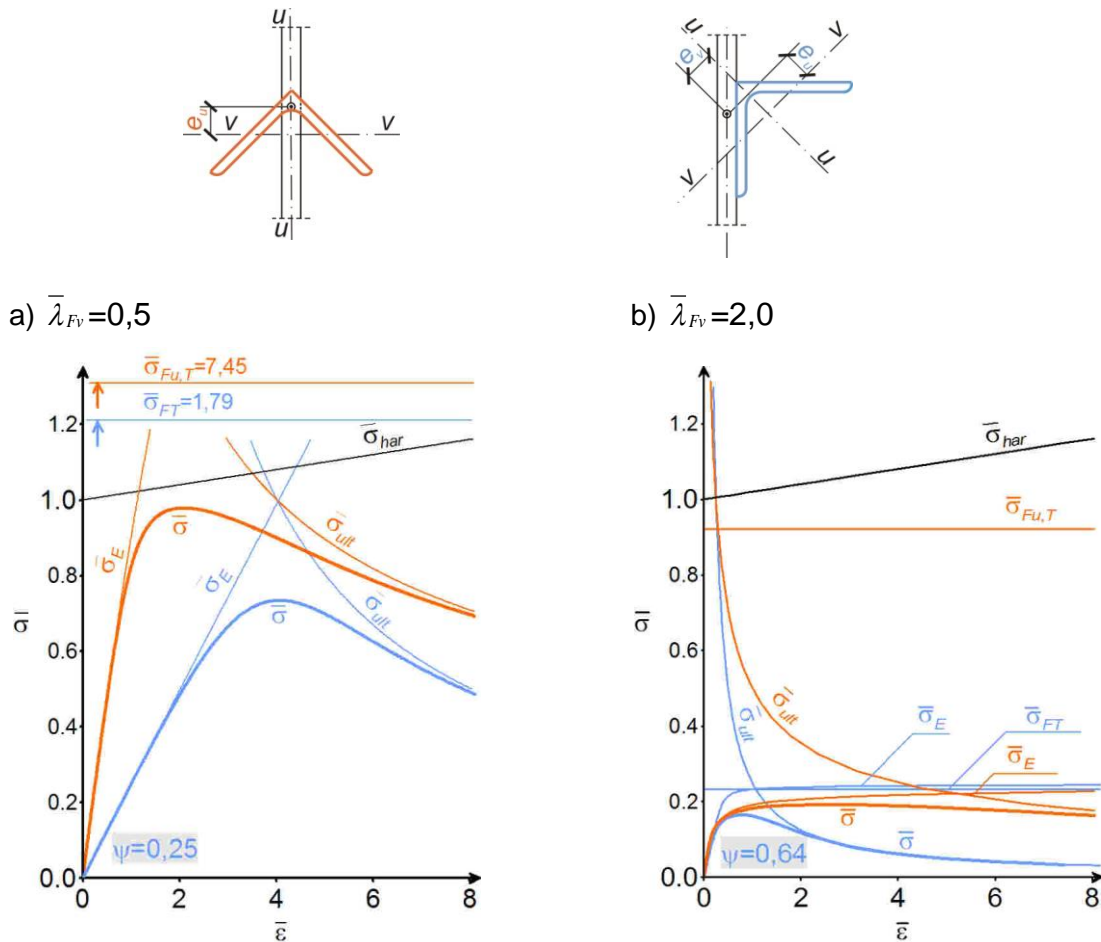


Fig. 1. Comparison of dimensionless deterministic and probabilistic force-deformation characteristics of angle brace: a) stocky angle, b) slender angle

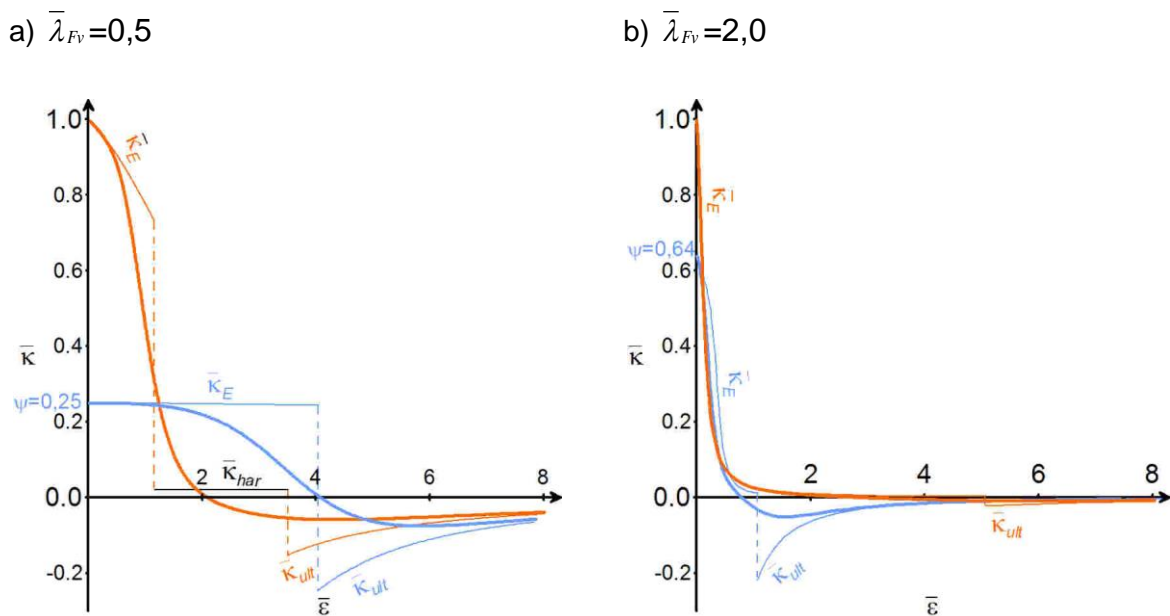


Fig. 2. Comparison of deterministic and probabilistic tangent axial stiffness of eccentrically connected brace corresponding to force-deformation characteristics from Fig. 1: a) stocky angle, b) slender angle.

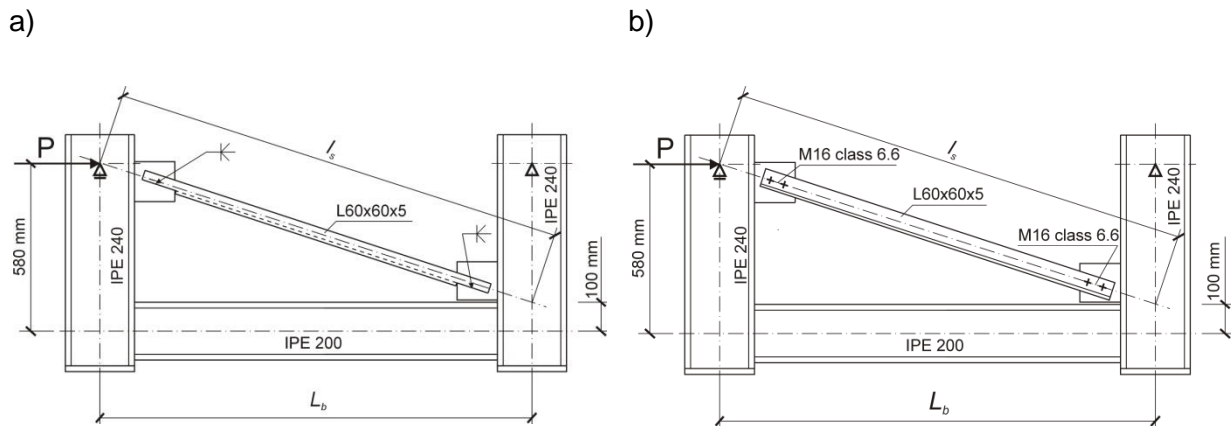


Fig. 3 Geometry of portal frame specimens (side view) a) group WL, b) group BL

As predicted, the experimental testing confirmed that there are fundamental differences between behaviour of brace bar elements with welded end connections (symmetrical connections with respect to the plane of the frame) and behaviour of brace bar elements with bolted end connections (asymmetrical connections with respect to the plane of the frame). The differences come not only from the connection types, but foremostly from the eccentric transfer of axial force and different effects of imperfections on both types of elements. It has been proved that the angle elements with bolted connections are "weaker" i.e. they have lower buckling capacity and the lower position of the relation stress-deformation than the one that the angle members with welded connection have. Due to that fact, I have decided that the calibration of analytical model parameters should have been carried out independently for each of the groups of brace bar elements.

