

Historia rozwoju teorii i technologii płyt i pomostów ortotropowych



tekst: KRZYSZTOF DĄBROWIECKI

Most Çanakkale 1915 w Turcji, o najdłuższym środkowym przęśle na świecie przekraczającym po raz pierwszy w historii współczesnych mostów wiszących granicę 2000 m, oficjalnie został otwarty 18 marca 2022 r. (ryc. 1). Konstrukcja mostowa o całkowitej długości 4608 m i wartości ponad 3 mld USD połączyła brzegi cieśniny Dardanele, integrując tym samym sieć komunikacji drogowej wokół morza Marmara. Jest to osiągnięcie inżynierskie i jednocześnie naukowe nie do przecenienia, dlatego zasadne wydaje się pytanie, jak stało się to możliwe i co przyczyniło się do tego spektakularnego powodzenia.

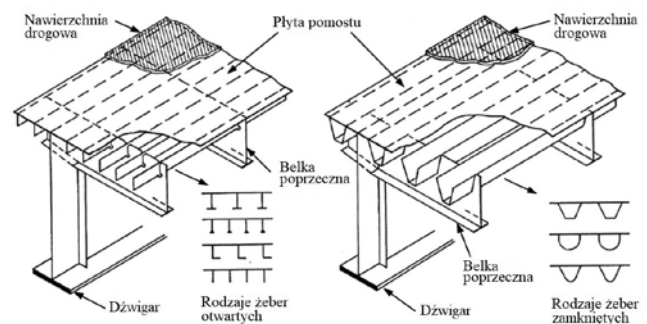


Ryc. 1. Most Çanakkale 1915, fot. Kenan, Adobe Stock

W artykule omawiającym 200-letnią historię współczesnych mostów przedstawiłem wiele wydarzeń i konstrukcji o przełomowym znaczeniu [1]. W syntetycznym podsumowaniu należy wymienić kilka budowli, np. mosty Brooklyński, Manhattan, Golden Gate, Tacoma-Narrows w Stanach Zjednoczonych czy mosty Severn i Humber w Anglii. Wszystkie one miały wielki wpływ na projektowanie, technologię wykonania i montażu bądź też po prostu na postrzeganie tych gigantycznych „rzeźb” w przestrzeni publicznej. Natomiast w artykule [2] opisałem transformację architektury usztywnień mostowych i znaczenie opływowej, skrzynkowej konstrukcji stalowych dźwigarów w rozwoju mostownictwa. Jednak postęp ten nie dokonałby się bez istotnego elementu konstrukcyjnego stalowych pomostów. Chodzi oczywiście o płytę ortotropową, której konstrukcja jest nieustannie doskonała już od 100 lat.

W tym artykule zwracam uwagę na tę ważną i niezbędną część stalowych lub kompozytowych obiektów, w szczególności współczesnych mostów kablowych. Etapy rozwoju teorii i technologii płyt ortotropowych, będących częścią większych elementów konstrukcyjnych, sekcji lub pomostów ortotropowych, w inżynierii morskiej i lądowej doprowadziły do kolejnych sukcesów inżynierów budownictwa okrętowego i lądowego.

W ogólny sposób można scharakteryzować stalową płytę ortotropową jako arkusz blachy wsparty siatką (rusztem konstrukcyjnym) wzdłużnych i poprzecznych zintegrowanych usztywnień. Usztywnieniem może być płaskownik, kątownik, teownik, dwuteownik lub uformowany kawałek blachy w kształcie korytka, np. o przekroju trapezu. Szkic płyty ortotropowej na rycinie 2 prezentuje dwa podstawowe rodzaje usztywnień – otwarte i zamknięte. Zasadniczym celem odpowiedniego rozplanowania podparcia jest zwiększenie sztywności blachy w kierunkach do siebie prostopadłych przy zredukowanej ogólnej masie konstrukcji.



Ryc. 2. Elementy stalowego pomostu ortotropowego, na podstawie American Institute of Steel Construction (AISC), 1963

Początek rozwoju teorii płyt ortotropowych mostów światowa nauka zawdzięcza przede wszystkim Maksymilianowi Tytusowi Huberowi (1872–1950), polskiemu naukowcowi i nauczycielowi wielu pokoleń studentów Politechnik Lwowskiej, Warszawskiej, Gdańskiej i Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Huber stworzył załóżek – rozwijanej w latach późniejszych przez Wacława Olszaka (1902–1980) i Witolda Nowackiego (1911–1986) – cieszącej się międzynarodowym uznaniem polskiej szkoły mechaniki stosowanej. Jako pierwszy opracował rozwiązania z zakresu statyki płyt ortotropowych oraz zademonstrował ich liczne praktyczne zastosowania w obliczeniach płyt uźebrowanych i płyt żelbetowych.

