

KSZTAŁTOWANIE FORM MEBLI O SCHEMATACH SWOBODNIE PODPARTYCH KRZYWYCH BELEK I WSPORNIKÓW PRZYŁĄCZONYCH DO KOŃCÓW BELEK

Agata Kozikowska

Politechnika Białostocka, Wydział Architektury, ul. O. Sosnowskiego 11, 15-893 Białystok
E-mail: a.kozikowska@pb.edu.pl

SHAPING FURNITURE FORMS OF SCHEMES OF SIMPLY SUPPORTED CURVED BEAMS AND CANTILEVERS ATTACHED TO BEAM ENDS

Abstract

The paper analyses the effect of furniture bar and plate shapes on heights of their cross-sections adjusted to furniture structural behaviour. Furniture with static schemes of simply supported curved beams and curved cantilevers attached to the beam ends are considered. Such structures primarily must resist bending stresses under gravitational loads. Many examples of adjusting heights of furniture cross-sections to bending moment envelopes have been shown for the most unfavourable load cases. The paper is addressed to architects with an interest in understanding the relationship between forms and load-bearing properties of these furniture pieces and in shaping optimal forms on the basis of this knowledge.

Streszczenie

Artykuł zawiera analizę wpływu kształtów prętów i płyt mebli na wysokości ich przekrojów dostosowane do sposobu pracy konstrukcji tych mebli. Badane meble mają schematy statyczne swobodnie podpartych krzywych belek i wsporników utwierdzonych w końcach belek. Praca takich konstrukcji polega przede wszystkim na przenoszeniu naprężeń zginających pod działaniem grawitacyjnych obciążeń. Pokazano szereg przykładów dobierania wysokości przekrojów mebli na podstawie obwiedni momentów zginających od najbardziej niekorzystnych przypadków obciążenia. Praca jest skierowana do architektów zainteresowanych zrozumieniem związku kształtów tych mebli z ich właściwościami nośnymi i optymalnym ich kształtowaniem w oparciu o tę wiedzę.

Keywords: furniture design; curved-axis beam; simply supported beam; cantilever; structural forms

Słowa kluczowe: projektowanie mebli; belka zakrzywiona; belka swobodnie podparta; wspornik; formy strukturalne

WPROWADZENIE

Meble w trakcie użytkowania powinny nie tylko spełniać wymagania funkcjonalne i estetyczne, ale również przenosić działające na nie obciążenia. Rola projektantów mebli polega na jednoczesnym uwzględnieniu tych czynników przy możliwie jak najmniejszym koszcie. Sposób, w jaki tego dokonają, jest uzależniony od ich merytorycznego przygotowania i intuicji, dlate-

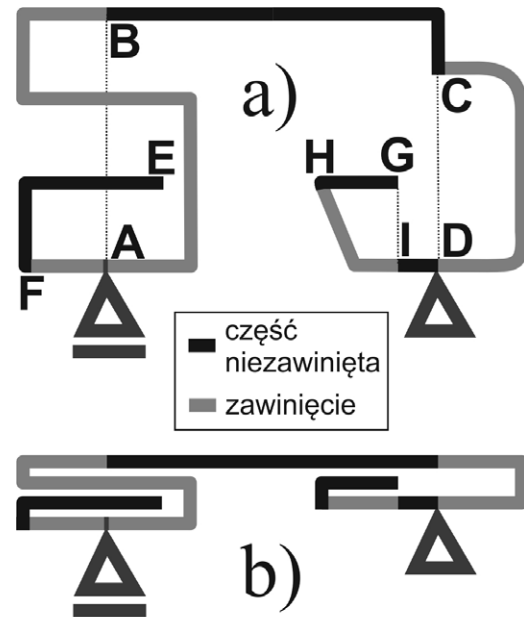
go powinni posiadać dostateczną wiedzę o sposobach pracy konstrukcji projektowanych ustrojów lub korzystać z pomocy konstruktorów. Kwestie te były tematem rozważań autorów już od dawna. Dzisiaj, mimo łatwego dostępu do metod obliczeniowych analizy konstrukcji, zagadnienia te są nadal niezwykle istotne i poruszane w wielu pozycjach współczesnej literatury. Becker¹

