

Modelowanie zrealizowanych konstrukcji stalowych – wybrane przykłady



Dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski, prof. uczelni, Politechnika Gdańska

1. Wprowadzenie

Wszyscy zdajemy sobie sprawę z tego, że współczesne konstrukcje wymagają nowoczesnych technik analizy teoretycznej. Nowe wyzwania strukturalne i architektoniczne, a także potrzeba uwiarygodnienia istniejących konstrukcji w nowych warunkach eksploatacji wymagają stosowania zaawansowanych teoretycznie technik analizy mechanicznej i wytrzymałościowej. Wirtualne modele numeryczne stają się dzisiaj podstawowym środkiem do prowadzenia analiz. Wypierają one skutecznie metody analityczne, które w praktyce inżynierskiej służą głównie do rozwiązywania prostych zagadnień lub weryfikacji metod numerycznych.

Ważnym skokiem jakościowym jest możliwość analizowania praktycznie dowolnych struktur inżynierskich [1]. Dzięki temu powstała nowa kategoria obiektów, budząca sporo emocji i wprowadzająca element współzawodnictwa między projektantami i inwestorami. Prototypowe rozwiązania konstrukcyjne i systemy strukturalne, budzące często zadziwienie, to w skrócie recepta na sukces. Powstają więc budowle wykonane niezgodnie z tradycją. Celują w tym przede wszystkim przekrycia strukturalne, obiekty sportowe, kładki dla pieszych, a także poważne mosty.

Nowatorska forma architektoniczna wymaga zaawansowanych teoretycznie obliczeń. Istnieje zatem potrzeba prowadzenia kompleksowych analiz mechanicznych nowych konstrukcji. Czas przekłada się również na kondycję istniejących konstrukcji, które aby mogły dalej służyć w zgodzie ze współczesnymi zasadami bezpieczeństwa i aktualnymi obciążeniami, muszą być poddane weryfikacji. Taką weryfikacją mogą być zaawansowane teoretycznie modele numeryczne.

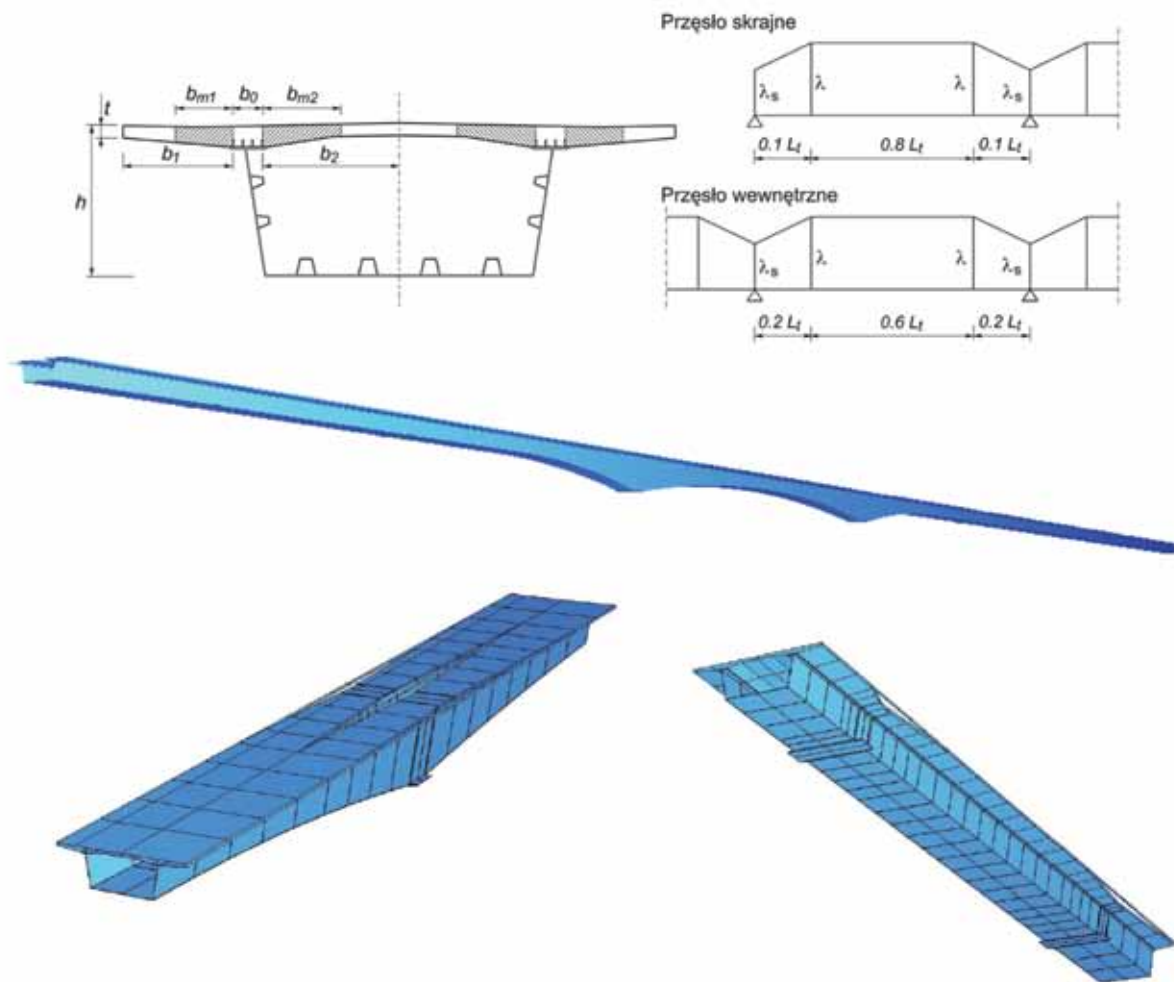
W artykule przedstawiono bardzo ogólnie przykłady współczesnych możliwości analizy konstrukcji stalowych w odniesieniu do komercyjnego oprogramowania inżynierskiego w aspekcie praktycznym. Prezentowane przykłady pochodzą z rzeczywistych analiz wykonanych na potrzeby prac badawczych, ekspertyz lub projektów zrealizowanych przez autora i jego współpracowników. Są więc przykładem praktycznego wykorzystania procedur i teorii potocznie uważanych za akademickie. Każdy z przedstawionych przykładów został bardziej szczegółowo omówiony w załączonej do artykułu literaturze.

2. Modele prętowe. Uwagi ogólne

Znany model belkowy może służyć do rozwiązania większości problemów inżynierskich. Jego przydatność jest bezsporna, tym bardziej że normy do projektowania oparte są głównie na modelach belkowych. Do tego tradycja i dorobek pokoleń wskazują, że na ogół nie trzeba sięgać po bardziej złożone teorie. Współczesne systemy MES zawierają wiele typów elementów prętowych, a twórcy nowego oprogramowania wciąż pracują nad ich ulepszeniem. Należy jednak podkreślić, że bodźcem do tych prac jest dążenie do doskonałości w matematycznym opisie zagadnień statyki lub mechaniki, nie zaś potrzeba ulepszenia narzędzi inżynierskich dedykowanych budownictwu. Ważnym dla inżynierów elementem systemu numerycznego jest wyposażenie procedur dla modeli belkowych w szereg przydatnych, a nawet bezcennych elementów. Należą do nich:

- definiowanie dowolnych przekrojów złożonych z odmiennych materiałów, głównie chodzi tu o przekroje zespolone i betonowe ze zbrojeniem,
- definiowanie spoin w przekrojach stalowych,
- definiowanie przekrojów z częścią współpracującą, bez redukcji ciężaru,
- definiowanie obciążeń w sposób ułatwiający ich wprowadzenie z powierzchni do układu prętowego,
- definiowanie sprężenia i możliwość uwzględnienia faz budowy,
- analiza stanów naprężeń w elementach belkowych z uwzględnieniem efektów znamienych dla układów zespolonych, takich jak fazy montażu czy reologia.

Wizualizację modelu numerycznego typowych przęseł mostu drogowego przedstawia rysunek 1. Widać redukcję szerokości płyty w rejonach podpór. Zazwyczaj system MES umożliwia wprowadzenie danych przekrojowych tak, aby ciężar własny obliczony na podstawie przekrojów był prawidłowy pomimo redukcji ich części. Wizualizacje numerycznych modeli belkowych sprawiają wrażenie wiernego odwzorowania rzeczywistości. Należy pamiętać jednak, że rozwiązanie otrzymujemy, wykorzystując teorię belkową, której konsekwencją jest szereg upraszczających założeń. Najważniejsze to założenie o płaskich przekrojach. Dobrym zwyczajem jest zatem zapoznanie się z podstawami teoretycznymi oprogramowania przed przystąpieniem do modelowania struktury.



Rys. 1. Typowy przekrój i wizualizacje modelu numerycznego mostu drogowego w środowisku MES SOFiSTiK

Przynajmniej należy zapoznać się z częścią teoretyczną podręcznika użytkownika programu MES.

Obiekty podwieszane lub łukowe wymagają stosowania elementów kratownicowych lub cięgnowych. Jest to szczególnie istotne tam, gdzie może dojść do wyłączania się cięgien w czasie obciążania struktury. W wielu wypadkach modelowanie liny elementami cięgnowymi może stwarzać problemy numeryczne wynikające z braku początkowej sztywności. Dlatego konstrukcje cięgnowe często modeluje się za pomocą elementów belkowych o małych (ale istotnych dla procesu numerycznego) sztywnościach giętnych. Wiąże to się często z analizą nieliniową. Struktury wiszące całkowicie modelowane elementami belkowymi przedstawiają rysunki 2 i 3.