W pionierskiej pracy *Teoria płyt prostokątnie różnokierunkowych wraz z technicznymi zastosowaniami do płyt betonowych* (1921) [3] przedstawił teorię płyty, która stała się podstawą do dalszych modernizacji w następnych latach (ryc. 3). We wstępie, nawiązując do badań wielu niemieckich i rosyjskich naukowców (August Föppl, Arpád Nádai, Heinrich Hencky, Ernst Leitz, Ivan Bubnow, Stephen Timoshenko, Boris Galerkin) opracowujących teorię w tej dziedzinie, pisał: „Ale ta teoria nie da się w ogóle stosować do płyt żel. betonowych, ponieważ sztywność przy zginaniu takiej płyty może zależnie od uzbrojenia mieć bardzo różne wartości w przekrojach o rozmaitych kierunkach. Z tego powodu rozwinę w niniejszej pracy ogólną teorię płyt żel. betonowych drogą możliwie elementarną i zastosuję ją w niektórych praktycznie ważnych przypadkach płyty prostokątnej. Szczególną uwagę poświęcę nadto ważnej kwestyi »współdziałania płyty« u belek o przekroju T (belek płytowych lub płyt z żebrami), ponieważ to zagadnienie nie było, jak się zdaje, dotychczas traktowane ani teoretycznie, ani też doświadczalnie”.

W kolejnych rozdziałach pracy, po omówieniu ogólnej teorii prostego zgięcia belek i płyt, Huber przedstawia i analizuje płytę prostokątną o zróżnicowanym podparciu, a więc swobodnie podpartą na całym obwodzie bardzo długą płytę o równoległych brzegach, swobodnie podpartą oraz utwierdzoną na dwóch brzegach. Zajmuje się kwestiami współdziałania płyty z belką płytową i ich podparciem, uproszczonym, ale ścisłym, jak to określa, rozwiązaniem problemu płyty prostokątnej. Opracowanie to znalazło uznanie w szerokim kręgu teoretyków i badaczy tamtego czasu, jak również stało się odniesieniem do nowo powstających opracowań, a także nierzadko cytowane jest w wielu współczesnych pracach dotyczących rozwiązań płyt ortotropowych.



Ryc. 3. Pierwsze wydanie *Teorii płyt* Maksymiliana T. Hubera, 1921

Istota nowego podejścia Hubera do obliczania płyt polegała na opracowaniu teorii płyt żelbetonowych zbrojonych dwukierunkowo i wyprowadzeniu równania różniczkowego na ich ugięcie pod wpływem zadanej siły $p(x,y)$. W równaniu uwzględnił, z uwagi na założone obciążenie, współczynniki sztywności zginania płyty: D_x poprzeczny do osi mostu i D_y wzdłuż osi mostu oraz H – efektywną sztywność skrętną.

$$D_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2H \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = p(x,y)$$

gdzie:

$H = 0,5 (4C + \mu_y D_x + \mu_x D_y)$ – efektywna sztywność skrętna,

C – sztywność skrętna,

μ_x – odkształcenie poprzeczne spowodowane prostopadłym naprężeniem w kierunku x ,

μ_y – odkształcenie poprzeczne spowodowane prostopadłym naprężeniem w kierunku y .

W latach 1923–1926 Huber publikował swoje prace na temat teorii płyt w berlińskim czasopiśmie inżynierskim „Der Bauingenieur” i dał na ten temat szereg wykładów, m.in. w Zurychu. Wydaje się, że z tego powodu zmiana nazwy płyt ortogonalnie anizotropowych na skrótowe określenie płyt ortotropowych szybko się przyjęła. Mniej szczęścia w uznaniu zasług Hubera w dziedzinie teorii plastyczności miało opracowane przez niego kryterium wyężenia materiału, opublikowane tylko w lwowskim „Czasopiśmie Technicznym” – *Właściwa praca odkształcenia jako miara wyężenia materiału* (1904).

Rozprawa ta bardzo długo nie była tłumaczona z języka polskiego, więc tym samym nie była znana w światowych kręgach teoretyków i naukowców. Dlatego powszechnie zaczęto stosować w obliczeniach wytrzymałościowych opracowane przez austriackiego matematyka Richarda von Misesa (1883–1953) kryterium maksymalnego odkształcenia materiałów ciągliwych. Rycina 4 przedstawia uczestników Pierwszego Polskiego Zjazdu Matematycznego we Lwowie (1927), w gronie wybitnych naukowców był także Huber.