¹ H. H. Becker, *Structural Competency for Architects*, Taylor & Francis, New York 2015.

pisze, że architekci powinni rozumieć zasady pracy konstrukcji, aby móc w pełni wyrazić intencję projektu. Uważa, że mogą oni zaprojektować formy, które są w pełni zgodne z założeniami projektowymi tylko wówczas, gdy posiadają wiedzę o podstawowych typach ustrojów nośnych. Sądzi, że architekci nie powinni pozwolić, aby ich dzieła podlegały kompromisom przez brak zrozumienia pracy konstrukcji. Olsen i Namara podkreślają rolę właściwego przygotowania architektów i inżynierów do interdyscyplinarnej współpracy, umożliwiającej optymalizację projektów pod względem wydajności i estetyki². Macdonald pisze o docenianiu architektonicznej wartości konstrukcji w kontekście kwestii wizualnych i ekonomicznych³. Pressman⁴ próbuje pomóc architektom sprostać wyzwaniom coraz bardziej złożonych projektów i ich konstrukcji. Opisuje umiejętności członków zespołu projektowego, które są niezbędne do skutecznej współpracy i które są w stanie przemienić najtrudniejsze projekty w wielkie dzieła architektury. Sandaker⁵ stara się umożliwić czytelnikom jak najlepsze zrozumienie relacji pomiędzy technologią i architekturą. W swoich pracach^{6,7,8,9,10} autorka analizuje wpływ konstrukcji mebli o różnych schematach statycznych na kształty ich przekrojów.

Tematem artykułu jest kształtowanie form mebli, których schematem statycznym jest pręt zakrzywiony w płaszczyźnie pionowej, podparty na dwóch podporach przegubowych, z których co najmniej jedna nie jest umiejscowiona na końcu pręta. W schemacie takiego mebla można wyróżnić swobodnie podpartą krzywą belkę między podporami oraz jeden albo dwa wsporniki utwierdzone w tej belce nad podporami. Pręt może zakrzywiać się gładko lub poprzez załamania, zarówno w części swobodnie podpartej, jak i w częściach wspornikowych. W schematach zakrzywionych swobodnie podpартych belek i wsporników mogą występować zawinięcia, gdy linia pionowa przecina pręt w dwóch lub większej liczbie oddzielnych punktów (bez uwzględniania odcinków pionowych). Podział schematu przykładowego mebla na części niezawinięte i zawinięcia jest pokazany na rycinie 1.

Rozważane meble są obciążane przede wszystkim grawitacyjnie w płaszczyźnie zakrzywienia pręta. Pod wpływem takich obciążeń w meblach występuje



Ryc. 1. Podział swobodnie podpartej belki ABCD i wsporników EFA, GHID w schemacie rzeczywistym mebla a) i zastępczym b): BC – część niezawinięta swobodnie podpartej belki; AB, CD – zawinięcia swobodnie podpartej belki; EF, GH, ID – części niezawinięte wsporników, FA, HI – zawinięcia wsporników. Rys. autorka
Fig. 1. Division of simply supported beam ABCD and cantilevers EFA, GHID in actual scheme a) and corresponding scheme b) of piece of furniture: BC – uncoiled part of statically determinate beam; AB, CD – coiled parts of statically determinate beam; EF, GH, ID – uncoiled parts of cantilevers, FA, HI – coiled parts of cantilevers. Fig. the author

zginanie, ścinanie, ściskanie lub rozciąganie. Przyjęto założenie, że pręty i płyty mebli są wykonane z jednorodnego, izotropowego, liniowo-sprężystego materiału i ich grubości są tak małe, że możliwe jest kształtowanie ich przekrojów tylko na podstawie momentów zginających. Optymalne wysokości prostokątnych przekrojów o stałej szerokości, dobierane na naprężenia normalne występujące przy zginaniu, są zależne od pierwiastka kwadratowego z bezwzględnych wartości momentu. Obciążenia poziome mebli są uwzględniane tylko w przypadkach, gdy nie występuje zginanie od pionowego obciążenia. Wykresy momentów zginających są znajdowane dla najbardziej niekorzystnych wariantów grawitacyjnych obciążeń, wynikających z linii wpływu