The calibration has been carried out mainly for the following parameters: n - equivalent imperfection parameter ($n = 5$ for welded angle elements and $n = 3,5$ for bolted angle elements), buckling length coefficient (as reduced for brace elements attached symmetrically), coefficient of initial stiffness reduction ψ (equal to 1 in case of brace elements with symmetrical welded connections) and two parameters a_u and m responsible for the curve shape of the relation between the axial force and the shortening of relative distance between the brace bar elements ends when plastic zones start to form once the buckling capacity is reached.

In case of angle elements with welded connections, the brace element has been placed symmetrically in reference to the plane of the frame, hence the gusset place's torsional stiffness was high and the buckling length was closer to the theoretical value for element fully fixed at both ends ($\mu = 0,5$). In case of angle elements with bolted connections, the brace element tended to rotate (deformation out of the plane of the frame), as the gusset plate had a much lower torsional stiffness and the buckling length appeared to be closer to the theoretical value for an element nominally pinned at both ends ($\mu = 1,0$).

I compared relations of axial force to relative shortening of distance between both ends of bar element, that were analytically modelled using aforementioned model parameters with the results of the experimental testing. I confirm that the proposed analytical function applied together with calibrated model parameters lead to sufficiently accurate description of behaviour of the brace truss element, for both welded and bolted angle elements. The example of such comparison is included in Fig. 4 for the frame, where the brace element has relative flexural slenderness of 1.05 (with the coefficient of the buckling length of 1.0). The area shaded in grey colour represents the envelope of the experimental testing results and the black line represents the analytical function. That stage of the research studies, regarding validation of behaviour of brace elements with different end connection details, I considered as concluded.

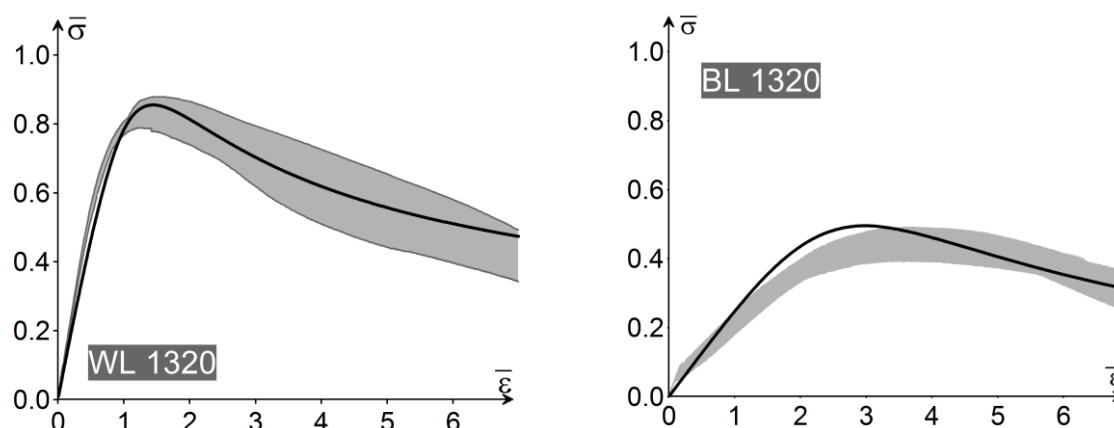


Fig. 4 Comparison of analytical force-deformation characteristic with experimental envelope of results

In 2010 in the article [Appendix 4 – II E 8] I presented results of the serie of experimental testing of braced frame sub-systems, and their comparison with analytical calculations carried out by Waela A. Salaha Khalila using computer program ABAQUS (shell modelling) was presented in the paper [Appendix 4 – II L 7].

For the purpose of verification and validation of the braced frame model using the developed model of brace truss element I required adequate tools such as a computer program that would be capable to run advanced CSD analysis. I used the experience of my previous involvement in the research studies of the project E!3034 of the Eureka/SEFIE “Steelbiz as an E-forum for the Development of Eurocodes for Steel Construction” program, coordinated by the Steel Construction Institute in United Kingdom and the Building Research Institute (in Poland) and funded by State Committee for Scientific Research, that related to advanced analysis using computer program ECIDA. For the purposes of the practical analysis I modified computer program ECIDA taking into consideration the developed model of brace bar element. In this program the main equilibrium equations of the CSD analysis are similar to the equations in RPH Refined Plastic Hinge) analysis as the assumption of a

concentrated plasticity (development of plastic hinges at the ends of elements) has been replaced by an approximate modelling of development of plastic zones from the element's ends (along its length). In the article [Appendix 5 – 2] I described the principle of the program operation, I presented the equilibrium equations with a particular consideration of stiffness submatrices of frame and truss elements. I modified the procedure for calculation of the stiffness of frame elements under compression in regard to reduction of the elasticity modulus due to geometric imperfections. I completely changed the procedure for calculation of stiffness of truss elements in accordance with the relations developed for angle elements.

The validation of the frame system I carried out based on a comparison of equilibrium paths derived by the experimental testing with those from the computer calculations. The measurements of the force F applied to the frame and the corresponding frame displacement (Fig. 5a) were used for that purpose. The division of the frame members in minimum number of finite elements was introduced once the lack of any influence of the finite element size on the analysis results had been confirmed.

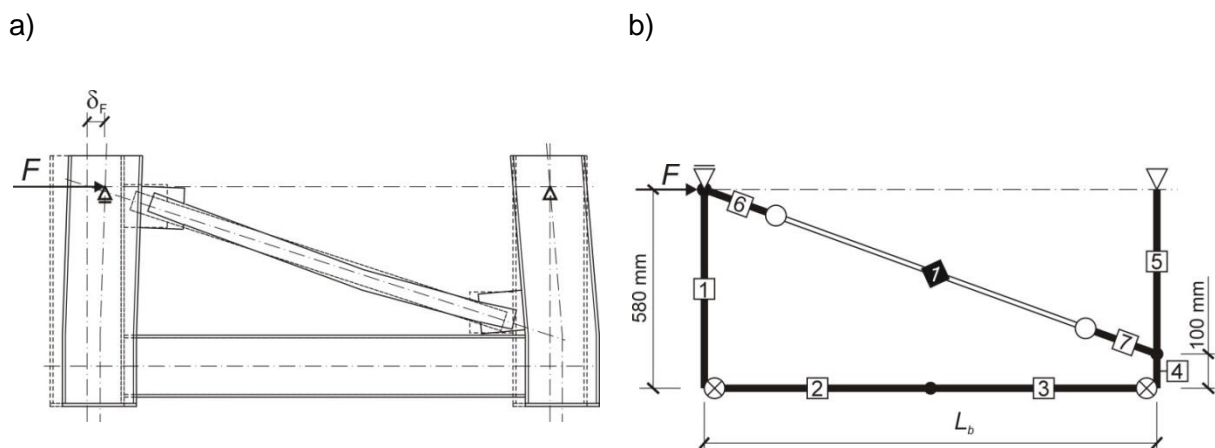


Fig. 5 Tested frame: a) schematic presentation load application and deformed position, b) numerical model.