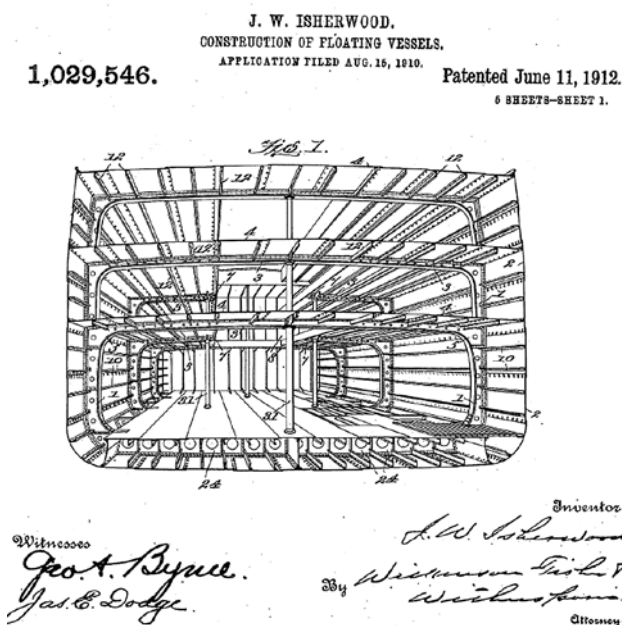
Dotychczasowe obliczenia płyt były prowadzone głównie metodą Franza Grashofa (1826–1893). Prostokątna płyta dzielona była na dwa prostopadłe pasy, a odpowiednie odkształcenia



Ryc. 4. Pierwszy Polski Zjazd Matematyczny, Lwów, 7–10 września 1927 r., fot. za: Ciesielska D., Maligranda L.: *Alfred Rosenblatt (1880–1947)*. „Wiadomości Matematyczne” 2014, t. 50, nr 2, s. 221–259

i siły wewnętrzne w pasach płyty były obliczane w kierunkach prostopadłych w punktach przecięcia na podstawie warunku równości ugięcia z teorii belki (1878). Metoda ta nie zawierała jednak elementu skręcania, który uwzględnił Huber.

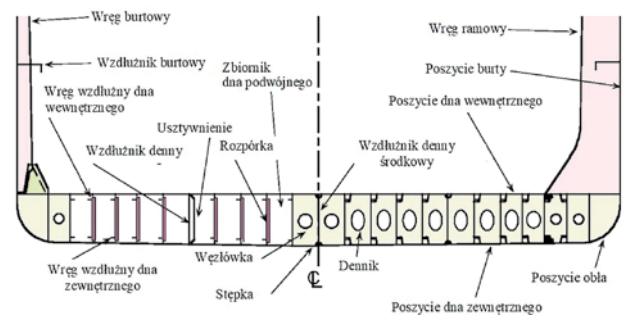
W pierwszych latach XX w. nastąpiła dość nietypowa sytuacja w nauce, ponieważ praktyka znacznie wyprzedziła teorię w dziedzinie stalowych płyt o dużych rozmiarach. Praktyczne rozwiązania usztywnionych elementów konstrukcyjnych zastosowane zostały po raz pierwszy w budownictwie okrętowym. Inicjatorem wykorzystania systemu ram w celu zintegrowania stalowej płyty z żebrami wzdłużnymi i poprzecznymi był Joseph W. Isherwood (1870–1937). W amerykańskim patencie (US1029546) wydanym w 1912 r. przedstawia przedziały ładowni statku, przekroje poprzeczne i wzdłużne z zaznaczeniem usztywnień na dnie, burtach i pokładach (ryc. 5).



Ryc. 5. Amerykański patent Josepha W. Isherwooda

W opisie patentu stwierdził m.in.: „Niniejszy wynalazek dotyczy ulepszeń w konstrukcji kadłuba statków pływających wszystkich typów, a jego celem jest połączenie lekkości konstrukcji z dużą wytrzymałością i odpornością na wszelkie tendencje do podłużnych wygięć lub wyboczeń, którym zwykle poddawane są statki na morzu” [4]. Oprócz praktycznych szkiców obrazujących wynalazek Isherwood nie przedstawił obliczeń wytrzymałościowych kadłuba statku, skupiając się wyłącznie na wprowadzeniu usztywnień ramowych zapewniających, jak twierdził, oszczędności materiałowe. Od drugiej dekady XX w. system rozwiązań konstrukcyjnych Isherwooda dla projektowania statków, uzupełniony badaniami wytrzymałościowymi, stał się normą początkowo dla statków do przewozu towarów masowych, a następnie dla tankowców. Szczegółowe prace naukowe były prowadzone w okresie międzywojennym przez grupę niemieckich profesorów (Georg Schnadel, Fritz Horn, Hermann Föttinger, Hans Jacob Reissner) w Wyższej Szkole Technicznej w Berlinie (Königliche Technische Hochschule), która opracowała i wyznaczyła międzynarodowe standardy w budownictwie okrętowym. Jednym ze studentów w tamtym czasie był Henry Schade (1900–1992), amerykański inżynier budowy okrętów i absolwent MIT. Schade, studiując w Berlinie w latach