² C. Olsen, S. M. Namara, *Collaborations in Architecture and Engineering*, Taylor & Francis, New York 2014.

³ A. J. Macdonald, *Structure and Architecture*, Taylor & Francis, New York 2001.

⁴ A. Pressman, *Designing Relationships: The Art of Collaboration in Architecture*, Taylor & Francis, New York 2014.

⁵ B. N. Sandaker, *On Span and Space: Exploring Structures in Architecture*, Taylor & Francis, New York 2008.

⁶ A. Kozikowska, *Forma a konstrukcja mebli. Meble o konstrukcji wspornikowej*, „Architecturae et Artibus” nr 4, 2010, s. 45-55.

⁷ Idem, *Forma a konstrukcja mebli. Meble o konstrukcji belkowej oraz ramowej*, „Architecturae et Artibus” nr 4, 2010, s. 56-65.

⁸ Idem, *Forma a konstrukcja mebli. Meble o konstrukcji płyt zginanych jednokierunkowo*, „Architecturae et Artibus” nr 1, 2013, 69-78.

⁹ Idem, *Forma a konstrukcja mebli. Stoły*, „Architecturae et Artibus” nr 3, 2013, s. 18-29.

¹⁰ Idem, *Kształtowanie form mebli o schematach zakrzywionych swobodnie podpартych belek ze wspornikami przyłączonymi poza końcami belek*, „Architecturae et Artibus” nr 4, 2015.

momentów. Metody konstruowania linii wpływu, w tym metody kinematyczne, są omawiane w większości pozycji z mechaniki konstrukcji^{11,12}. Procedura kinematyczna tworzenia linii wpływu momentu dla zastępczego schematu mebla (złożonego z prostych prętów) jest przedstawiona w artykule autorki o meblach, których schematem konstrukcyjnym jest zakrzywiona belka ze wspornikami przyłączonymi poza jej końcami¹³. Schemat zastępczy mebla o schemacie rzeczywistym z ryciny 1a jest zamieszczony na rycinie 1b. Tworzenie linii wpływowej momentu zaczyna się od wstawienia przegubu w miejscu poszukiwanego momentu. Przegub dzieli cały pręt na dwie części, które następnie są obracane względem siebie tak, że w przegubie następuje zmiana kąta między prętami. Środkami obrotów są punkty przecięcia linii poziomej przechodzącej przez przegub z liniami pionowymi przechodzącymi przez podpory. Grawitacyjne obciążenia ustawiane na wszystkich fragmentach przemieszczonych do dołu dają maksymalny moment w przekroju, w którym został dodany przegub. Moment ten występuje po tej stronie pręta, po której wartość kąta między prętami w przegubie zwiększyła się. Wykresy momentów obciążonych grawitacyjnie zakrzywionych swobodnie podpartych belek i wsporników są takie same jak wykresy momentów prostych belek poziomych o tych samych schematach i obciążeniu^{14,15,16}.

Analiza pracy konstrukcji mebli o schemacie krzywej belki i przyłączonych do niej wsporników będzie przeprowadzana w oddzielnych klasach mebli, różniących się położeniem belki i wsporników względem linii pionowych przechodzących przez podpory. W klasach tych występuje inna liczba i inny charakter najbardziej niekorzystnych wariantów obciążeń oraz inne cechy charakterystyczne optymalnych zmian wysokości przekrojów prętów i płyt.