In the Fig. 6, there are shown sample results of comparison carried out for frames, for which in the Fig. 4 experimental and analytical relations force-displacement of brace elements were compared. These are as follows:

- experimental and numerical relations of force and displacement of the loaded node of the frame $F-\delta_F$; the envelope of the experimental results is indicated in grey colour; circles represent the limit state of frames while triangles - the level of load applied that corresponds to the buckling capacity (zero stiffness) of the brace element;
- numerical functions of stiffness degradation η for element no. 3, in particular η_{N_i} , η_{M_i} , $\eta_{M_{k_i}}$ and for the brace element $\eta_{N_{i_3}}$; the element no.3 and its end connection nodes: the left "i" and the right "k", have been selected as the element end "k" is represent by the lowest values of the function of stiffness degradation;

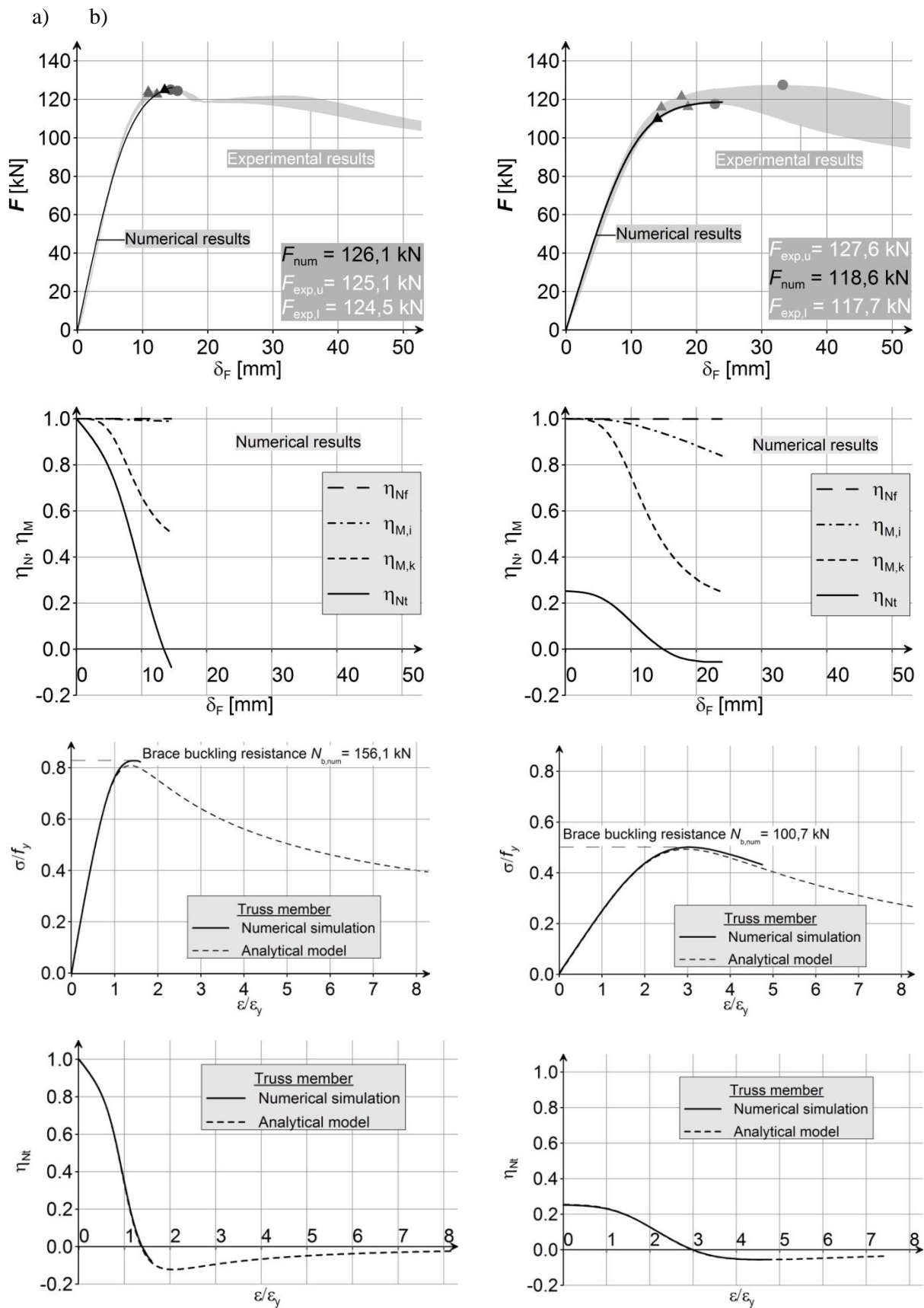


Fig. 6 Experimental vs. numerical and numerical vs. analytical results for the frame:
a) WL 1320, b) BL 1320

- numerical and analytical dimensionless relations deformation-stress (stress-deformation) of the brace element;
- numerical and analytical functions of axial stiffness degradation η_{Nt} of the brace element.

The comparative analysis indicates that the equilibrium paths derived numerically using advanced CSD analysis match well with the paths derived from the experimental testing both in relation to the initial stiffness and the capacity. The ultimate limit state of the frame is associated with the brace element exceeding the level of deformation that corresponds to its buckling capacity. Displacements of BL frames indicate that structural elements experience substantial plastic deformations. As a result, functions of stiffness degradation of frame elements in the ultimate limit state have low positive values, and in case of truss elements these values are even negative. Welded connections of the brace elements improve the stiffness of the frame, but reduce its ductility. As a result displacements of WL frames are lower than those of BL frames with same length of the brace element. The stiffness of frame elements when the ultimate limit state is reached, in the CSD analysis for WL frames has similar value or greater than for BL frames.

Results of this stage of research studies confirmed that the developed version of the advanced analysis of braced frames, where the declining relation of axial force to relative displacement of elements ends towards each other is considered, has functional aspects and it can be applied in a practical assessment of safety of steel structures. This is of type GMNIA i.e. it is capable to re-create the non-linear equilibrium path of skeleton structures in the way that represent most accurately their actual behaviour. It means, that the effects such as geometric, material and structural non-linearities, effects of geometric and material imperfections and also some non-linear behaviour of joints are correctly considered in a global assessment of the behaviour of braced frame structures subject to an increasing loading. Ultimately, the design approach based on such analysis allows following the equilibrium path of steel building structure, and also allows assessment of the critical point on the equilibrium path in cases of various design load combinations.