3. Modele prętowe. Wybrane przykłady

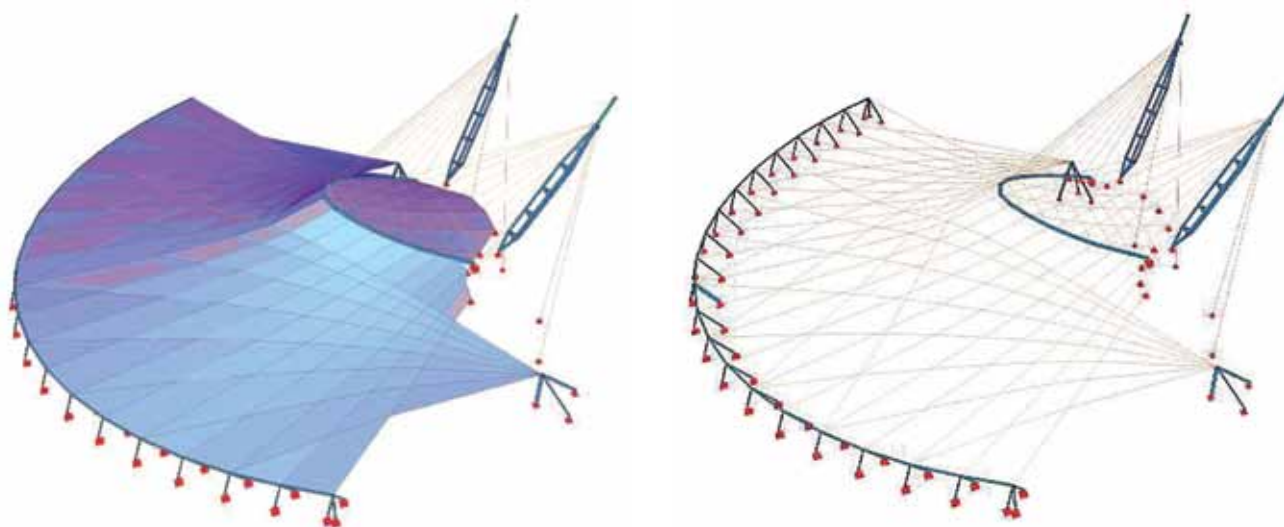
Wybrane przykłady zastosowania modeli prętowych przedstawiono w dalszej części. Problematyka budowy tych modeli nie została dostatecznie przedstawiona ze względu na przeglądowy charakter artykułu. Więcej danych na temat przedstawionych modeli czytelnik znajdzie w przywołanej literaturze.



Rys. 2. Most Milenijny w Londynie zaprojektowany przez Ove Arup&Partners; widok na podporę i belkowy model numeryczny MES SOFiSTiK



Rys. 3. Kładka wisząca w Minden zaprojektowana przez SBP Stuttgart; widok na podporę i belkowy model numeryczny MES SOFiSTiK



Rys. 4. Zadaszenie amfiteatru w Płocku; model MES SOFiSTiK

3.1. Zadaszenie amfiteatru w Płocku

Amfiteatr zlokalizowany jest na skarpie, przy północnym brzegu Wisły. Obiekt został wybudowany w latach 2005–2006. Dach jest konstrukcją podwieszoną. Elementy nośne konstrukcji wykonane są ze stali. Liny do podwieszenia wykonane zostały przez firmę BBR Polska. Pokrycie dachu wykonane jest z membrany typu PCV.

Konstrukcja nośna dachu wykonana jest z lin stalowych składających się z typowych splotów 7-drutowych. Liny zostały wykonane przez firmę BBR. Zastosowana była stal o dwóch klasach wytrzymałości:

- klasa 1 – 1770 N/mm²,
- klasa 2 – 1860 N/mm².

Część lin została zabezpieczona przed korozją przez dodatkową osłonę i wypełnienie plastyczną substancją izolującą. Pozostałe liny zabezpieczono antykorozyjnie przez wykonanie iniekcji cementowej w osłony typu HDP.

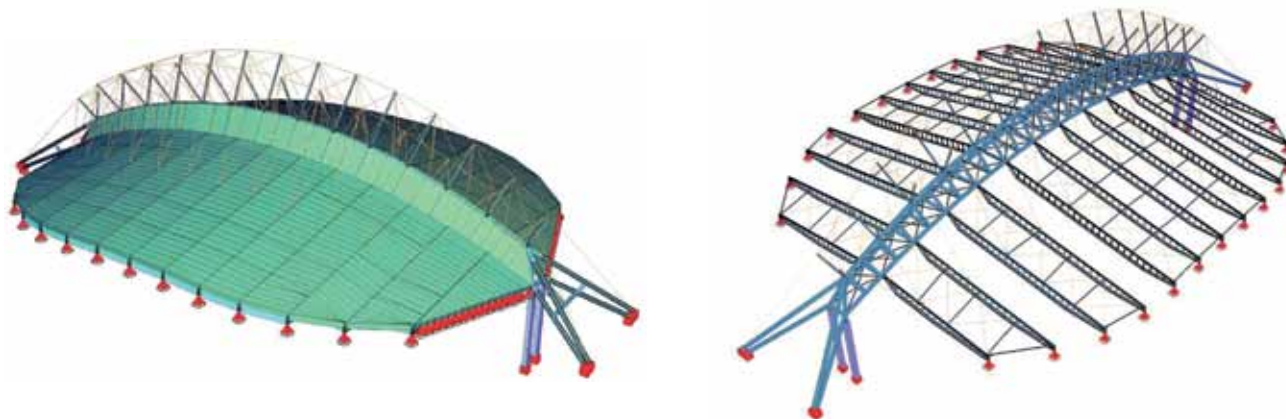
Opracowano model belkowo-ciężnowy (rys. 4) w oparciu o dokumentację powykonawczą i dane numeryczne przekazane przez firmę BBR na potrzeby weryfikacji projektu

budowy i projektu wzmocnienia konstrukcji. Model wykorzystano także w projekcie monitoringu zadaszenia.

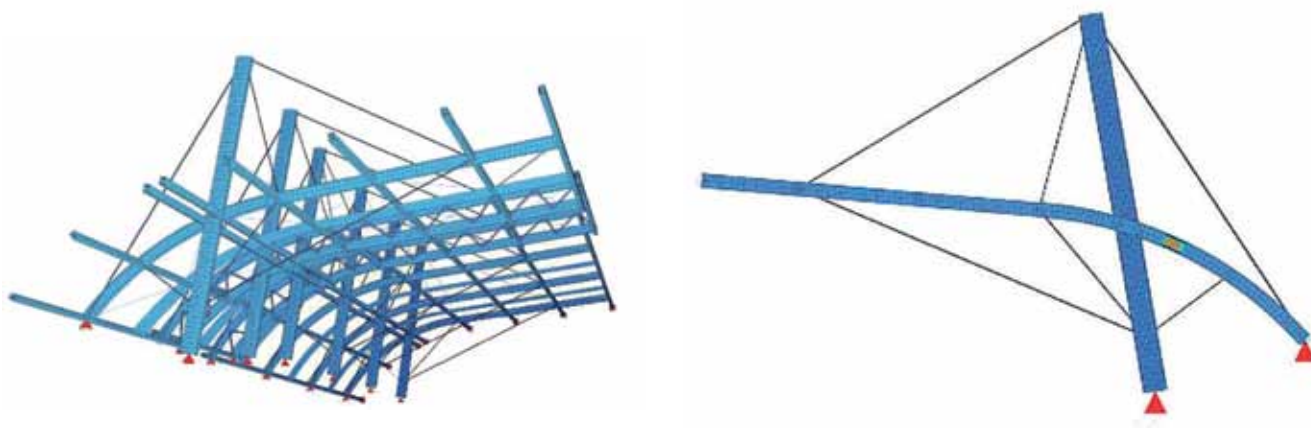
Pylony i koźły oporowe modelowano elementami belkowymi. Liny modelowano jako elementy ciężnowe o przekrojach netto zgodnych z dokumentacją powykonawczą. Membranę dachu modelowano elementami powłokowymi z zastosowaniem materiału typu „textile”. Pylony główne dyskretyzowano elementami belkowymi. Ring zewnętrzny i koźły go podtrzymujące, a także koźły oporowe boczne modelowano jako elementy belkowe. Przykrycie membranowe nie było analizowane w modelu i służyło tylko do przekazania obciążenia na układ ciężnowy. Zastosowano w obliczeniach procedury nieliniowe geometrycznie z uwzględnieniem napięcia wstępnego. Projektantem amfiteatru jest firma Modern Construction Systems Poznań.