1. SWOBODNIE PODPARTA BELKA BEZ ZAWINIĘĆ I WSPORNIKI MIĘDZY PODPORAMI

Stolik płytowy z ryciny 2a ma schemat swobodnie podpartej belki bez zawinięć oraz jednego wspornika utwierdzonego na końcu belki. Wspornik rozciąga się między liniami pionowymi przechodzącymi przez podpory belki. Rzeczywisty i zastępczy schemat stoli-

ka są pokazane na rycinie 2b. Najbardziej niekorzystny przypadek obciążenia działającego do dołu jest znaleziony dla tego schematu na podstawie linii wpływu z ryciny 2c. Jest to obciążenie na całym wsporniku i na całej swobodnie podpartej belce, dające maksymalne wartości momentów na górze niezawiniętego wspornika i na dole belki (ryc. 2d). Momenty na dole niezawiniętego wspornika i na górze swobodnie podpartej belki nie powstają pod wpływem grawitacyjnych obciążeń. Optymalna grubość płyty, dostosowana do wykresu momentów z ryciny 2d (do pierwiastka kwadratowego z bezwzględnych wartości momentu), jest pokazana na rycinie 2e. W stoliku o schemacie swobodnie podpartej belki i wspornika umieszczonego poniżej belki (ryc. 2f) również występuje jeden najbardziej niekorzystny wariant grawitacyjnego obciążenia, prowadzący do wykresu momentów z ryciny 2g. Jednak pionowy pręt występujący na końcu swobodnie podpartej belki bez wspornika nie jest zginany przez pionowe obciążenie. Dlatego na rycinie 2h uwzględniono jego zginanie wywołane poziomą siłą. Aby zapobiec odrywaniu się wspornika od lewej podpory, umieszczono nad tą podporą siłę pionową skierowaną do dołu. Forma mebla dobrana do obwiedni obu momentów jest zaprezentowana na rycinie 2i. Inne meble o schemacie swobodnie podpartej belki bez zawinięć i z jednym wspornikiem przyłączonym na końcu belki są pokazane na rycinach 2j-2l. Optymalne wysokości przekrojów niezawiniętych części wsporników zwiększają się w kierunku utwierdzenia w belce. Zawinięcia wsporników mają minimalne wysokości w przekrojach o najmniejszych wartościach momentów od obciążeń na całych wspornikach. Szczegółowa analiza pracy zawiniętych wsporników jest podjęta przez autorkę w innym artykule¹⁷. Najbardziej niekorzystne warianty obciążeń zawiniętego wspornika będą pokazane w rozdziale 6. Optymalny kształt przekroju niezawiniętej części swobodnie podpartej belki zależy od stosunku rozpiętości wspornika do rozpiętości belki. Gdy rozpiętość wspornika jest wyraźnie krótsza niż rozpiętość belki, to belka ma największy przekrój w pobliżu środka, z przesunięciem tego przekroju w kierunku końca ze wspornikiem (tak jak na ryc. 2i). W przeciwnym przypadku występuje stopniowe zwiększenie wysokości przekroju optymalnej belki w kierunku końca ze wspornikiem (tak jak na ryc. 2e i dla mebli na ryc. 2j-2l).

¹¹ A. Darkov, V. Kuznetsov, *Structural mechanics*, Mir Publishers, Moscow 1969, s. 2691-280.

¹² D.S. Prakash Rao, *Graphical methods in structural analysis*, Universities Press, Hyderabad 1997, s. 110-153.

¹³ A. Kozikowska, *Kształtowanie form ...*, op. cit.

¹⁴ B. Shihua, G. Yaoging, *Structural Mechanics*, Wuhan University Press, Wuhan 2008, s. 56.