The conclusions above prompted me to propose the procedure for assessment of safety of steel structures with angle truss bars using, previously modified by me, computer program ECIDA. The third article [Appendix 5 – 3] in the schedule of my scientific publications had been dedicated to this aspect. The proposed algorithm for assessment of safety of steel frames I presented in the Fig. 7 for selected load combinations, that are required for verification of safety of structures in service and those in the design stage. Subject to requirements of a particular case, for each of the load combination one of the two calculation approaches for assessment of the equilibrium path and its critical point could be selected. Where the spare capacity of the structure is required to be determined, calculations need to

be carried out for one sequence of the loads from ULS combinations, until the critical point on the equilibrium path is reached, which can be demonstrated in few different ways:

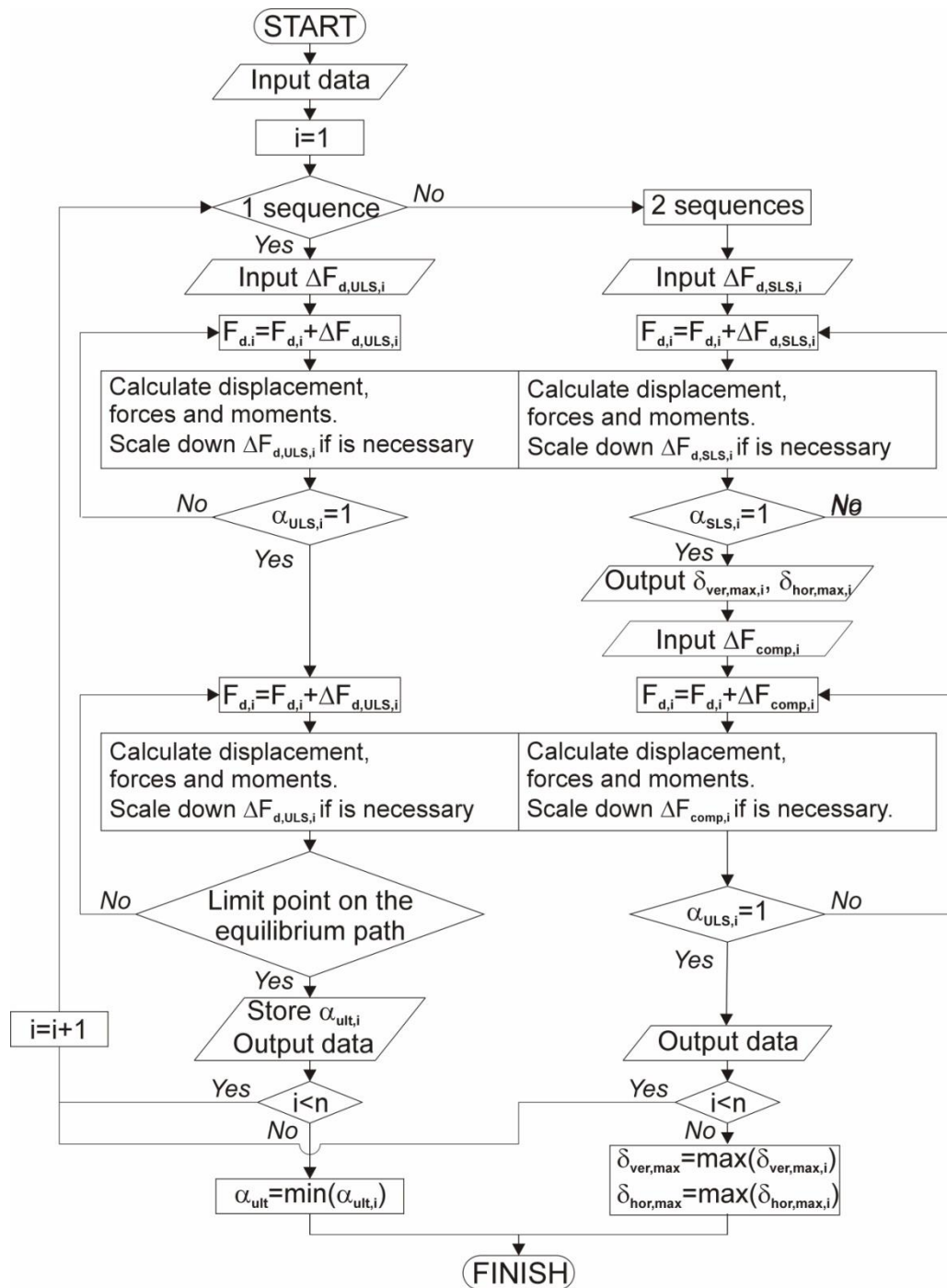


Fig. 7. Flow chart of structural assessment paths.

- negative value of the determinant of the stiffness matrix,
- reaching the plastic bending capacity, as reduced due to effect of co-existent axial force in the most utilised section of the frame element,
- exceedance of maximum deformation of the truss element,

- excessive difference in values of the capacity reduction coefficients in subsequent load application steps or due to lack of possibility to reach equilibrium in a subsequent, substantially reduced load application step.

In standard design practice, more convenient in application is the second numerical approach, where the maximum load in ULS combination is split into two sequences. The first one is relevant to the SLS combination corresponding to the selected ULS combination, the second sequence is based on the increase of the load $F_{d,SLS}$ to value of $F_{d,ULS}$. Values of displacements under the applied load $F_{d,SLS}$ ($\alpha_{SLS}=1$) are reliable and can be used for verification of the serviceability limit state, while reaching the applied load $F_{d,SLS}$ ($\alpha_{SLS}=1$) determines the ultimate capacity of the structure.

The proposed approach I illustrated in an example of the von Mises's truss loaded with a vertical force and/or a horizontal force, in order to show differences in modelling of structures using the advanced RPH method (in version CRC and LRFD) and the proposed CSD method (for truss angle elements connected with the structure by welds or bolts).

The verification of limit states in accordance with the proposed algorithm I carried out for the frame (Fig. 8), which was subject of the technical assessment undertaken in the Faculty of Civil Engineering of Warsaw University of Technology (frame A-CS 1).