3.2. Zadaszenie hali widowiskowo-sportowej w Gdyni

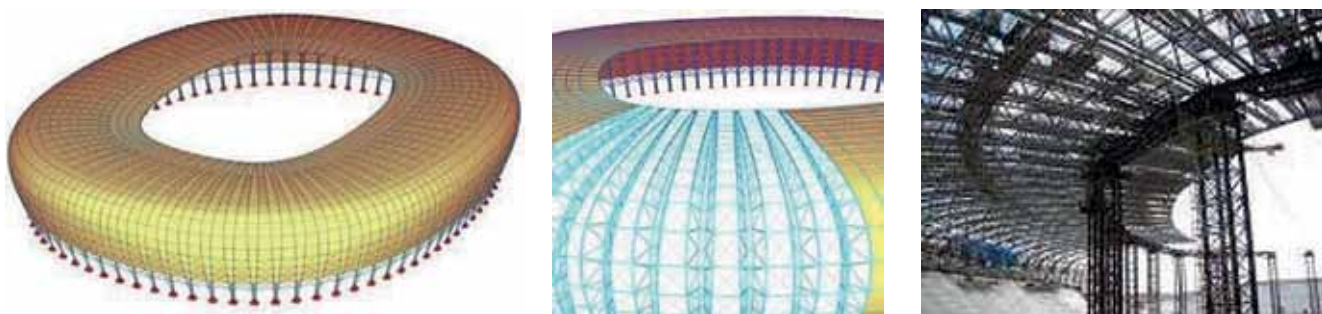
Hala „Gdynia Arena” jest obiektem wielofunkcyjnym. Główną konstrukcją nośną dachu stanowi jednoprzęsłowy łuk w postaci kratownicy przestrzennej (rys. 5), oparty na



Rys. 5. Wizualizacja modelu numerycznego konstrukcji zadaszenia hali gdyńskiej w środowisku MES SOFiSTiK



Rys. 6. Wizualizacja modelu numerycznego konstrukcji zadaszenia trybuny stadionu wykonana w środowisku MES SOFiStiK



Rys. 7. Zadaszenie; model statyczny konstrukcji (SOFiStiK) i stan na 18.06.2010

przyczółkach żelbetowych w sposób sztywny i pośrednio na słupach żelbetowych, przy czym podpory pośrednie zaprojektowano jako przegubowe. Rozpiętość dźwigara w świetle podparcia na przyczółkach wynosi ok. $L=106,0$ m. Rozstaw słupów dla podparcia pośredniego wynosi ok. $L=85,0$ m. Strzałka łuku wynosi ok. 19,0 m od osi pasa górnego dźwigara do oparcia na przyczółku i ok. 14,0 m do oparcia na słupach. Płatwie wykonano jako kratowe oparte przegubowo na dźwigarze głównym, przegubowo-przesuwne na murze oporowym oraz pośrednio (w 3/5 rozpiętości) na dźwigarze głównym poprzez układ ciągnowo-prętowy (podpora podatna).

Układ prętowo-ciężnowy zaprojektowano jako pośredniczący w przekazywaniu obciążenia z płatwi na łukowy dźwigar główny.

Model numeryczny wykonano jako układ belkowo-ciężnowy. Elementy powłokowe wykorzystano tylko jako poszycie przekazujące obciążenie na układ prętowy. Analizowano stany montażowe, napięcie układu ciężnowego oraz stan docelowy. Prowadzono analizy nieliniowe geometryczne w celu uwzględnienia wyłączających się ciężnien i imperfekcji konstrukcji.

Model opracowano na potrzeby modernizacji pierwotnego projektu zadaszenia i weryfikacji procedur montażowych. Projekt hali wykonało biuro Karczewski&Bernier Architectes.

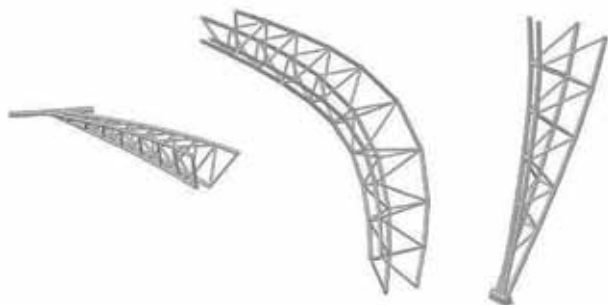
3.3. Zadaszenie trybuny Stadionu Narodowego Rugby w Gdyni

Konstrukcja dachu składa się z 5 sekcji umieszczonych na 3 różnych poziomach połączonych dźwigarami o konstrukcji ramowo-kratowej. Ma długość całkowitą 98,6 m i przykrywa trybunę wspornikiem o wysięgu ~ 16 m. Cała konstrukcja opiera się na 12 pylonach umieszczonych w rozstawie 8,2 m, do których jest podwieszonych 12 dźwigarów połączonych belkami poprzecznymi, na których opiera się blacha trapezowa pokrycia (rys. 6).

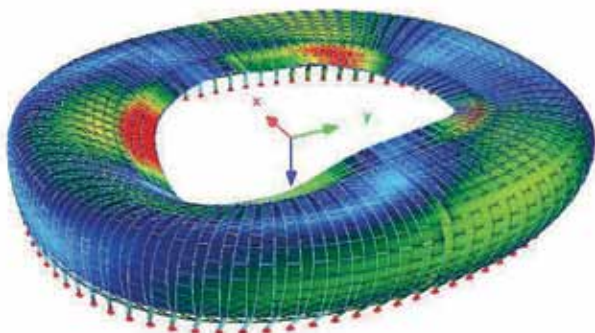
Model numeryczny wykonano jako układ belkowo-ciężnowy. Poszycie modelowano jako gęsty ruszt belkowy, o sztywności podłużnej odpowiadającej zastosowanej blasze trapezowej, jako element ułatwiający zebranie obciążeń. Analizowano stany montażowe, napięcie układu ciężnowego oraz stan docelowy. Prowadzono analizy nieliniowe geometryczne w celu uwzględnienia wyłączających się ciężnien i imperfekcji konstrukcji. Model wykonano na potrzeby projektu koncepcyjnego i budowlano-wykonawczego zadaszenia. Projekt zadaszenia wykonało biuro KBP Żółtowski.

3.4. Zadaszenie stadionu Energa Arena w Gdańsku

Konstrukcja nośna elewacji i zadaszenia składa się z 82 wzajemnie zintegrowanych przestrzennych, stalowych dźwigarów o kształcie sierpowym, posadowionych na okalającej żelbetowej konstrukcji trybun (rys. 7). Stanowi statycznie



Rys. 8. Geometria trzech składowych części wiązara i szczegół łożyska



Rys. 9. Deformacja pod obciążeniem wiatrem z kierunku północnego

i strukturalnie odrębną część stadionu [2, 3], całkowicie niezależną od znajdujących się wewnątrz trybun żelbetowych. Wiazary główne to sierpowe, kratownicowe dźwigary rozmieszczone w rozstawie ok. 8,00 m po obwodzie stadionu (rys. 8). Wysokość od poziomu stopy do powierzchni dachu wynosi ok. 38 m. Długość wspornika nad trybuną liczona od łożyska do krawędzi dachu nad boiskiem wynosi ok. 48 m. Pasy wiązara wykonane są z profili rurowych, okrągłych $\varnothing 355,6$ mm, o zmiennej grubości ścianki.

Układ stężeń składa się z pierścieni obwodowych, układu prętów typu X i stężeń poprzecznych. Pierścienie obwodowe

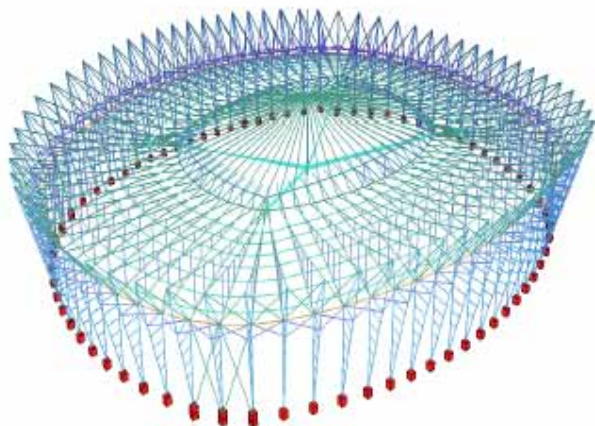
znajdują się na całej powierzchni zewnętrznej konstrukcji zadaszania w każdym węźle wiązarów od wysokości ok. 6 m, licząc od podstawy łożyska wiązara. Są to profile rurowe $\varnothing 219,1$ mm. Pierścień zamykający przyjęto jako przekrój rurowy $\varnothing 508/6$ mm. Stężenia typu X zaprojektowano z prętów pełnych $\varnothing 52$ mm wyposażonych w system napinania, głowice widelcowe i połączenia sworzniowe. W połowie wiązara nad trybunami znajduje się stężenie poprzeczne spinające pasy górne i dolne. Stężenie to znajduje się w sąsiedztwie pomostu rewizyjnego podwieszono do konstrukcji. W modelu zastosowano również elementy powłokowe (rys. 9). Służyły do przekazywania obciążenia z powierzchni dachu na strukturę belkową. Zasadnicze wymiarowanie prowadzono z wykorzystaniem modelu prętowego. Przeprowadzono analizy nieliniowe geometrycznie uwzględniające efekt wyłączenia się elementów stężeń ciągnowych, imperfekcje geometryczne oraz efekty uszkodzenia wybranych elementów konstrukcyjnych. Analizowano również fazy budowy. Model wykonano na potrzeby projektu budowlanego, wykonawczego i nadzoru autorskiego.

Projekt architektoniczny stadionu opracowało biuro Rhode-Kellermann-Wawrowsky, Düsseldorf. Projekt zadaszania opracowało biuro KBP Żółtowski.