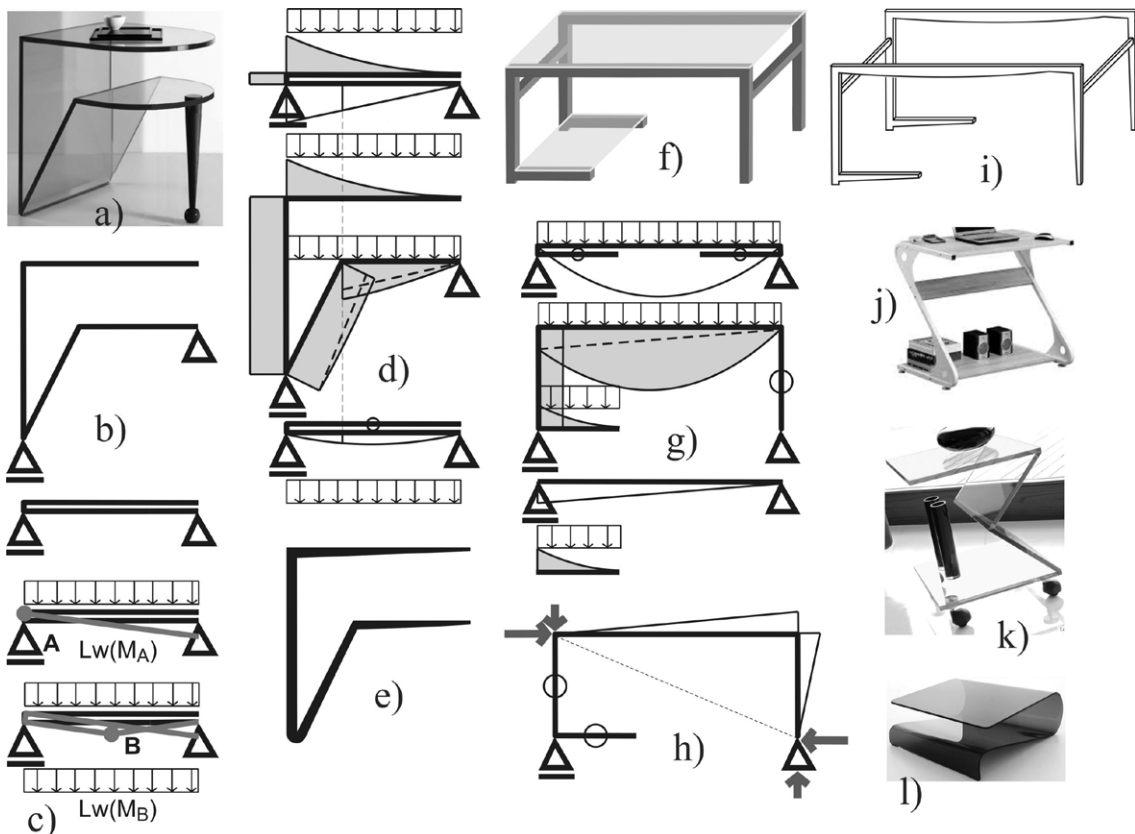
¹⁵ Z. Cywiński, *Mechanika budowli w zadaniach. Układy statycznie wyznaczalne*, PWN, Warszawa 2006, s. 113.

¹⁶ P. Litewka., R. Sygulski, *Wybrane zagadnienia zaawansowanej mechaniki budowli*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012, s. 28, 29, 36.

¹⁷ A. Kozikowska, *Kształtowanie form ...*, op. cit.