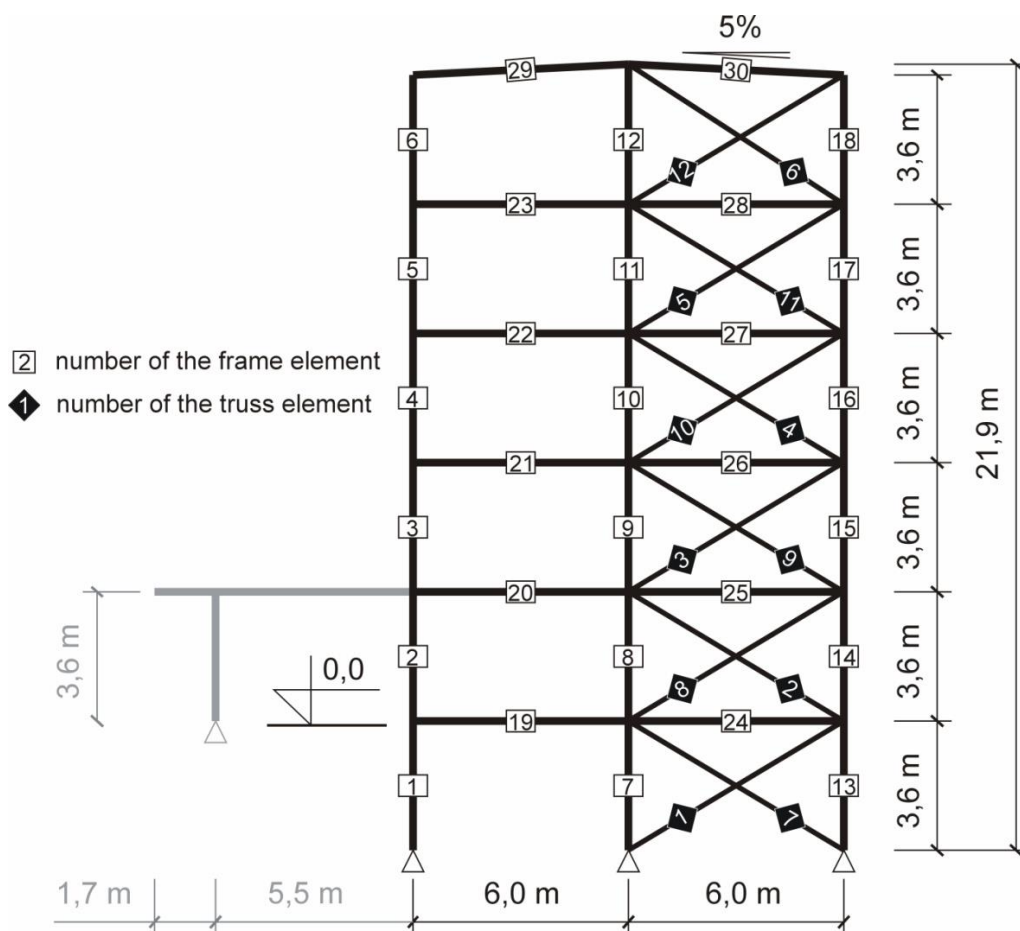


Fig. 8. Simple construction considered for the limit states calculations

Beam elements of the frame have pinned connections with column elements, and brace angle elements are attached to gusset plates with bolts. I considered 13 ULS combinations, 9 SLS characteristic combinations, 4 SLS frequent combinations and 2 SLS quasi-permanent combinations. The results of analysis of the frame A-CS 1 indicated the combination GS ULS - $1,35 \cdot 0,85 \cdot G_k + 1,5 \cdot S_k$ as the one, in which the load amplifier α_{ult} has the lowest value, however considering load components in that combination and the fact that this value had been obtained by too excessive stiffness reduction of the element in two increment steps with very low value of the load amplifier, it can be considered that the limit state is related to the complete use of the capacity of the roof beam (rafter). The slightly higher load amplifier α_{ult} has been obtained for the combination GQS: ULS - $1,35 \cdot 0,85 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_k + 1,5 \cdot 0,5 \cdot S_k$ with $\det \mathbf{K} = 0$, which means that the spare capacity relates to the global complete use of the capacity and as such is more desired (from design point of view). The load corresponding to the SLS characteristic combination (related to with the ULS combination mentioned above) results in the criterion of the serviceability limit state being reached by the beam elements of intermediate floors. The maximum sway of the structure is determined by the SLS characteristic combination GWQS: SLS - $G_k + W_k + 0,7 \cdot Q_k + 0,5 \cdot S_k$, which is the first load sequence for the ULS combination - $1,35 \cdot 0,85 \cdot G_k + 1,5 \cdot W_k + 1,5 \cdot 0,7 \cdot Q_k + 1,5 \cdot 0,5 \cdot S_k$. The computer program ECIDA allows to obtain results regarding the stiffness reduction of elements. Thanks to this information the weakest points in the structure can be localised, therefore in the Fig. 9 I presented the distribution of stiffness in elements at the point when the ultimate limit state is reached, for those 3 combinations mentioned above. In the combination GWQS particular attention brings very low stiffness of brace elements, which is even of negative value in case of the elements under compression.

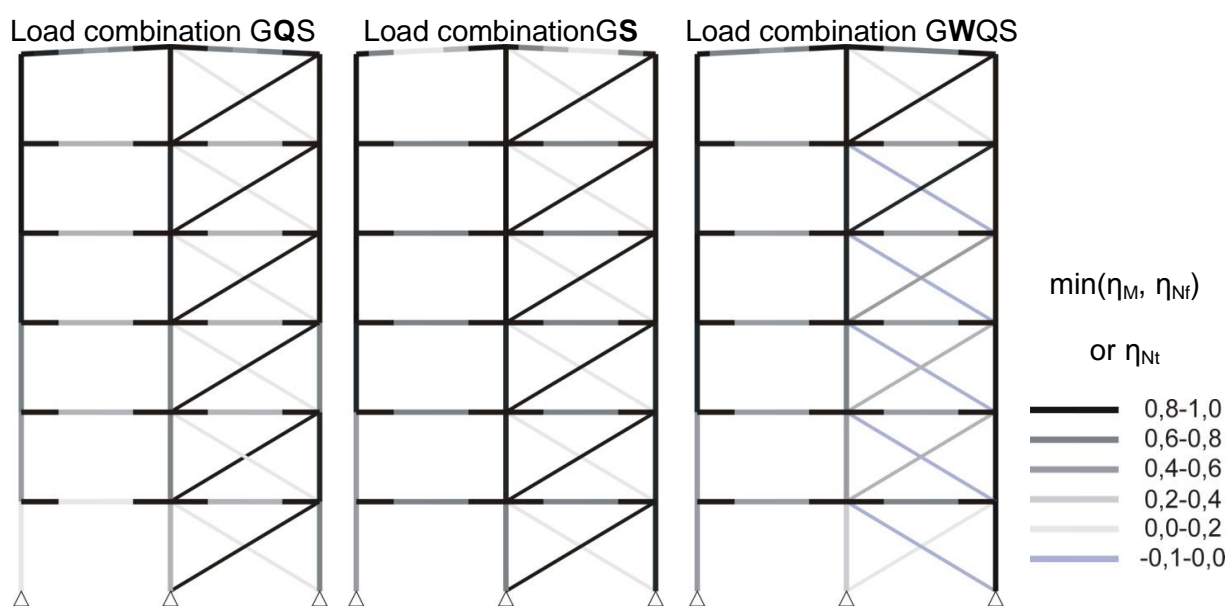
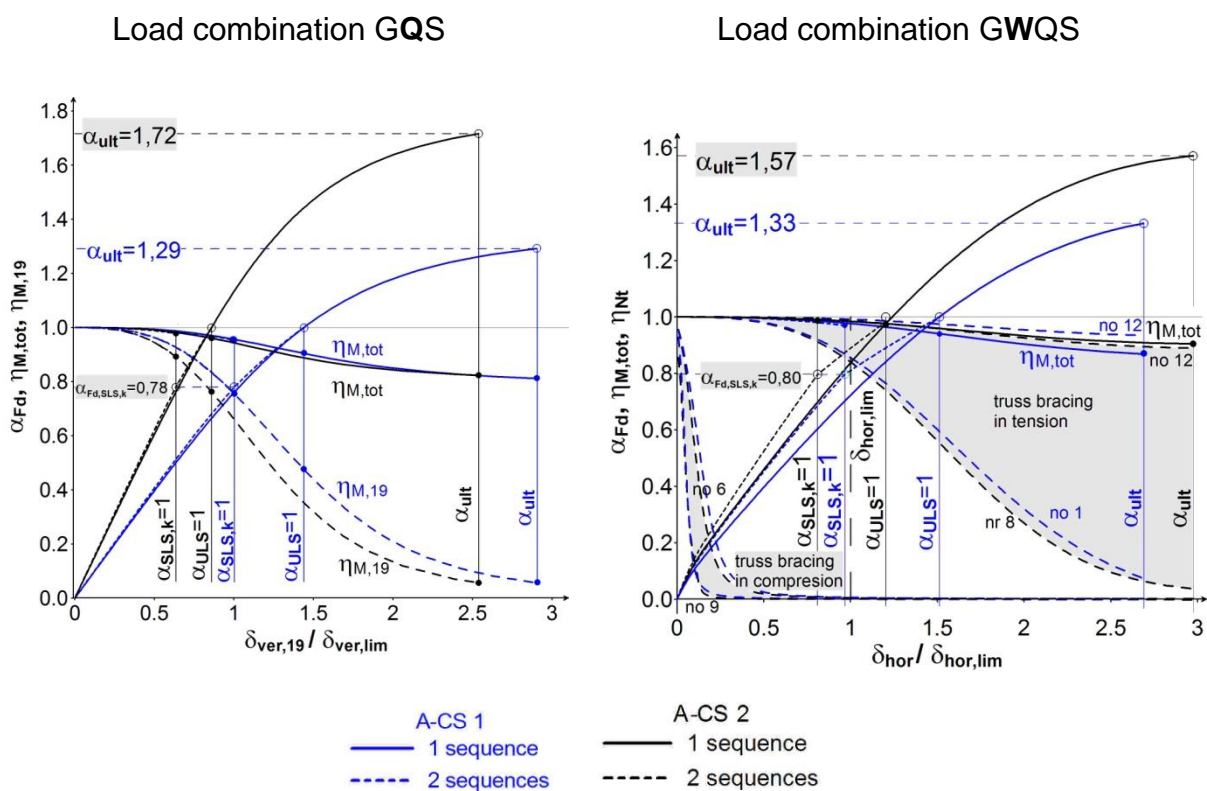