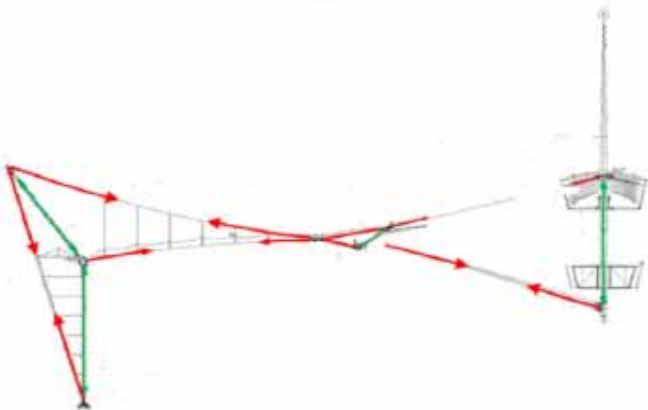
3.5. Zadaszenie Stadionu Narodowego w Warszawie

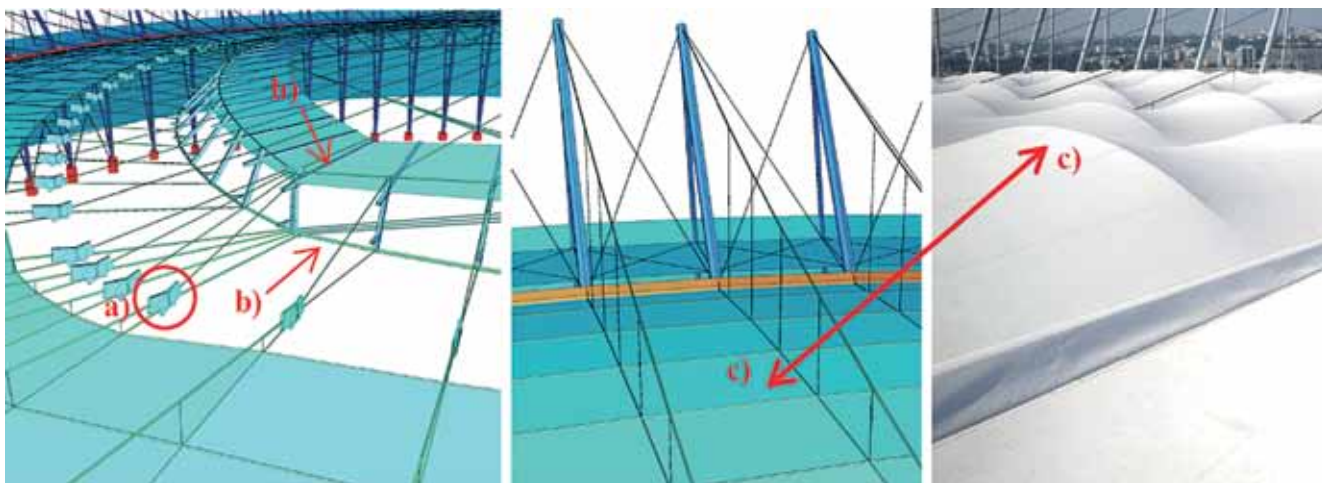
Konstrukcja zadaszania Stadionu Narodowego to wisząca struktura wewnętrznie sprężona [4]. Wartość sprężenia jest bardzo duża, ponieważ musi zachować napięcie wszystkich lin pod każdym obciążeniem. Można stwierdzić, że sprężenie wykorzystuje ponad 80% nośności obliczeniowej układu linowego. Model numeryczny konstrukcji nośnej dachu nad Stadionem Narodowym w Warszawie stworzono w systemie MES SOFiSTiK (rys. 10). Materiały, przekroje, geometria i obciążenia zdefiniowano zgodnie z projektem technicznym.

Konstrukcja nośna dachu, poza membraną, została wymodelowana wyłącznie z dwuwęzłowych elementów belkowych o zadanych odpowiednich przekrojach, zgodnie z dostarczonymi materiałami. Dach membranowy i szklany oraz fasada zostały odwzorowane w modelu z wykorzystaniem



Rys. 10. Wizualizacja MES i schemat pracy układu wiszącego zadaszania





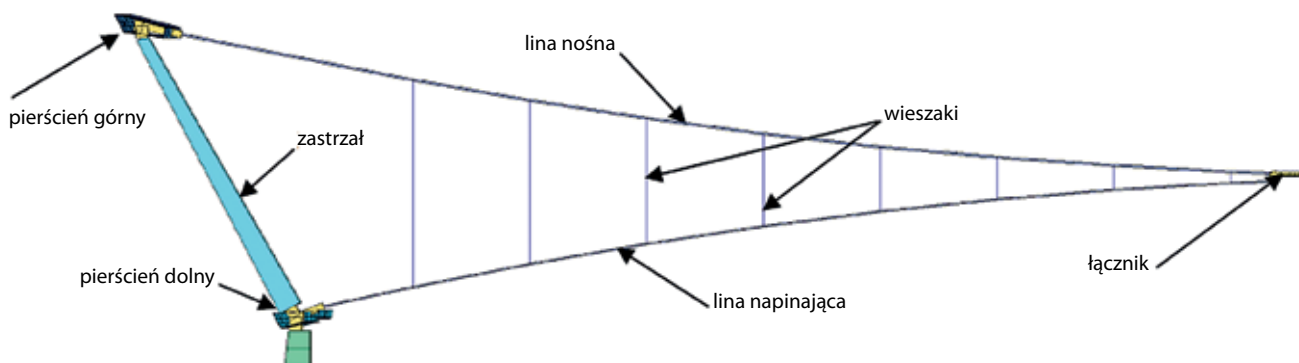
Rys. 11. Uproszczenia zastosowane w modelu: a) blachy węzłowe i głowice, b) pierścien wewnętrzny, c) membrany dachu

czterowęzłowych elementów powłokowych o odpowiednio zadanej sztywności materiału. Ciężar tych elementów uwzględniono jako obciążenie. Węzeł podporowy każdego z 72 słupów biegnących dookoła stadionu ma zablokowane wszystkie przesuwu i rotacje z wyjątkiem obrotu w płaszczyźnie radialnej. Model numeryczny wykonano w dwóch wariantach: z wewnętrznym dachem otwartym i zamkniętym. W modelu zostały przyjęte następujące uproszczenia:

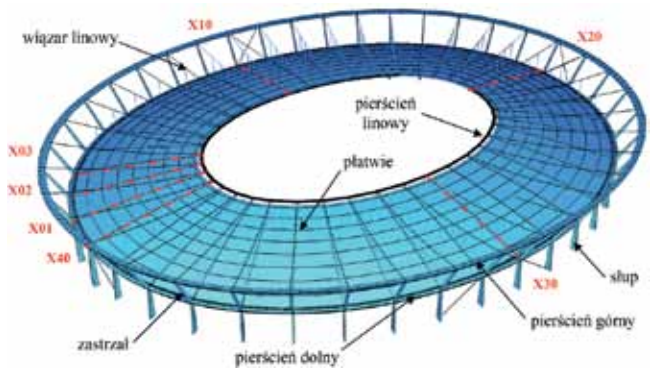
- elementy węzłowe wymodelowano z pojedynczych, nieważkich elementów belkowych o bardzo dużej sztywności. Ciężar blach i głowic uwzględniono jako przypadek obciążenia (rys. 11a),
- dolny i górny pierścien (linowy) rozciągany w rzeczywistości wykonany z baterii lin sprowadzono do pojedynczego elementu zastępczego z odpowiednio dobranymi parametrami (rys. 11b),
- membrany poszycia wymodelowano jako płaskie bez wypiętrzeń zrealizowanych na wiązarach łukowych (rys. 11c). Model został wykonany na potrzeby systemu eksperckiego obsługującego monitoring konstrukcji zadaszania. Projekt stadionu wykonało konsorcjum: JSK Architekci Sp. z o.o., Gmp International GmbH, Schlaich Bergermann und Partner GmbH.

3.6. Zadaszenie Stadionu Śląskiego w Chorzowie

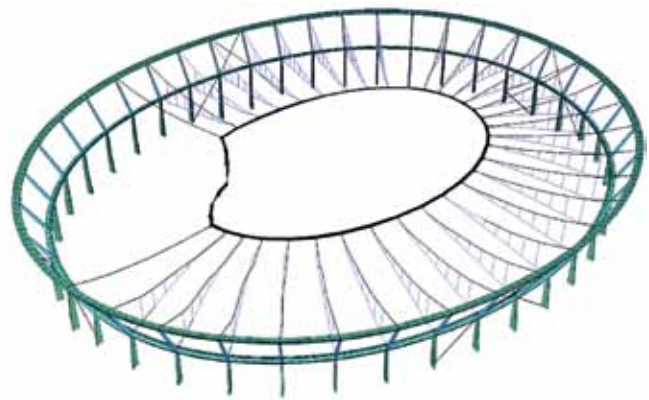
Bazujące na idei koła szprychowego zadaszenie Stadionu Śląskiego [5] składa się z dwóch zewnętrznych pierścieni ściskanych (górny i dolny), radialnych wiązarów linowych i linowego pierścienia wewnętrznego, rozciąganego (rys. 12, 13). Geometria pierścieni w rzucie oparta jest na łuku o trzech promieniach. Promienie łuków pierścienia górnego są większe w stosunku do pierścienia dolnego. Pierścienie połączone są ze sobą słupkami (rozporami). Na pierścieniach rozlokowanych jest 40 osi radialnych, w których znajdują się wiązary linowe. Wiązary składają się z górnej liny nośnej, dolnej liny napinającej oraz poprzecznych, pionowych wieższaków łączących obie liny (rys. 12). Lina górna i dolna spięte są na końcu łącznikiem, do którego przytwierdzony jest wewnętrzny pierścien rozciągany, składający się z 8 lin obwodowych. Dolny pierścien ściskany we wszystkich 40 osiach opiera się na żelbetowych słupach. Połączenie to jest przegubowe i promieniowo przesuwne, aby zminimalizować wpływ od temperatury. Pokrycie z płyt poliwęglanowych układane jest na płatwiach i szczelinach, które przymocowane są do lin napinających w miejscach mocowania wieższaków. Pierścien górny i dolny stężony jest linami w układzie krzyżowym. Stężenia te ułożone są symetrycznie w obydwu