1936–1937 pod kierunkiem prof. Schnadela, przeprowadził badania nad wytrzymałością konstrukcji okrętowych i przedstawił je w rozprawie zatytułowanej *Statik des Schiff-Bodens unter Wasserdruck* (1937, tłum. pol. *Statyka dna statku pod wpływem ciśnienia wody*). Tłumaczenie tej pracy na język angielski – *Theory of Motions of Craft in Waves* – zostało opublikowane w 1950 r. przez Uniwersytet w Berkeley. Konkluzje tej rozprawy stały się wytycznymi do projektowania okrętów amerykańskich. Schade m.in. wykorzystał teorię płyt ortotropowych do usztywnienia płyt stalowych ze szczególnym uwzględnieniem konstrukcji dna statku i stalowych pokładów na budowanych amerykańskich lotniskowcach. Wykreślił szereg krzywych projektowych do obliczania maksymalnych ugięć, momentów zginających i sił ścinających w płytach, których krawędzie były swobodnie podparte lub zamocowane. Wykonał obliczenia dla różnych wartości sztywności, w tym również na skręcanie. Przykładową współczesną konstrukcję statku przedstawia rycina 6. Jest to konstrukcyjny przekrój poprzeczny statku według Polskiego Rejestru Statków (2020), który w obrębie podwójnego dna ilustruje podobieństwo strukturalne do teraźniejszych zamkniętych sekcji mostów kablowych [5].

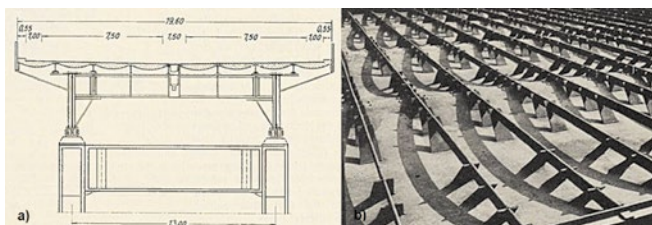


Ryc. 6. Typowy przekrój poprzeczny drobnicowca według Polskiego Rejestru Statków

Karl-Eugen Kurrer w książce *The History of the Theory of Structure* (2008) [6] m.in. przedstawia podejście inżynierów budownictwa lądowego w Niemczech do projektowania mostów drogowych. Do końca lat 30. XX w. elementy konstrukcyjne, takie jak żelbetowe pokłady mostów, usztywnienia wzdłużne, dźwigary główne i poprzeczne, uważano za działające niezależnie z konstrukcyjnego punktu widzenia. Taka orientacja prowadziła do wysokiego zużycia stali. Wprowadzenie nitowania, a następnie spawania mostów stalowych oraz nałożenie rygorów oszczędności na zużycie stali w sektorze cywilnym w okresie zbrojenia się Niemiec w latach 30. i 40. XX w. wymusiły na inżynierach wprowadzenie nowych rozwiązań konstrukcyjnych w projektowaniu i budowie stalowych mostów drogowych. Głównym celem było wsparcie ekonomii przez zastosowanie stali do budowy mostów drogowych o zmniejszonej masie. Według Karla Schaechterlego (1879–1971), w tamtym okresie głównego inżyniera odpowiedzialnego za budowę mostów drogowych w Badenii i Wirtembergii, jednym ze sposobów zmniejszenia masy było zastosowanie pomostu wykonanego z kratownic belkowych pokrytych płaskimi arkuszami blachy. Przykładem jest most drogowy zbudowany w 1936 r. przez firmę MAN (Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg) w miejscowości Denkendorf w ciągu autostrady A8 Stuttgart – Ulm. Jego konstrukcja zawierała wszystkie istotne cechy konstrukcyjne, jakimi po wielu latach doświadczeń budowlanych zaczęły charakteryzować się płyty ortotropowe firmy MAN (ryc. 7 i 8).