Fig. 9. Graphical illustration of the degree of stiffness reduction of elements (η_M , η_{Nf} , η_{Nt} – stiffnesses: flexural, axial of the frame element, axial of the brace element relatively)

While comparison of stiffnesses of particular elements is relatively easy, there is a difficulty in definition of the factor of the stiffness reduction of the entire structural system, that could be adequate for the purpose of comparison of the structure stiffness under various load combinations or the stiffness of various types of structures. In the article few proposals of such global factors have been presented and one of them has been utilised to illustrate a stiffness reduction of the frame with pinned connections (nodes) (frame A). Similar calculations have been carried out for the strengthened frame A (A-CS 2). The results are shown in Fig. 10 in form of global response of the frame structure in respect of the ultimate capacity but also in respect of the serviceability limit and the global coefficient of the flexural stiffness reduction, and also in form of local responses of the frame elements and the brace elements.



Rys. 10 Ścieżki równowagi i globalny współczynnik redukcji sztywności giętej ramy A oraz lokalne odpowiedzi elementu ramowego nr 19 i stężeń nr 1, 6, 8, 9, 12

Another example of application of the computer program ECIDA is comparison of behaviour of frames with various types of beam-column connections (joints). For the purpose of comparison the original frame (frame A-CS 1 without strengthening), called as frame A, same frame but with semi-rigid joints (called frame B) and the frame with rigid joints have been used. The obtained results confirmed effectiveness of the computer program ECIDA in assessment of safety of steel frame structures with various solutions regarding structural connections (joints) (based on various stiffnesses of frame joints)

Summary

The most important scientific achievements presented a series of thematically related publications entitled: **Stiffness degradation of angle bar elements in advanced analysis CSD of braced plane frames**, which are my contribution to the development of the civil engineering discipline, are:

- the demonstration that the analytical approach based on the Murzewski's method of statistic hypothesis, implemented in previous studies regarding re-creation of design standard buckling curves and relations of force to relative displacement of element ends towards each other can be extended to analysis of angle elements with eccentric connections at the ends;
- the demonstration that relations of force to relative displacement of element ends towards each other for brace angle elements with in-plane eccentricity (symmetrical welded connections) and with spatial eccentricity (asymmetric connections with bolting through a single flange of the angle element) are completely different and the process of calibration of model parameters need to be carried out independently for each of cases. The research studies have been carried out for a single type of equal angle element (with same flange width and same flange thickness) but with three different slendernesses. In order to postulate a general set of model parameters, applicable to any size of element, eccentricity and slenderness, a further extended experimental testing and/or numerical simulations are required;
- the demonstration that the analytical model proposed for description of the relation of force to relative displacement of bar element ends towards each other for brace angle elements with eccentric connections is quite useful as it allows to accurately replicate the experimental testing relations, and as such it can be implemented in the computer program that assist in assessment of safety of steel skeleton frame structures using the advanced analysis in accordance with the limit states theory;
- the accomplishment of crucial updates and improvements in the advanced CSD analysis in comparison to the concept of RPH analysis developed in Purdue University, that relate to frame elements but in particular to vertical bracing angle elements of skeleton building structures.
- the successful validation of the developed version of the advanced analysis, based on results of the author's experimental laboratory testing carried out in Warsaw University of Technology and the implementation of the analysis method in the computer program ECIDA;

- the implementation of the developed advanced CSD analysis in direct assessment of safety of steel skeleton frame structures (in the design stage or in service) based on following of the equilibrium path;
- obtaining new means of verification of the limit states of the structure, as apart from verification of the capacity utilisation there is also possibility of following the stiffness reduction of structural elements in intermediate stages on the equilibrium path due to SLS and ULS load combinations. This makes the decision process regarding modification of capacity of structural elements in process of forming the optimum structure with consideration of reaching the critical point on the equilibrium path (in ULS) or optimum distribution of stiffness of elements in the structure due to serviceability criteria being reached (in SLS) much easier.
- the indication that the process of assessment/verification of skeleton frame structure is complex and it requires a very precise monitoring of the structure stiffness reduction as the load amplifier increases due to redistribution of internal forces caused by “geometric weakening“ of brace bar elements, once their buckling capacity is reached.
- the indication that the proposed CSD approach and the computer program ECIDA are suitable for research application but a development of an user-friendly software that uses advanced CSD analysis would be very helpful in common design practice to carry out simulations of complex processes of assessment of safety and serviceability requirements of steel skeleton building structures.

5. Overview of other research and scientific achievements

a) Scientific achievements other than presented in chapter 4

Beside the topics presented in previous chapter (section) I was also interested in other aspects of steel structures. These included:

- 1) design standard issues,**
- 2) resistance and stiffness of frames with semi-rigid joints,**
- 3) stability of aluminum elements,**
- 4) resistance of cold-formed members**

Ad. 1) The interest in design standard issues was mainly coming from introduction of the Eurocodes to the Polish Standards. Interpretation of the Eurocode requirements in some areas was a very challenging task, which research teams from various technical universities tried to address.

I am the co-author on the monograph *Stiffness and capacity of sway frames with semi-rigid joints* prepared under direction of prof. J.Bródka, that include broad description of design methods in accordance with the Eurocodes. I prepared Chapter 7 [Appendix 4 – II E 4] about application of the Merchant-Rankine's method in assessment/verification of frames with semi-rigid joints. I also co-authored Chapter 10 [Appendix 4 – II E 5] containing 3 examples of design calculations. Each example was a design study of a main load-bearing system of steel structure, where beam-column joints were semi-rigid. A warehouse frame, three storey office building and six storey residential apartment block had been designed in the elastic range and then their remaining capacities had been verified in the plastic-elastic range.

I am also the co-author of the monograph prepared under direction of prof. M. Giżejowski and prof. J. Ziółko, in which together with dr. Lucjan Ślęczka I provided calculations of several main structural systems in accordance with procedures contained in the Eurocodes. These were three portal frame structures (two with plate girders [Appendix 4 – II E 1] and one with a roof truss [Appendix 4 – II E 2]) and one skeletal building with semi-rigid joints [Appendix 4 – II E 3].