Meble o schemacie swobodnie podpartej belki bez zawinięć i dwóch wsporników między podporami również mają jeden najbardziej niekorzystny wariant grawitacyjnego obciążenia (obciążenie na całej belce i wspornikach, ryc. 3c i 3j). Takie obciążenie powoduje powstanie momentów zginających na górze wsporników oraz na dole belki (ryc. 3d i 3k). Niezależnie od tego, czy wsporniki są poniżej belki (ryc. 3a), czy ponad nią (ryc. 3h) wykres momentów na dole swobodnie podpartej belki jest sumą dwóch wykresów mo-

mentów: wykresu parabolicznego na dole swobodnie podpartej belki z ciągłym obciążeniem tylko na belce oraz wykresu liniowego na dole swobodnie podpartej nieobciążonej belki z obciążonymi wspornikami, o wartościach momentów na końcach belki takich, jak maksymalne momenty na wspornikach. Optymalne kształty przekrojów tych mebli, dostosowane do wykresów momentów (proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego z wartości momentów), są pokazane na rycinach 3e i 3l. Inne meble o tym samym sche-

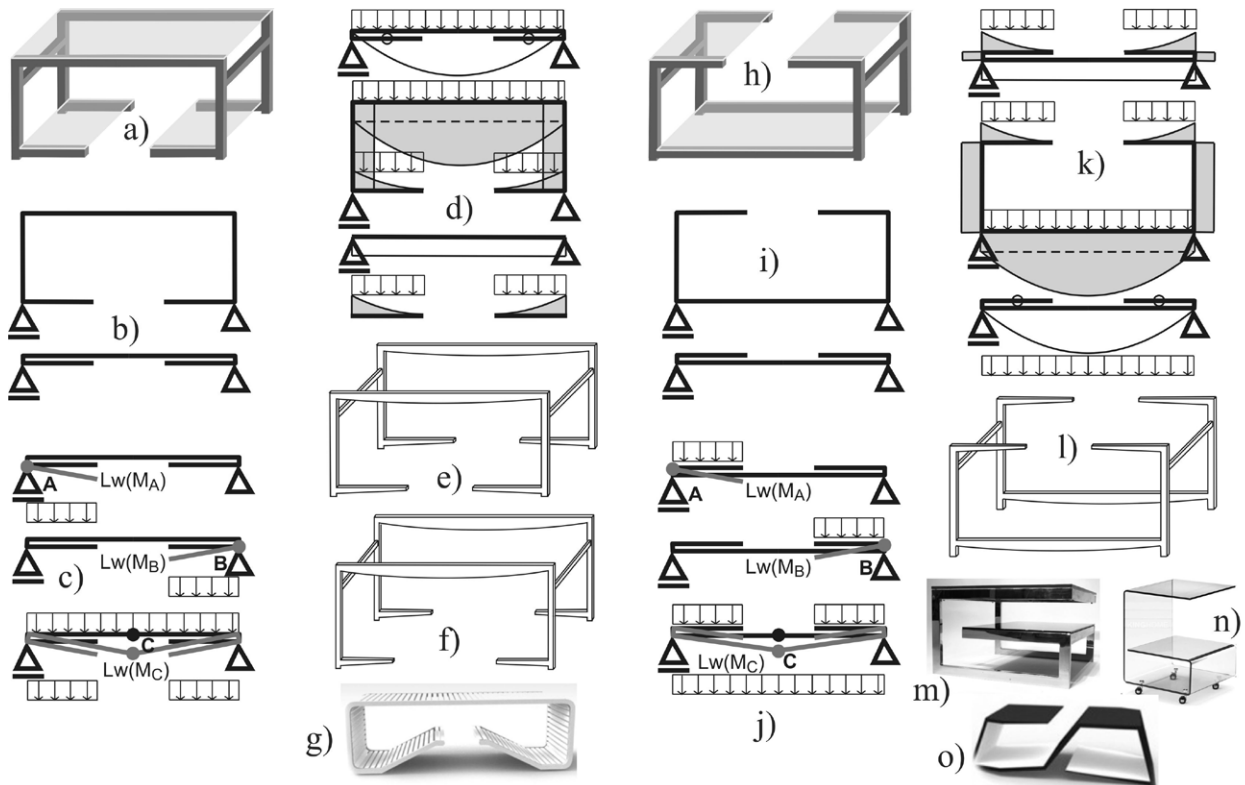


Ryc. 2. Meble o schemacie niezawiniętej swobodnie podpartej belki i jednego wspornika między podporami: a) stolik, projekt Hermian Sneyders De Vogel, źródło: <http://www.tonellidesign.com/eng/prodotti.php?id=71>; b) rzeczywisty i zastępczy schemat stolika z ryc. 2a; c) linie wpływu momentów na górze wspornika oraz na dole swobodnie podpartej belki z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; d) wykres momentów z zacieniowanymi maksymalnymi wartościami na górze niezawiniętego wspornika i na dole niezawiniętej swobodnie podpartej belki; e) zmiana grubości płyty stolika z ryc. 2a wynikająca z pracy konstrukcji; f) stolik ze swobodnie podpartą belką nad wspornikiem; g) wykres momentów z zacieniowanymi maksymalnymi wartościami na górze niezawiniętego wspornika i na dole niezawiniętej swobodnie