Ryc. 7. Most Sulzbachtal w Denkendorf, 1936



Ryc. 8. Most Sulzbachtal – detale konstrukcyjne pomostu

W tych też latach zaczęły pojawiać się publikacje dotyczące lekkich stalowych pomostów drogowych takich autorów, jak m.in. Gottwald Schaper, Karl Schaechterle [7], Fritz Leonhardt oraz Otto Graf. Fritz Leonhardt (1909–1999), uczeń Schaechterlego, napisał rozprawę na temat obliczeń kraty belkowej podpartej z dwóch stron. Ewolucja lekkiego, stalowego pomostu drogowego w płytę ortotropową pod koniec lat 40. XX w. spowodowała przejście od teorii siatki belek do teorii płyty ortotropowej w latach 50. XX w. I tutaj z dużą pomocą przyszła teoria Hubera, opublikowana w niemieckim czasopiśmie „Der Bauingenieur” (1923) w artykule *Teoria płyt żelbetowych poprzecznie zbrojonych wraz z zastosowaniami do kilku ważnych konstrukcyjnie problemów dotyczących płyt prostokątnych*. W latach 50. XX w. wykorzystał i jednocześnie udoskonalił ją Wilhelm Cornelius (1915–1996). Kolejne zmiany konstrukcyjne pomostów drogowych w Niemczech zostały udokumentowane opracowaniami i patentami m.in. firmy MAN (DE733497/1936, DE847014/1948), w której pracował Cornelius. Był on autorem pierwszego patentu dotyczącego płyt ortotropowych mostów drogowych. W opisie zgłoszonego wynalazku uzasadniał, że płyta pomostu drogowego jest częścią dźwigara głównego, poprzecznych i ciągłych usztywnień wzdłużnych, ponieważ tworzą wspólnie górny pas konstrukcyjny, a rozstaw żeber poprzecznych może być mniejszy od rozstawu dźwigarów głównych. Cornelius w patencie (ryc. 9) pisał: „Wynalazek ma obecnie na celu dalsze zmniejszenie ciężaru stali w porównaniu ze znanymi mostami drogowymi i polega na tym, że w moście drogowym płaska blacha działa jak pas dla podłużnych dźwigarów głównych i jest wzmocniona poprzecznymi żebrami pomiędzy podłużnymi głównymi dźwigarami, odległość między żebrami poprzecznymi jest rzędu szerokości efektywnej. Płyta jezdni spełnia zatem wymagania teorii płyty ortogonalnie anizotropowej, która to teoria, zgodnie z aktualnym stanem obliczeń ustrojów nawierzchni, sama w sobie pozwala na ekonomiczne wykorzystanie wszystkich rezerw nośnych zawartych w płycie jezdni. Ze względu na małe odstępki między poprzecznymi żebrami, które są wymagane, w rezultacie nie są one zaprojektowane jak zwykłe belki poprzeczne, ale są znacznie słabsze. Stężenia poprzeczne stosuje się tylko w większych odstępach w postaci kratownic lub pełnych dźwigarów ściennych, których głównym zadaniem jest przede wszystkim poprzeczny rozkład obciążeń pomiędzy dźwigarami głównymi oraz stabilizacja dźwigarów głównych”.

DEUTSCHES PATENTAMT
PATENTSCHRIFT

Nr. 847 014

KLASSE 19d GRUPPE 5 05

p 2168 I / 19 d D

Dr.-Ing. Wilhelm Cornelius, Gustavsburg (Hess.)
ist als Erfinder genannt worden

Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg A. G., Zweigniederlassung,
Nürnberg

Straßenbrücke mit Flachblech

Patentiert im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland vom 2. Oktober 1948 an
Patentanmeldung bekanntgemacht am 15. Juni 1950
Patenterteilung bekanntgemacht am 19. Juni 1952

Ryc. 9. Niemiecki patent Wilhelma Corneliusa

Po pracach i patentach Corneliusa pojawiły się dalsze rozprawy dotyczące teorii płyt ortotropowych takich autorów, jak F.M. Mader, Ernst Giencke, Kurt Klöppel i Richard Schardt. Mader i Giencke zajmowali się nieciągłością dźwigarów poprzecznych i rozważali ortotropowy pomost jako układ kompozytowy składający się z kontinuum Hubera i nieciągłych dźwigarów poprzecznych. Giencke analizował m.in. płytę z korytkowym żebrzem usztywniającym. To rozwiązanie stało się idealne w połowie lat 60. XX w. dla firmy Krupp, która wprowadzała na dużą skalę maksymalną standaryzację produkcji stalowych elementów konstrukcyjnych. W 1967 r. Giencke sformułował udoskonaloną metodę obliczania płyt ortotropowych. Trzy lata później wraz z J. Petersenem opublikował metodę obliczania płyt ortotropowych podatnych na siły ścinania.

Wielu inżynierów eksperymentowało z różnymi koncepcjami formowania, walcowania lub gięcia płaskiej blachy stalowej w celu uzyskania optymalnej konstrukcji wzmocnień. Usztywnienie żebrze w kształcie trapezu zostało uznane przez inżynierów i światowy przemysł stalowy za najbardziej praktyczne.

W tym samym czasie niemiecki przemysł przestawił produkcję lekkich kształtowników grodzic z walcowanych na gorąco na walcowane na zimno, co umożliwiło dalszą standaryzację głębokich profili trapezowych z belkami poprzecznymi. W następnej kolejności wprowadzenie automatycznych instalacji i systemów spawalniczych w halach i na placach montażowych zapewniło uzyskanie dobrej jakości i odpowiedniej penetracji spoin łączących materiałów arkuszy blach z usztywnieniami.

Równocześnie z rozwojem technik produkcyjnych nastąpił progres w zakresie inżynierskich modeli i metod obliczeniowych z wykorzystaniem komputerów. W 1964 r. Richard Hugo Gallagher (1927–1997) opublikował pierwszą książkę w dziedzinie analizy inżynierskiej *A Correlation Study of Matrix Methods of Structural Analysis*. W pracy tej rozszerzył praktykę analizy elementów skończonych z dwuwymiarowej do trójwymiarowej analizy, od analizy liniowej do analizy nieliniowej oraz od zastosowań lotniczych do zastosowań inżynierskich. Opracowania stworzonej przez niego grupy wybitnie utalentowanych naukowców i inżynierów dotyczyły szerokiego spektrum analiz z różnych dziedzin: analizy macierzy, analizy rakiet, dynamiki, analizy niesprężystości, a także optymalizacji konstrukcji. W tym samym