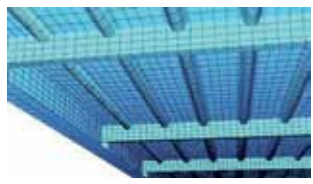
Rys. 12. Elementy wiązara linowego



Rys. 13. Wizualizacja modelu numerycznego i główne elementy konstrukcji



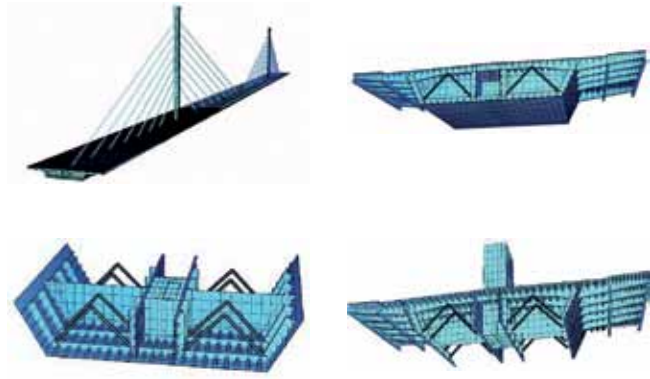
Rys. 14. Stan konstrukcji po zerwaniu jednej z lin nośnych zadaszania



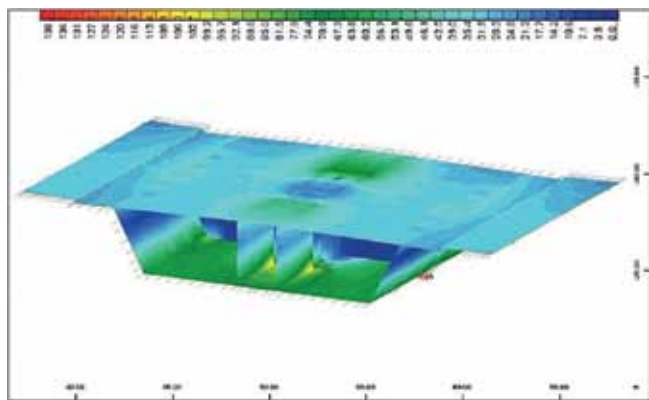
Rys. 15. Kładka nad ul. Wołoską zaprojektowana przez Transprojekt Gdańsk; modele numeryczne MES SOFiStiK

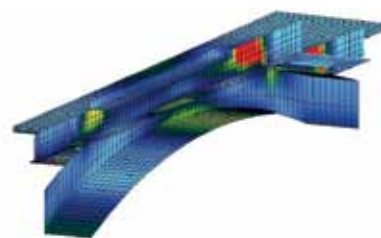
osiach głównych zadaszania. Stężenia rozwijają się dalej w dół do systemu wiązań dla podpór. Pierścienie zewnętrzne, łączące je zastrzały i żelbetone słupy zostały wymodelowane z dwuwęzłowych elementów belkowych o odpowiednio zadanych przekrojach. Dodatkowo z elementów belkowych wymodelowano płatwie oraz głowice lin nośnych i napinających, w tym łącznik lin radialnych z ringiem linowym. Ciężary tych elementów zostały zadane jako osobne przypadki obciążenia. Na płatwiach opisana została membrana dachu z czterowęzłowych elementów powłokowych o odpowiednio zadanej sztywności materiału. Za pomocą elementów kratownicowych podwieszono płatwie do lin napinających w miejscu wpięcia wieszaków.

Wszystkie elementy linowe w konstrukcji zostały odwzorowane za pomocą elementów ciągnowych. Do otworzenia w modelu oparcia pierścienia dolnego na głowicy słupa użyto odpowiednio zdefiniowanego sprzężenia kinematycznego między węzłami tych elementów oraz elementów sprężystych, promieniowych i obwodowych. W analizach wpływu obciążeń i wstępnego sprężenia uwzględniono wpływ przemieszczeń przez zastosowanie procedur nieliniowych geometrycznie. Model wykorzystano także do dynamicznej analizy efektu zerwania się wybranej linii nośnej lub napinającej (rys. 14).

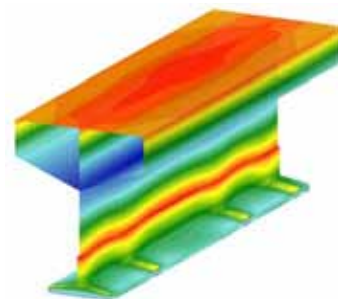
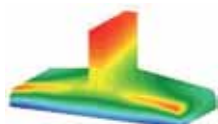
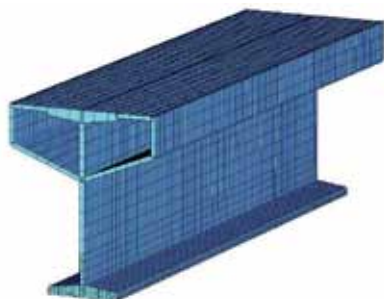


Rys. 16. Most przez Wisłę w Płocku; projekt – N. M. Hajdin i B. E. Stipanic





Rys. 17. Most Zamkowy przez San w Rzeszowie zaprojektowany przez Promost Consulting; model MES SOFiSTiK



Rys. 18. Belka podsuwnicowa – dyskretyzacja i wynik analizy

4. Modelowanie struktur za pomocą elementów powierzchniowych. Wybrane przykłady

Ograniczenia wynikające z modeli belkowych są przyczyną stosowania elementów powierzchniowych w analizowaniu konstrukcji stalowych. Systemy numeryczne MES oferują w tym wypadku elementy tarczowe PSN i PSO, płytowe i powłokowe. Modelując dźwigary lub ich fragmenty, najczęściej używa się elementów powłokowych jako tych, które najwierniej odzwierciedlają charakter konstrukcji stalowej złożonej z cienkich blach. Szczegółowy model MES może pomóc w odpowiedzi na wiele pytań związanych z nośnością nietypowych struktur.

Model powłokowy kładki dla pieszych ze szczegółem zamocowania wanty w pomoście przedstawiono na rysunku 15. Płyta pomostu, środniki dźwigarów i poprzecznik oraz zamocowania want zostały zdyskretyzowane elementami powłokowymi. Pasy dźwigarów i poprzecznik, żebra podłużne i pylon zamodelowano jako elementy belkowe. Wanty zamodelowano jako elementy ciągnowe.

Innym przykładem zastosowania elementów powłokowych jest analiza nośności mostu podwieszonoego przez rzekę Wisłę w Płocku [6], wykonana na potrzeby badań odbiorowych. Aby uzyskać wysoką jakość prowadzonych analiz i uniknąć wielu uproszczeń poczynionych na etapie projektowania, zbudowano zaawansowany model MES, w którym wszystkie zasadnicze elementy przęseł i pylonów zostały potraktowane jako struktury powłokowe. Interpretację graficzną modelu numerycznego wykonanego w środowisku SOFiSTiK i najważniejsze fragmenty przedstawiono na rysunku 16.

5. Modelowanie struktur za pomocą elementów bryłowych. Wybrane przykłady

Modele bryłowe MES wykorzystuje się zazwyczaj do analizy zagadnień geotechnicznych lub konstrukcji masywnych. Niemniej jednak, można ten sposób modelowania wykorzystać w analizie konstrukcji stalowej. Przykładem zrealizowanego zadania jest Most Zamkowy w Rzeszowie. Wystąpiło tam niestandardowe połączenie żelbetowego łuku ze stalową konstrukcją przęsła. Brak możliwości wykonania logicznie uzasadnionego modelu uproszczonego był powodem do stworzenia złożonego modelu MES, w którym część stalową dyskretyzowano elementami powłokowymi, a część żelbetową elementami bryłowymi (rys. 17). Mamy więc przykład podejścia kompleksowego do problemu w celu określenia bliskich rzeczywistości warunków brzegowych dla powłokowego modelu części stalowej mostu. Analizę wykonano na zlecenie projektanta, firmę Promost Consulting. Dyskretyzację elementami bryłowymi można zastosować także przy szczegółowej analizie konstrukcji stalowych. Przykładem jest problem nośności belki podsuwnicowej z wózkiem poruszającym się po pasie dolnym. W tym wypadku dolną część dźwigara walcowanego zdyskretyzowano elementami bryłowymi, zaś pozostały fragment przekroju elementami powłokowymi. Taki model pozwala na analizowanie efektów lokalnych. Dyskretyzację i gradient wyężenia według hipotezy HMM pokazano na rysunku 18. Szczególnie istotny jest rozkład wyężenia w pasie dolnym, wymodelowanym elementami bryłowymi. W rezultacie przeprowadzonej analizy powięszono profile belek podsuwnicowych.