podpartej belki; h) wykres momentów stolika z ryc. 2f od poziomego obciążenia; i) forma stolika z ryc. 2f wynikająca z pracy konstrukcji; j) biurko, źródło: <http://www.aliexpress.com/item/Best-off-simple-laptop-computer-desk-office-desk-desktop-fashion-student-bedroom-living-room-study-tables/32313129988.html>; k) stolik, źródło: <http://weheartit.com/tag/hospital%20bedside%20table>; l) stolik, źródło: http://www.design-plaza.de/media/image/thumbnail/tonin-casa-couchtisch-velo-8166-detail-4_285x255.jpg. Rys. autorka

Fig. 2. Furniture of scheme of uncoiled simply supported beam and one cantilever between supports: a) table, design: Hermian Sneyders De Vogel, source: <http://www.tonellidesign.com/eng/prodotti.php?id=71>; b) actual and corresponding scheme of the table from Fig. 2a; c) influence lines of moment at the top of cantilever and at the bottom of simply supported beam with most unfavourable gravitational load; d) moment diagram with shaded maximum values at the top of uncoiled cantilever and at the bottom of uncoiled simply supported beam; e) variation of plate thickness for the table from Fig. 2a resulting from structural behaviour; f) table with simply supported beam above cantilever; g) moment diagram with shaded maximum values at the top of uncoiled cantilever and at the bottom of uncoiled simply supported beam; h) moment diagram of the table from Fig. 2f for horizontal load; i) form of the table from Fig. 2f resulting from structural behaviour; j) desk, source: <http://www.aliexpress.com/item/Best-off-simple-laptop-computer-desk-office-desk-desktop-fashion-student-bedroom-living-room-study-tables/32313129988.html>; k) table, source: <http://weheartit.com/tag/hospital%20bedside%20table>; l) table, source: http://www.design-plaza.de/media/image/thumbnail/tonin-casa-couchtisch-velo-8166-detail-4_285x255.jpg. Fig. the author