Ryc. 10. Przykład sekcji pomostu stalowego, US Department of Transportation

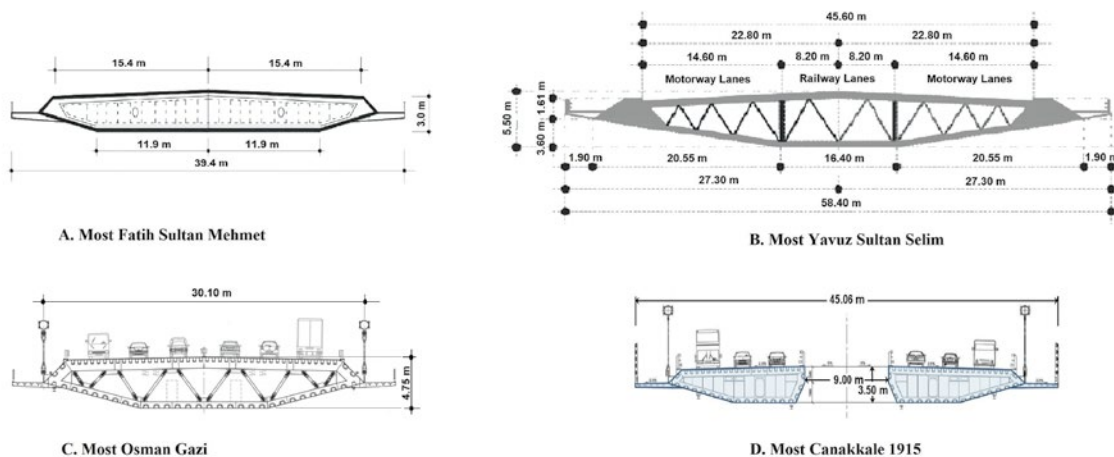
roku Olgierd C. Zienkiewicz (1921–2009), brytyjski uczyony polskiego pochodzenia, wspólnie z Yau K. Cheungiem, doktorantem na wydziale Zienkiewicza, opublikowali w czasopiśmie „Institution of Civil Engineers” (ICE) artykuł *The finite element method for analysis of elastic isotropic and orthotropic slabs* [8]. W publikacji napisali: „Metoda elementów skończonych została rozszerzona o zagadnienia zginania płyt. Prostota sformułowania i radzenia sobie z warunkami brzegowymi pozwala na rozwiązywanie trudnych do tej pory problemów płyt o zmiennej grubości oraz płyt ortotropowych. Płyta może być bez trudu uwzględniona w analizie bardziej złożonej konstrukcji obejmującej inne typy prętów (takich jak belki, słupy itp.). Podano kilka ilustrujących przykładów, aby pokazać osiąganą dokładność i zakres problemów, które można rozwiązać za pomocą tej metody”.

Zienkiewicz we współpracy z Gallagherem założył w 1969 r. czasopismo poświęcone głównie metodom analizy elementów skończonych „International Journal for Numerical Methods in Engineering”. Redaktorzy (Zienkiewicz, Gallagher) w pierwszym numerze tak m.in. uzasadniali powstanie magazynu: „Deklarowanym celem naszego czasopisma jest odwrócenie preferencji dla ograniczonych rozwiązań »formy zamkniętej« i zachęcenie do bardziej ogólnych technik numerycznych. To, samo w sobie, w dużym stopniu uzasadnia nową publikację. Jednak motywacja jest głębsza. Komputer jest obecnie nieodzowną częścią życia w szerokim zakresie działań inżynierskich: inżynieria lotnicza, elektronika, a nawet praca wielu inżynierów mechaników i inżynierów lądowych jest już nie do pomyślenia bez jego udziału. We wszystkich tych

gałęziach opracowywane są nowe procesy obliczeniowe z pomocą i bez pomocy analizy numerycznej. Często jakiś elegancki proces prowadzi do niepowodzenia, podczas gdy inny, choć surowy w koncepcji, wykazuje zaskakujący sukces. W tym czasopiśmie oba są do zaakceptowania. Inżynierowie wszystkich dziedzin będą mieli szansę zebrać swoją wiedzę i wspólnie czerpać korzyści ze swoich sukcesów, a także ze swoich błędów, pod warunkiem, że uda się zrekrutować autorów o wystarczającej odwadze”.

W rezultacie rozwoju cyfrowych technik obliczeniowych związanych z analizą i optymalizacją konstrukcji oraz zmianami technologicznymi w procesach prefabrykacji w ostatnim półwieczu doszło do powstania ortotropowego pomostu typowego dla współczesnych mostów kablowych (ryc. 10). Doskonałym przeglądem postępu tych zmian oraz wypracowanego doświadczenia w budowie długoprzęsłowych ortotropowych konstrukcji są mosty tureckie: I most Bosforski (1973), Fatih Sultan Mehmet (II most Bosforski, 1988), Yavuz Sultan Selim (III most Bosforski, 2016), most Osmana Gazi (2016) oraz najnowszy, rekordowej długości most Çanakkale 1915 (2022), który jest najdłuższym na świecie mostem wiszącym z ortotropowym pomostem stalowym, o długości przęsła środkowego 2023 m [9].