6. Analizy nieliniowe

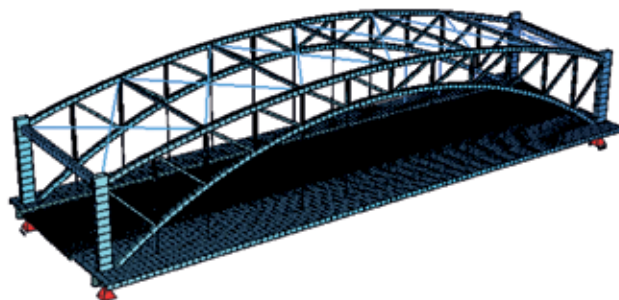
Stateczność oraz nośność graniczna analizowanej konstrukcji to tylko niektóre powody zmuszające współczesnych projektantów i analityków konstrukcji do stosowania procedur nieliniowych. Struktury wrażliwe na efekty przemieszczeń są więc analizowane z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej. Do takich struktur zaliczają się między innymi układy cięgnowe przedstawione wcześniej (rys. 2, 3, 4, 10, 13). W praktyce budownictwa mostowego analiza nieliniowa geometrycznie dla sprężystych materiałów jest w pełni uzasadniona dla konstrukcji cięgnowych. W przypadku problemów związanych ze statecznością globalną lub lokalną konstrukcji blachownicowych pełniejszy opis problemów uzyskuje się przy zastosowaniu również nieliniowości materiałowej. Nie każde oprogramowanie komercyjne MES umożliwia analizę nieliniową geometrycznie i materiałowo. Jednak systemy, które oferują tę możliwość, pozwalają również na swobodę w wyborze parametrów analizy takich, jak opis prawa materiałowego lub wybór typu procesu iteracyjnego stosowanego w analizie. W przypadku struktur metalowych istnieje ogromny dorobek w postaci badań laboratoryjnych i testów numerycznych, potwierdzający prawidłowość procedur nieliniowych i stosowanych praw materiałowych. Można zatem stwierdzić, że w zakresie modeli powierzchniowych, stosowane modele numeryczne są bliskie rzeczywistym konstrukcjom [7, 8, 9].

6.1. Stateczność w modelu prętowym

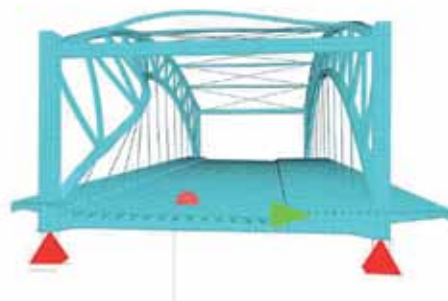
Przedstawiono przykład analizy stateczności układu prętowego. Poddano analizie model przęsła mostu stalowego z łukiem kratownicowym. Nowy obiekt to dwuprzęsłowy wiadukt drogowy o konstrukcji łukowo-kratownicowej, wizualnie podobny do innych sąsiadujących obiektów nad torami PKP. Długość całego wiaduktu wynosi 97,5 m w osiach podpór, średnia rozpiętość każdego z przęseł to 48 m. Przęsła wiaduktu są względem siebie antysymetryczne, ze względu na środkowy filar usytuowany ukośnie do osi podłużnej trasy. Rozstaw łuków kratowych wynosi 12,84 m, natomiast całkowita szerokość to 18,40 m. Model MES przęsła pokazano na rysunku 19.

Wymodelowano pojedyncze przęsło. Płytę pomostu odwzorowano powłokowo za pomocą elementów 4-węzłowych typu QUAD i elementów belkowych. Wszystkie elementy łuków kratowych (pasy dolne, pasy górne, krzyżulce, słupki), a także ramy portalowe i stężenia wygenerowano elementami belkowymi. Wykorzystano dwie metody oceny stateczności konstrukcji. Pierwsza poszukuje rozwiązania problemu własnego wyoboczenia (rys. 20). Druga to pełna nieliniowa analiza nośności (rys. 21) [10].

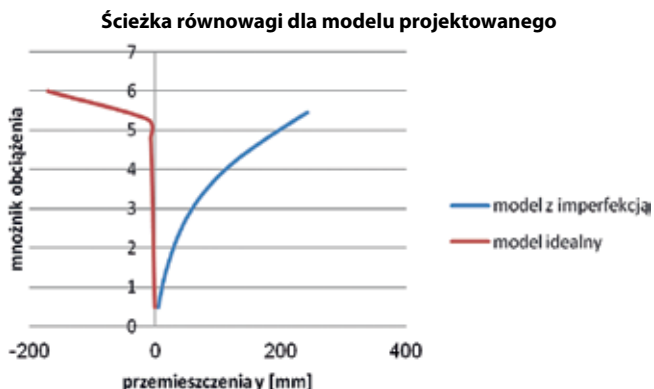
Przykład pokazuje dobrą zbieżność liniowego rozwiązania problemu własnego wyoboczenia i nieliniowej analizy nośności. Zaznacza się także wpływ imperfekcji na nośność.



Rys. 19. Model MES SOFiSTiK przęsła wiaduktu łukowego



Rys. 20. Pierwsza postać własna wyoboczenia; mnożnik krytyczny $n=5,67$

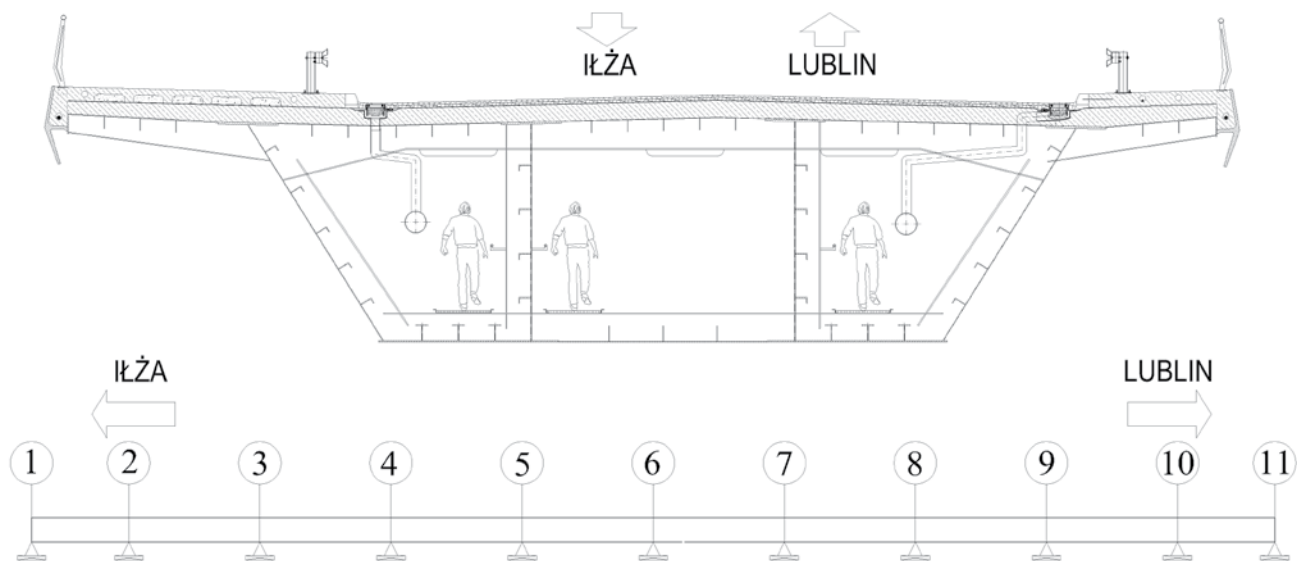


Rys. 21. Nieliniowa analiza stateczności; ścieżki równowagi

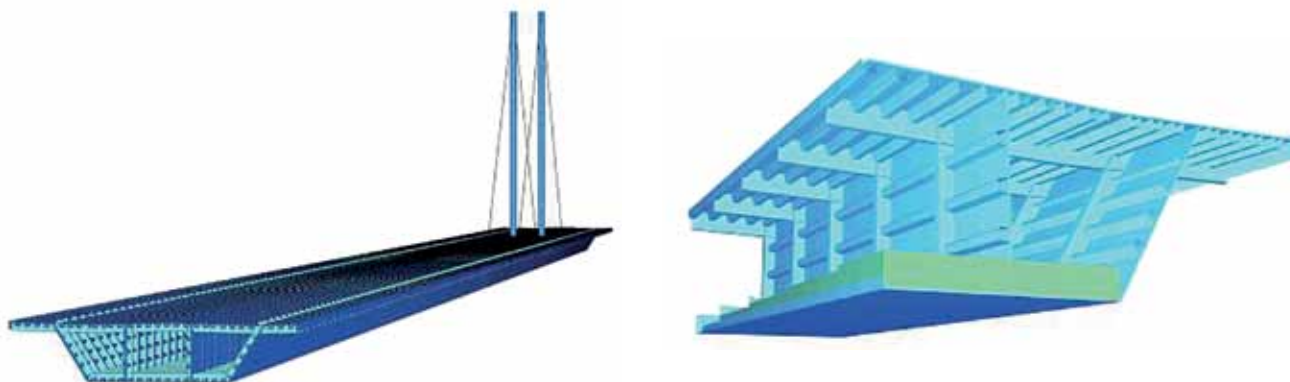
6.2. Stateczność w modelu powłokowym

Most przez Wisłę w Kamieniu [11] (woj. lubelskie) to obiekt drogowy o schemacie statycznym belki ciągłej dziesięcioprzęsłowej (80,00 + 8 × 108,00 + 80,00 m). Całkowita długość obiektu wynosi 1024,00 m. Konstrukcję nośną stanowi stalowa skrzynka trapezowa, trzykomorowa o stałej wysokości maksymalnej 3,75 m (rys. 22).