The group of scientists led by prof. M. Giżejowski was mainly focused on issues regarding design calculations of structures, but in my area of interest were also issues regarding selection of steel material, global analysis, semi-rigid joints, stability and brace elements. The outcome of these research studies is the series of articles published in the journal *Inżynieria i Budownictwo* [Appendix 4 – II E: 9, 10, 11, 14, 18].

Ad. 2) After obtaining the doctoral degree, further studies regarding behaviour of brace elements were related not as before to spatial trusses but to frame structures with semi-rigid joints. It was associated with a commencement of co-operation with prof. M. Giżejowski's team and it resulted in scientific publications mainly on methods of analysis of such structures with a special consideration of advanced analysis [Appendix 4 – II E: 14, 16, 17]

Ad. 3) To the areas of my scientific interests I also include issues regarding stability of elements and frame structures, as confirmed by the series of publications regarding elements made of aluminium alloys [e.g. Appendix 4 – II E: 19, 20]. An unified method of determining of buckling curves for local instability of section walls and global buckling curves for bar elements subject to compression and bending was included in these publications. For a comparison purpose of buckling curves an empirical statistics was applied. The presented proposals had been harmonised with the norm EC9 and the Polish Standard for design of steel structures PN-90/B-03200. These were developed in context of re-started works on the amendment of the Polish Standard PN-64/B-03220.

Ad.4) At the interface of my interest in stability and design standards there is my research study regarding design of structures with using of cold-formed sections. These were

carried out in the late twentieth century, and the study's conclusions have been published in the article in the journal *Inżynieria i Budownictwo* [Appendix 4 – II E 21]

b) Scientific achievements in the field of technical sciences as per criteria set in § 3 of the Regulation of the Minister of Science and Higher Education

I presented the summary of scientific achievements after obtaining the doctoral degree in accordance with the order of criteria contained in § 3 of the *Regulation of the Minister of Science and Higher Education of September 1, 2011 on the criteria for assessing the achievements of the person applying for the postdoctoral degree* (Journal of Laws No. 196).

1) Scientific publications in journals listed in the JCR database

After obtaining the doctoral degree, I published a total of **3** articles in journals included in Part A of the scientific journals register of the Ministry of Science and Higher Education (MSHE) (listed in the JCR database), including:

- 2 articles in Journal of Constructional Steel Research (Elsevier)
- 1 article in Journal of Civil Engineering and Management (Taylor & Francis)

List of publications I have included in Appendix 4 in Section II A.

2) Authorship of the completed original design, construction or technological achievement

None

3) Granted international or national patents

None

4) Utility models that have obtained protection and were exhibited at international exhibitions

None

c) Scientific achievements in all areas of knowledge as per criteria set in § 4 of the Regulation of the Minister of Science and Higher Education

I presented the summary of scientific achievements after obtaining the doctoral degree in accordance with the order of criteria contained in § 4 of the *Regulation of the Minister of Science and Higher Education of September 1, 2011 on the criteria for assessing the achievements of the person applying for the postdoctoral degree* (Journal of Laws No. 196).

1) Monographs, scientific publications in international or national journals other than those listed in the JCR database

I am the co-author of 3 monographs (one published internationally and two nationally).

I am the author or co-author of articles in international or national journals, not listed in the JCR database:

- in journals included in Part B of the scientific journals register of the MSHE:
 - 3 articles in the journal *Archive of Civil Engineering* (De Gruyter), (excluding 3 articles as part of my habilitation achievements),
 - 9 articles in the journal *Inżynieria i Budownictwo*,
- in international journals, not included in the scientific journals register of the MSHE:
 - 1 article in the journal *Botswana Journal of Technology* (University of Botswana),
- in national journals, not included in the scientific journals register of the MSHE:
 - 1 article in the journal *Konstrukcje Stalowe* (PIKS)
 - 1 article in the *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska*,
 - 1 article in the *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej. Budownictwo Lądowe*

The list of publications is included in Section II E of Appendix 4.

2) Documentation of research and expertise

I am author or co-author of 21 unpublished works. All these works contained research elements and 15 of them were documented as statutory work reports, one as the rector grant report and one as the dean's grant report. The subject of these works concerned calculations of braced frame structures with semi-rigid joints, modelling of behaviour of brace elements in steel frame, experimental verification of the proposed models and development of numerical advanced CSD analysis for the frames braced with angle elements. Four reports regarded research projects:

- 2 reports on the project Eureka/SEFIE “Steelbiz as an E-forum for the Development of Eurocodes for Steel Construction”, consisting of two stages of the task regarding an integrated continuous approach in analysis and design of steel structures with consideration of non-linear properties of elements and joints;
- 2 reports on the research programme *MONIT - Monitoring of technical state of construction and evaluation of its lifespan*, consisting of 2 tasks regarding: - identification

and classification of loads and programming of numerical simulation of elements and joints.

The list of unpublished works is included in Section II F of Appendix 4.

3) Total *impact factor* of scientific publications according to the JCR list, according to the year of publication

The total impact factor of scientific publications according to the JCR list, according to the year of publication is 1,364. (according to the Web of Science database).

4) Number of citations according to the Web of Science (WoS) database

The number of citations according to the Web of Science (WoS) database is **11** (without self-citations). The number of cited papers (without self-citations) is **6**. The papers were cited, inter alia, by scientists from the Imperial College London, University of Milan, Budapest University of Technology and Economics, Federal University of Minas Gerais ranked respectively in the 1st, the 2nd, the 4th and 5th hundred of the best universities according to the Academic Ranking of World Universities (ARWU) prepared in 2018. One of the publications was also cited by the employees of the Rail Vehicles Institute "TABOR" [Appendix 4 – IV]

5) Hirsch index of published publications according to the Web of Science (WoS) database

The Hirsch index according to the Web of Science (WoS) database is **2** [Appendix 4 – IV].

6) Managing international or national research projects or participating in such projects

I was involved in three research projects:

- Programme Innovative Economy: *MONIT – Monitoring of technical state of construction and evaluation of its lifespan*, the project co-funded by the European Regional Development Fund, Warsaw University of Technology, AGH University of Science and Technology, Institute of Fundamental Technological Research Polish Academy of Sciences and The Szewalski Institute of Fluid-Flow Machinery Polish Academy of Sciences, 2008-2012;
- Initiative Eureka E!3034 SEFIE "Steelbiz as an E-forum for the introduction of Eurocodes for steel construction, the Building Research Institute, 2004-2005;
- Investigations into the behaviour of compressed components of engineering structures with the postbuckling stiffness degradation effects taken into account, University of Botswana and Warsaw University of Technology, 2003.

7) International or national awards for scientific

I received the Warsaw University of Technology Rector's team awards for scientific achievements in 1989, 1999, 2005, 2006, 2007, 2013-2014.

In 2006 I received the Minister of Transport and Construction team distinction for the publication *Stiffness and capacity of sway frames with semi-rigid joints* published by Printing House of Rzeszów University of Technology.