Przedstawione na rycinie 11 zestawienie w sposób przejrzysty ukazuje, że główne zasady projektowania i budowy dźwigarów ortotropowych mostów wiszących generalnie nie zmieniły się od lat 70. XX w. W opinii niektórych inżynierów ten rodzaj rozwiązań osiągnął granice możliwości technicznego rozwoju. Z tego powodu pomimo niezaprzeczalnych zalet ortotropowych stalowych pomostów skrzynkowych, takich jak dobre właściwości aerodynamiczne, zmniejszony ciężar w porównaniu do usztywnień kratownicowych, opanowane i zautomatyzowane procesy technologiczne czy tania produkcja, wzrasta liczba naukowców i inżynierów wyrażających pogląd, że potrzebne jest nowe podejście do analizy tych konstrukcji, a w rezultacie nowe rozwiązania. Odnosi się to przede wszystkim do mostów o znacznie większej długości przęsła niż most Çanakkale 1915, do konstrukcji kablowych o długości przęsła powyżej 3000 m. W tym kontekście inspirująca jest rozprawa Madsa Baandrupa „Innovative Design of Steel Girders in Cable-Supported Bridges by Application of Numerical Optimization Methods” (2019) [10]. Jest to podsumowanie badań przedstawionych w cyklu artykułów opublikowanych we współpracy z naukowcami Duńskiego Technicznego Uniwersytetu i inżynierami duńskiej firmy projektowej COWI. Głównym przesłaniem tego opracowania, jak pisze autor, „jest zidentyfikowanie nowych i innowacyjnych koncepcji

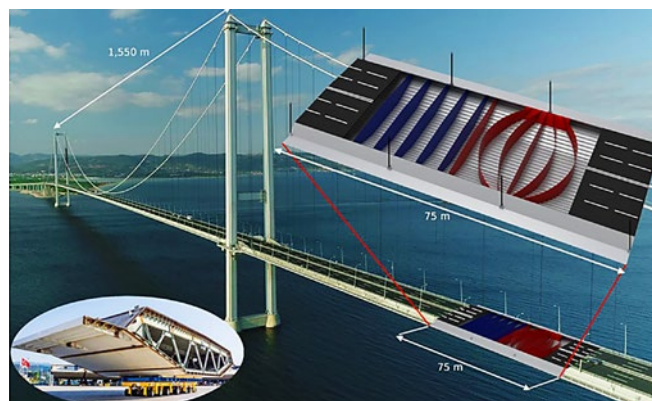


Ryc. 11. Zestawienie przekrojów poprzecznych ortotropowych tureckich mostów wiszących

projektowych dla stalowych dźwigarów w mostach kablowych, z naciskiem na zmniejszenie ciężaru własnego przy jednoczesnym zachowaniu innych właściwości, takich jak wytrzymałość i trwałość. Odbyna się to poprzez zastosowanie różnych metod numerycznych do przeprowadzenia optymalizacji strukturalnej”.

Baandrup objaśnia, że optymalizacja numeryczna została użyta jako sposób identyfikacji innowacyjnych rozwiązań dźwigarów mostowych. W badaniach zastosowano trzy rodzaje metod optymalizacji konstrukcji: parametryczną, kratownicową oraz optymalizację topologiczną struktur ciągłych. Ponadto posłużono się dwiema numerycznymi metodami analizy strukturalnej: metodą elementów skończonych (FEM) oraz analizą granicy elementów skończonych (FELA). W badaniach na przykładzie konstrukcji fragmentu dźwigara mostu Osman Gazi w Turcji, projektowanego przez duńską firmę COWI, przeprowadzono optymalizację fragmentu pomostu z wykorzystaniem francuskiego superkomputera Joliot-Curie. W rezultacie przeprowadzonej optymalizacji użyty program komputerowy przedstawił idealne rozwiązanie badanej sekcji pomostu. Na jej podstawie Baandrup wraz zespołem opracowali wykonalną w zakresie realnych kosztów koncepcję budowy ortotropowego pomostu. Innowacyjna konstrukcja składa się z dźwigara wykonanego z wiązek zakrzywionych blach stalowych, które są cieńsze w porównaniu z prostymi i grubszyimi blachami stanowiącym konwencjonalne rozwiązanie (ryc. 12). Baandrup wyjaśnił, że „oprogramowanie [komputerowe] identyfikuje optymalną strukturę, ale nie bierze pod uwagę tego, czy rzeczywiście można ją zbudować” i dalej konkluduje: „Zakrzywione płyty przenoszą obciążenia z pomostu znacznie bardziej bezpośrednio na wieszaki niż tradycyjne dźwigary stalowe. Właśnie dlatego zaprojektowane w ten sposób mosty mogą być konstruowane o dłuższych przęsłach niż mosty standardowe, wymagając przy tym mniej materiału. W rzeczywistości nowa konstrukcja zmniejsza zużycie stali o 28 %, co skutkuje redukcją emisji CO₂ o podobnej wielkości”. Niewątpliwą zaletą optymalizacji topologicznej jest to, że można ją zastosować w innych, niekoniecznie mostowych projektach dużych konstrukcji, aby zmniejszyć zużycie stali i betonu. Dodatkowo oprócz oszczędności materiałowych autor opracowania w podsumowaniu zwraca uwagę na ekologię, pisząc: „Nasze wyniki pokazują ogromny potencjał w uczynieniu budownictwa bardziej ekologicznym. W przyszłości branża budowlana powinna nie tylko myśleć o tym, jak obniżyć koszty, ale także o tym, jak zmniejszyć zużycie energii i emisję CO₂. Wierzymy, że dzięki naszym wynikom możemy zainicjować tę dyskusję”.