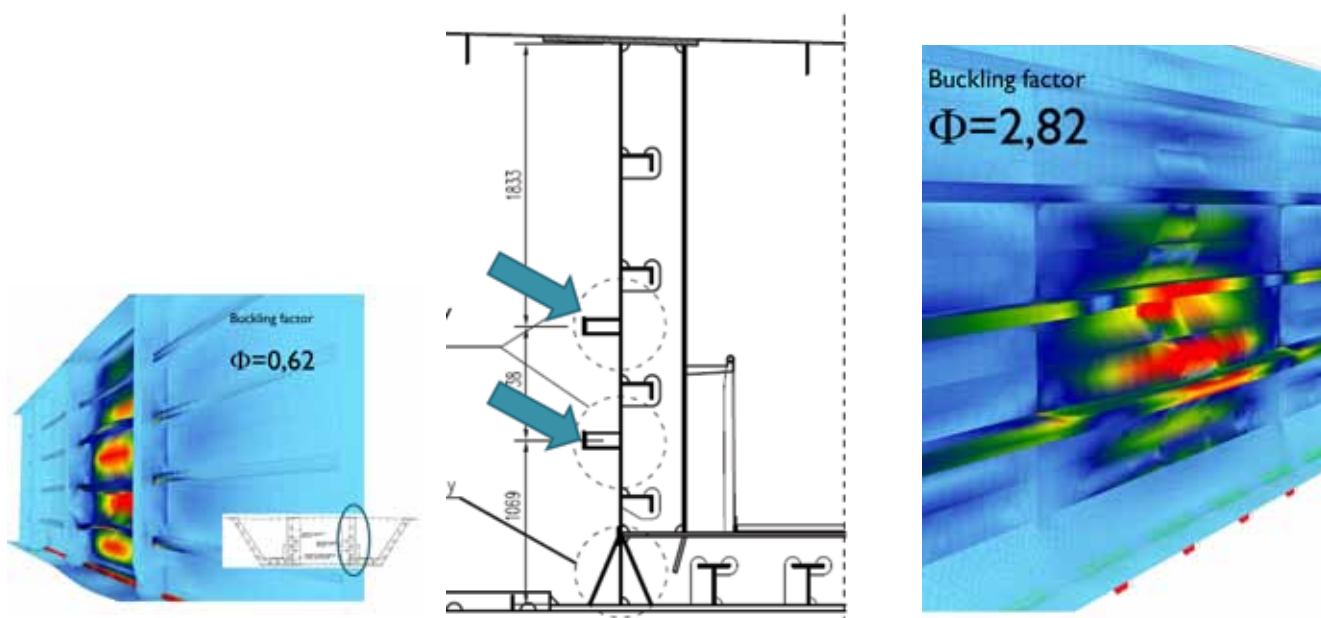
Środniki pionowe i ukośne skrzynki wykonane z blach o grubościach 10, 16, 20 lub 24 mm mają żebra z kątowników walcowanych 200×100×12 mm. Skrzynka zespolona jest z żelbetową płytą pomostu grubości 0,28 m za pomocą zgrzewanych kołków stalowych. Całkowita szerokość pomostu obiektu wynosi 19,94 m. Most został zaprojektowany na klasę obciążenia A oraz STANAG 2021 klasy 150 według PN-85-S-10030.



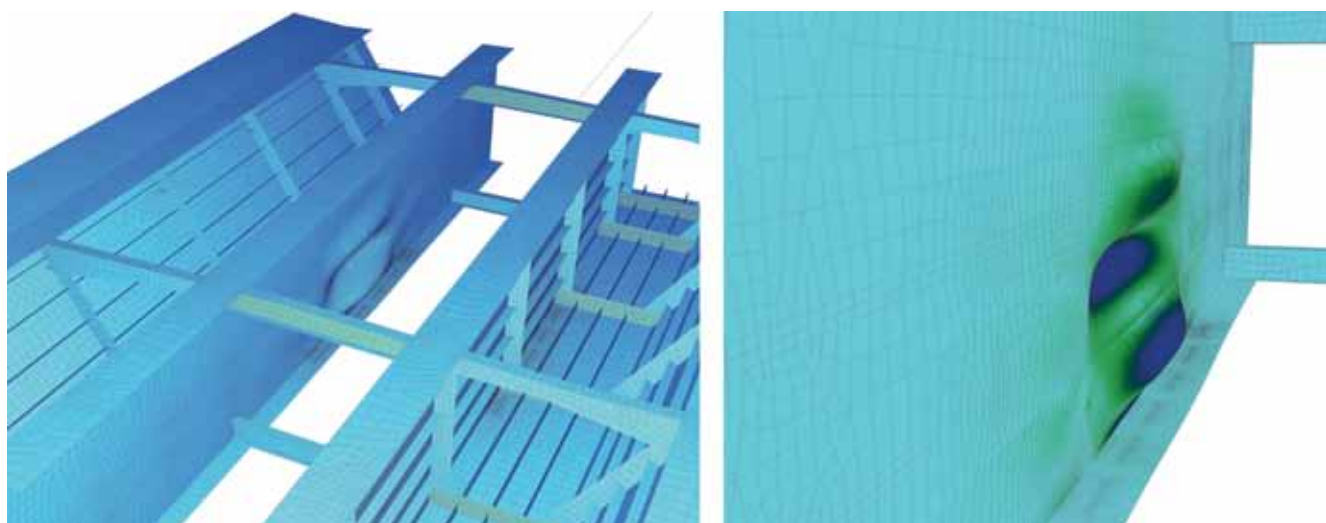
Rys. 22. Mosty przez Wisłę w Kamieniu; typowy przekrój i globalny schemat



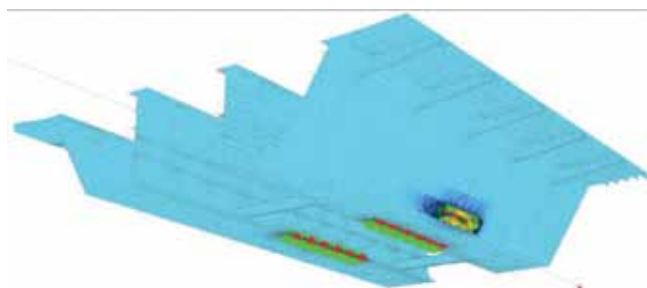
Rys. 23. Most przez Wisłę w Kamieniu; modele MES SOFISTIK



Rys. 24. Model uproszczony przed wzmocnieniem żebrami podłużnymi i po wzmocnieniu; wynik rozwiązania problemu własnego wyboczenia



Rys. 25. Model szczegółowy, łożyska bez wzmocnienia – postać wybojeniowa łożyska wewnętrznego (współczynnik wybojeniowy 1,01)



Rys. 26. Model szczegółowy, łożyska ze wzmocnieniem – postać wybojeniowa łożyska zewnętrznego (współczynnik wybojeniowy 3,03)

Zaplanowano montaż stalowej konstrukcji nośnej poprzez nasuwanie podłużne scalonych elementów konstrukcji z brzegów Wisły. Przęsła będące w fazach montażu wspornikami o maksymalnym wysięgu 108 m wzmocniono układem wantowym (rys. 23). Po wysunięciu około 36 m konstrukcji od strony łży nastąpiło plastyczne wyboczenie łożysków stalowej skrzynki. Stało to się powodem do opracowania nowej kompleksowej metody montażu, w której głównym problemem teoretycznym była stateczność miejscowa blachownicy stalowej [12, 13]. Wykonano dwa modele bazowe. Pierwszy, uproszczony zawierał tylko pionową blachownicę, pod którą znajdowały się łożyska ślizgowe. Drugi to wycinek kompletnego przęsła. Oba modele były dyskretyzowane elementami powłokowymi. Podparcie ślizgowe modelowano za pomocą chmury więzów jednostronnych. Przyjęto model sprężysto plastyczny ze wzmocnieniem dla stali S355 i uwzględniono w analizie przemieszczenia. Wynik rozwiązania problemu własnego wyboczenia dla modelu uproszczonego przed wzmocnieniem żebrami podłużnymi i po wzmocnieniu pokazano na rysunku 24. Zaznaczono otrzymany współczynnik wybojeniowy F .

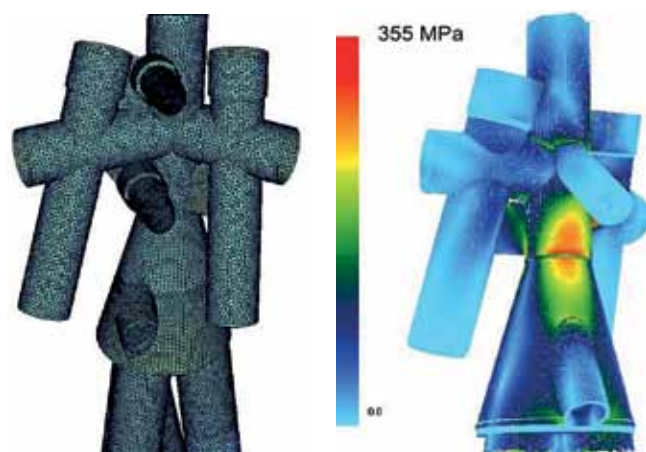
Wycinkowy model szczegółowy zawierający reprezentatywny odcinek przęsła pokazano na rysunku 25. Całość modelowano powłokowo.