8) Presenting papers at international or national conferences

After obtaining the doctoral degree I was the author and the co-author of 35 papers, that were presented on number of international conferences, including:

- 4 papers at the International Colloquium Stability and Ductility of Steel Structures (SDSS) in 1990 in Budapest (Hungary), 1999 in Timisoara (Romania), 2006 in Lisbon (Portugal) and in 2010 in Rio de Janerio (Brazil),
- 3 papers at the European Conference on Steel and Composite Structures (Eurosteel) in 2005 in Maastricht (Netherlands), 2011 in Budapest (Hungary) and 2017 in Copenhagen (Denmark),
- 3 papers at the Annual International Symposium of the IASS in 1989 in Madrid (Spain), 2002 in Warsaw and 2006 in Beijing (China),
- 3 papers at the International Conference *Modern Building materials, structures and techniques* in 1999, 2001 and 2004 in Vilnius (Lithuania),
- 3 papers at the International Scientific - Technical Conference *Metal Structures* in 2001 in Gdańsk and in 2006 in Rzeszow
- 2 papers at the International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation (SEMC) in 2004 and in 2013 in Cape Town (South Africa),
- 2 papers at the 20th Czech and Slovak National Conference with International Participation *Steel Structures and Bridges 2003* in 2003 in Prague (Czech Republic),

and also a single paper presented at each of the following conferences:

- 7th International Structural Engineering and Construction Conference (ISEC 7) in 2013 in Honolulu (Hawaii),
- 1st Australasia and South-East Asia Structural Engineering and Construction Conference in 2012 in Perth (Australia),
- SSRC Annual Technical Session and Meeting in 2006 in Baltimore (USA),
- Australian Structural Engineering Conference in 2005 in Newcastle (Australia),
- International Conference on Civil Engineering (CE'2005) in 2005 in Jeglava (Latwia),
- International colloquium of Polish chapter IASS in 2005 in Warsaw,

- International Conference on Advances in Structures - Steel, Concrete, Composite and Aluminium in 2003 in Rotterdam (Netherlands),
- International Conference: Safety, Risk, and Reliability - Trends in Engineering in 2001 in Malta,
- International Symposium on Semi-rigid Joins in Metal and Composite Structures in 2000 in Warsaw,
- 8th Polish-Ukrainian Seminary in 2000 in Warsaw,
- International Conference *Structural Steel Developing Africa* in 1996 in Sandto (South Africa),
- Asian-Pacific Conference On Shell and Spatial Structure in 1996 in Beijing (China),
- Polish-Russian Symposium *Theoretical Basis of Civil Engineering* in 1994 in Warsaw (Poland),
- XVII Czech and Slovak International Conference on *Steel Structures and Bridges* in 1994 in Bratislava (Slovakia),
- International Symposium *Theoretical Basis of Building* in 1993 in Moscow (Russia)

At national conferences 21 papers were presented, including:

- 8 papers at the Konferencja Naukowych KILiW PAN oraz KN PZITB in Krynica in 1994, 1997, 1999, 2001, 2004, 2006, 2007 i 2010,
- 7 papers at the Local seminar of IASS Polish chapter in 1999, 2006, 2007 and 2012 in Warsaw, 2001 in Wroclaw, 2003 in Rzeszow and 2004 in Czestochowa,
- 2 papers at the Konferencjach Naukowo-Technicznych *Aktualne problemy naukowo-badawcze budownictwa* in Olsztyn in 2000 (Łańsk) and in 2003 (Kortowo),
- 2 papers at the Konferencjach Naukowych *Badanie nośności granicznej konstrukcji metalowych* in Wroclaw in 1998 (Szklarska-Poręba) and in 2001 (Karpacz).
- 1 paper at the IX Konferencji Naukowej *Połączenia i węzły w Konstrukcjach Metalowych i Zespolonych* in 2008 in Rzeszow - Bezmiechowa,
- 1 paper at the Konferencji Naukowej *Zagadnienia stanów granicznych konstrukcji stalowych* in 2004 in Cracow.

The list of papers presented at conferences I included in Appendix 4 in chapter 4 using an inverted chronological order.

9) Summary of scientific achievements

A detailed list of all works is provided in Appendix 4. The summary of publications is included in the table below.

Type of publication	Total	Number of publications after obtaining the doctoral degree
Scientific publications in journals listed in the JCR database	3	3
Chapters in monographies published internationally	1	1
Chapters in monographies published nationally	5	5
Scientific publications in international journals other than those listed in the JCR database	1	1
Scientific publications in national journals other than those listed in the JCR database	19	18
Presenting papers at international conferences	39	35
Presenting papers at national conferences	26	21
Total	94	84

d) Discussing didactic and popularizing activities as well as international cooperation after obtaining the doctoral degree as per criteria set in § 5 of the Regulation of the Minister of Science and Higher Education

Discussing didactic and popularizing activities as well as international cooperation after obtaining the doctoral degree I ranked according to the order of criteria contained in § 5 of the *Regulation of the Minister of Science and Higher Education of September 1, 2011 on the criteria for assessing the achievements of the person applying for the postdoctoral degree* (Journal of Laws No. 196).

1) Participation in European programs and other international and national programs

None

2) Participation in international or national scientific conferences or participation in the organization committees of these conferences

Since 2011 I am a member of the "Permanent Organising Committee IASS-PC", which is one of the organising committees for the annual Lightweight Structures in Civil Engineering (LSCE) seminars.

I'm the co-author of the paper prepared for a plenary session [Zař. 4 – II L 14] of the international conference Metal Structures (ICMS2006).

I co-hosted the session called *Towers and Masts*, at the Annual International Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures – IASS 2002 in Warsaw.

I'm the co-editor the conference monograph of the international symposium on *Semi-rigid Joints in Metal and Composite Structures* [Appendix 4 – III B 2].

3) Received awards and distinctions

Twice, I received the Warsaw University of Technology Rector's team awards for didactic achievements: 2005/2006, 2008/2009.

4) Participation in consortia and research networks

None

5) Project management carried out in cooperation with scientists from other Polish and foreign centers, and in the case of research applied in cooperation with industry

None

6) Participation in editorial committees and editorial boards of journals

None

7) Membership in international or national organizations and scientific societies

Since 2007 I have been the elected member of Metal Structures Section of Committee for Civil and Water Engineering of the Polish Academy of Sciences (terms 2007-2010,2011-2015,2016-2020).

Since 2009 I have been the representative of the group Poland 2 in International Association for Shell and Spatial Structures. I had been a member of this group before I accepted the representative role.

8) Didactic achievements and in the field of popularization of science

I delivered Metal Structures classes at the university course level I (design workshops) and level II (lectures and design workshops). In the latter I had an opportunity to use my scientific interest in area of structures made of cold-formed sections, aluminium structures and structures with semi-rigid joints to prepare course programmes and didactic materials.

I was the supervisor of 114 diploma theses, including 86 engineering theses and 28 master theses.

Two of diploma theses, one Bachelor thesis and one Master thesis, were awarded with distinctions by the Minister of Construction. These are listed in the Appendix 4 – III D.

I have carried out over 40 reviews of such theses.

With respect to general science promotion I can refer to being the co-author of the report from the symposium *Semi-rigid Joints in Metal and Composite Structures* published in the journal *Inżynieria i Budownictwo* and also the author of the report from the conference in Krynica published in the journal *Konstrukcje Stalowe* and the author of the report from the conference *Structural Steel Developing Africa* published in the journal *Inżynieria i Budownictwo*.

The list of the conference reports is included in in Appendix 4 chapter III I.

9) Scientific supervision over students

None

10) Academic supervision over PhD students as a scientific supervisor or auxiliary promoter

None

11) Internships at foreign or national academic or academic centers

I completed number of advanced, professional training courses in International Centre for Mechanical Sciences (CISM) in Udine (Italy).

The list of the courses is included in Appendix 4 – III L.

12) Execution of expert opinions or other studies at the request of public authorities, local self-government, entities performing public tasks or industry

None

13) Participation in expert teams

None

14) Reviewing international or national projects and publications in international and national journals

I was the reviewer of publications in Archive of Civil Engineering (De Gruyter).

15) Other achievements

In 2010 I received Golden Medal for Long Service.