Henry Petroski w książce *Engineers of Dreams* (1995) [11], podsumowując dokonania inżynierów w minionych latach, zwraca uwagę na istotny czynnik powodzenia innowacji mostowych, powołując się na doświadczenie wielkiego budowniczego mostów Othmara Ammanna. Jest nim element szczęścia i mieszcząca się w nim nadarząca się potrzeba budowy nowych, nierzadko pionierskich konstrukcji. Petroski pisze: „Chociaż znajomość zasad konstrukcyjnych jest oczywiście niezbędna w takim przedsięwzięciu, wycucie historii pozwala inżynierom osądzać, jak »skutecznie« śnić. Nawet jeśli marzenia łatwo przychodzą marzycielom, urzeczywistnianie marzeń opiera się na ocenie, która jest mocno oparta na doświadczeniu tego, co można, a czego nie można zrobić technicznie, oraz na wierze w to, co w danym czasie jest możliwe z ludzkiego i ekonomicznego punktu widzenia”. Najlepszym przykładem takiego niespełnionego marzyciela był niewątpliwie angielski inżynier William Brown (1928–2005) z opatentowaną przez niego wersją konstrukcji mostu przez Cieśninę Mesyńską między Sycylią



Ryc. 12. Innowacyjne rozwiązanie pomostu według Madsa Baandrupa i Nielsa Aage'a

a Kalabrią. Natomiast przykładem spełnionego marzyciela, oprócz Ammanna, wydaje się Santiago Calatrava ze śmiałyymi i w dużym stopniu nowatorskimi konstrukcjami architektonicznymi.

W tym kontekście warte uwagi jest podejście duńskiej firmy COWI A/S do konfrontowania się z nowymi konstrukcyjnymi wyzwaniami. Opiera się ono na połączeniu wiedzy i praktyki w projektowaniu rekordowej długości mostów wiszących (Osman Gazi, Çanakkale 1915) z entuzjazmem i innowacyjnością młodych inżynierów oraz z zastosowaniem współczesnych numerycznych metod analiz inżynierskich.

Literatura

- [1] Dąbrowiecki K.: *Dwustuletnia historia rozwoju nowoczesnych mostów wiszących, cz. 1. Wiek XIX. „Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie” 2020, nr 2, s. 100–106; cz. 2. Wiek XX. 2020, nr 4, s. 90–96; cz. 3. Wiek XXI. 2020, nr 5, s. 100–109.*
- [2] Dąbrowiecki K.: *Ewolucja usztywnienia nowoczesnych mostów wiszących. „Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie” 2021, nr 1, s. 74–80.*
- [3] Huber M.T.: *Teoria płyt prostokątne różnokierunkowych wraz z technicznymi zastosowaniami do płyt betonowych.* Towarzystwo Naukowe. Lwów 1921.
- [4] Materiały amerykańskiego biura patentowego.
- [5] Materiały Polskiego Rejestru Statków. Gdańsk 2020.
- [6] Kurrer K.: *The History of the Theory of Structures.* Ernst & Son. Berlin 2008.
- [7] Schaechterle K.: *Die Sulzbachtal brücke bei Denkendorf. „Die Bautechnik” 1936, Jg. 14, H. 36, S. 497–512.*
- [8] Zienkiewicz O., Cheung Y.: *The finite element method for analysis of elastic isotropic and orthotropic slabs. „Proceedings of the Institution of Civil Engineers” 1964, Vol. 28, Issue 4, pp. 471–488.*
- [9] Apaydin N., Bas S.: *Long-Span Orthotropic Steel Deck Bridges of Turkey.* Proceedings of 9th International Symposium on Steel Bridges, 2018.
- [10] Baandrup M.: *Innovative Design of Steel Girders in Cable-Supported Bridges – By application of numerical optimization methods.* Praca doktorska, Technical University of Denmark, 2019.
- [11] Petroski H.: *Engineers of Dreams.* Vintage Books. New York 1996.
- [12] Materiały tureckiej telewizji NTV, luty 2022.
- [13] *Manual for Design, Construction, and Maintenance of Orthotropic Steel Deck Bridges.* US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington DC, 2012.