Podobnie jak w układach prętowych zauważono dobrą zbieżność liniowego rozwiązania problemu własnego wyboczenia i nieliniowej analizy nośności. Zaznacza się także wpływ imperfekcji na nośność. Na podstawie wykonanych analiz zmieniono technologię nasuwania, wzmocniono łożyska pionowe przęsła i ostatecznie zrealizowano budowę bez kolejnych niespodzianek. Projekt mostu wykonało biuro Halcrow Group Sp. z o.o., ostateczny projekt technologii montażu wykonało biuro KBP Żółtowski.

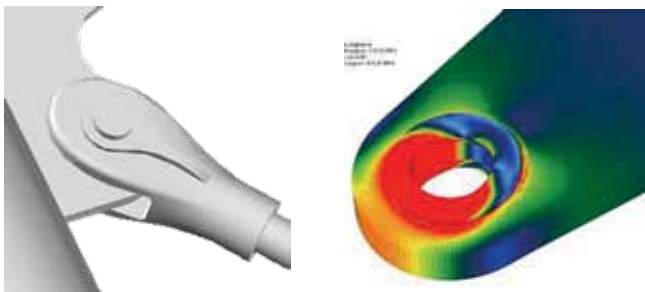
7. Wybrane modele detali konstrukcji stalowych

Zdarza się często w praktyce, że o nośności całych struktur decydują detale, których nie można wymodelować, używając prostych struktur prętowych. Wówczas bardzo pomocne stają się narzędzia numeryczne MES modelujące element za pomocą elementów powłokowych i bryłowych. Przykłady takich modeli przedstawiono w dalszej części.

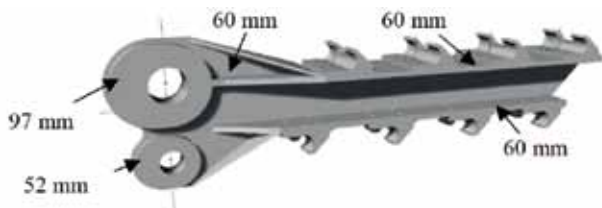
- Model głowicy pylonu zadaszania amfiteatru w Płocku (rys. 27).



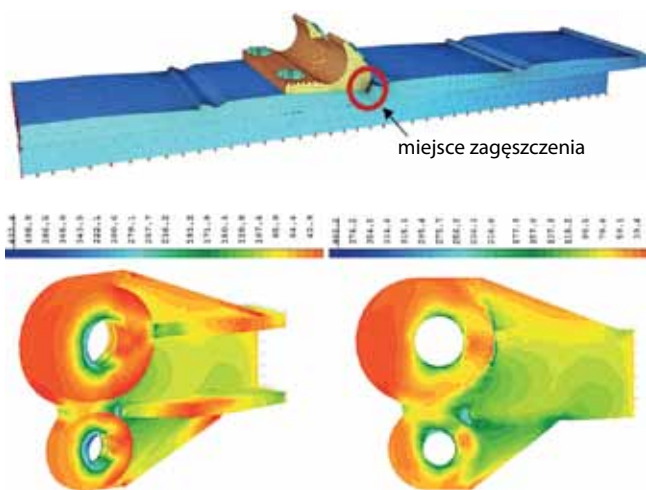
Rys. 27. Model MES głowicy pylonu amfiteatru w Płocku



Rys. 28. Analiza nośności połączenia sworzniowego w konstrukcji ENERGA Areny w Gdańsku



Rys. 29. Nowy detal połączenia pierścienia rozciąganego z linami radialnymi w konstrukcji zadaszenia Stadionu Śląskiego



Rys. 30. Nowy detal połączenia pierścienia rozciąganego z linami radialnymi w konstrukcji zadaszenia Stadionu Śląskiego; modele wycinkowe MES

Analizę detalu głowicy przeprowadzono na wniosek wykonawcy, który kwestionował nośność elementu. Wykonano całkowicie powłokowy model detalu konstrukcyjnego i przeprowadzono pełną analizę nieliniową. Potwierdza ona rażący brak nośności. W wyniku dokonano szczegółowego przeglądu konstrukcji, w której stwierdzono poważne pęknięcia. Głowice pylonów zostały wymienione.

- Model połączenia sworzniowego w konstrukcji zadaszenia ENERGA Areny w Gdańsku (rys. 28). Przedmiotem analizy było typowe połączenie sworzniowe prętów stężających strukturę. Całkowicie bryłowy model detalu konstrukcyjnego potwierdzający prawidłową

współpracę krążków policzkowych przyspawanych do blachy ucha. Przeprowadzono analizę nieliniową materiałowo z uwzględnieniem kontaktu sworznia i ucha.

- Model połączenia pierścienia rozciąganego z linami radialnymi w konstrukcji zadaszenia Stadionu Śląskiego (rys. 29). Modele wykonano na potrzeby wykonania koncepcji nowego elementu i później w celu weryfikacji projektu wykonawczego. Przeprowadzono szereg analiz nieliniowych. Zastosowano elementy bryłowe i kontaktowe.

8. Podsumowanie

Przedstawione w artykule modele numeryczne opracowano w środowisku MES SOFiSTiK [14]. Można jednak wszystkie opisane analizy przeprowadzić w dowolnym środowisku MES, mającym odpowiednie możliwości. Rozwiązanie numeryczne zagadnień statycznych i dynamicznych w technicznych problemach konstrukcji stalowych jest obecnie standardową procedurą dostępną w wielu systemach analizy konstrukcji. Należy jednak pamiętać, że kluczem do właściwej oceny zachowań konstrukcji jest znajomość obciążeń, własności materiałowych i warunków brzegowych. Należy również pamiętać, że każda symulacja numeryczna wymaga weryfikacji, której podstawą mogą być analityczne rozwiązania ściśle lub testy.

Referat był prezentowany na konferencji WPPK 2020.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Żółtowski K., O możliwościach analizy mostów stalowych, Inżynieria i Budownictwo 1–2/2009, str. 93–97
- [2] Godycki-Ćwirko T., Trykosko R., Wojdak R., Żółtowski K., Stadion piłkarski na Euro 2012 w Gdańsku Letnicy, Inżynieria i Budownictwo 10/2009, str. 535–538
- [3] Żółtowski K., Romaszkiwicz T., Roof of PGE Arena – The stadium built for Euro 2012 in Gdansk, Bauingenieur-Germany 87/2012, str. 137–142
- [4] Żółtowski K., Drawc M., Stadion Narodowy. Model statyczny do monitoringu konstrukcji, Awarie Budowlane 2015, Diagnostyka w ocenie bezpieczeństwa konstrukcji, Szczecin, Międzyzdroje, 2015
- [5] Żółtowski K., Drawc M., Stadion Śląski. Analiza wpływu wybranych imperfekcji i uszkodzeń na nośność konstrukcji zadaszenia, Awarie Budowlane 2015, Diagnostyka w ocenie bezpieczeństwa konstrukcji, Szczecin, Międzyzdroje, 2015
- [6] Żółtowski K., Waśk T., Cable stayed bridge over Vistula river in Plock. Dynamic analysis and site test. Bridges: proceedings of the International Conference on Bridges, Dubrovnik, Croatia, May 21–24, 2006/ed. J. Radic/org. Structural Engineering Conferences and Croatian Society of Structural Engineers – Dubrovnik: SECON HDGK, 2006, str. 431–438
- [7] Chróścielewski J., Makowski J., Pietraszkiewicz W., Statyka i dynamika powłok wielopłatowych. Nieliniowa teoria i metoda elementów skończonych, Biblioteka Mechaniki Stosowanej – A. Monografie, 2004
- [8] Piekarczyk M. T., Selected design problems of thin-walled steel members and connections in building structures, Politechnika Krakowska, Kraków, 2018
- [9] Żółtowski K., Kasiak M., Nośność dźwigarów pełnościennych przy zginaniu w świetle teorii klasycznych, norm i nowoczesnych analiz numerycznych, Materiały Budowlane 4/2012, str. 66–70
- [10] Żółtowski K., Misiąg M., Stateczność w ocenie nośności łukowego przęsła wiaduktu drogowego, Mosty 4/2014, str. 40–43
- [11] Żółtowski K., Drawc M., Binczyk M., Analiza nośności blachownicowej konstrukcji dźwigara skrzynkowego mostu w czasie nasuwania podłużnego, Awarie Budowlane 2015, Diagnostyka w ocenie bezpieczeństwa konstrukcji, Szczecin, Międzyzdroje, 2015
- [12] Żółtowski K., Bridge over Vistula river in Kiezmark. Practical application of nonlinear shell FEM system, Conference: SSTA 2005, At Jurata, Volume: Proceedings and Monographs in Engineering, Water and Earth Sciences – Taylor & Francis/Balkema, 2005
- [13] Żółtowski K., Binczyk M., Launching of steel girders of the bridge over the Vistula River. Development of technology with application of nonlinear FEM shell models. Conference: SSTA 2017, Shell Structures: Theory and Applications, tom 4, CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, London, 2018
- [14] Instrukcja użytkownika oprogramowania MES SOFiSTiK. www.sofistik.com