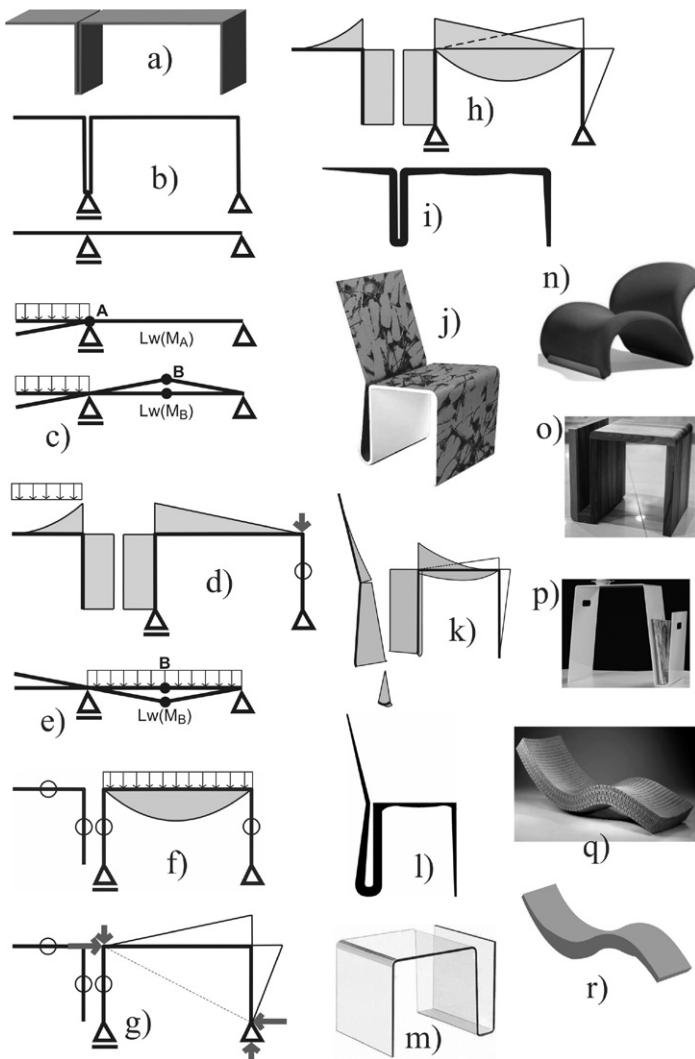
macie statycznym (np. przedstawione na ryc. 3g, 3m-3o) mają optymalne formy o takim samym charakterze zmian wysokości przekrojów. Przekroje niezawiniętych wsporników stale wzrastają w kierunku ich połączeń z belką. Jeśli rozpiętości obciążanych części wsporników są takie same i cała swobodnie podparta belka

może być obciążana na całej długości (ryc. 3e-3g, 3l oraz 3n), to jej największy przekrój występuje dokładnie w środku. Jeśli rozpiętości wsporników nie są równe, to największy przekrój swobodnie podpartej belki występuje w pobliżu środka, bliżej dłuższego końca z dłuższym wspornikiem (ryc. 3m, 3o).



Ryc. 3. Meble o schemacie niezawiniętej swobodnie podpartej belki i dwóch wsporników między podporami: a) stolik ze swobodnie podartą belką umieszczoną nad wspornikami; b) rzeczywisty i zastępczy schemat stolika z ryc. 3a; c) linie wpływu momentów na górze wsporników oraz na dole swobodnie podpartej belki z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; d) wykres momentów z zacieniowanymi maksymalnymi wartościami na górze niezawiniętych wsporników i na dole niezawiniętej swobodnie podpartej belki; e) forma stolika z ryc. 3a wynikająca z pracy konstrukcji; f) forma stolika wynikająca z pracy konstrukcji, o schemacie jak na ryc. 3a, tylko o rozpiętości swobodnie podpartej belki cztery razy większej niż rozpiętość każdego ze wsporników; g) stolik, źródło: <http://www.digsdigs.com/cool-ultra-modern-dining-and-low-tables-by-riios-design/>; h) stolik ze wspornikami umieszczonymi nad swobodnie podpartą belką; i) rzeczywisty i zastępczy schemat stolika z ryc. 3h; j) linie wpływu momentów na górze wsporników oraz na dole swobodnie podpartej belki z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; k) wykres momentów z zacieniowanymi maksymalnymi wartościami na górze niezawiniętych wsporników i na dole niezawiniętej swobodnie podpartej belki; l) forma stolika z ryc. 3h wynikająca z pracy konstrukcji; m) stolik, źródło: https://www.1stdibs.com/furniture/tables/coffee-tables-cocktail-tables/cantilevered-gold-smokey-glass-g-coffee-table-mid-century/id-f_1546112/; n) stolik, źródło: <http://www.superwnetrze.pl/Stoly-do-salonu,k2781/Table-kawowy-na-kolkach-King-Bath-Six,t56820.html>; o) stolik, źródło: <http://www.digsdigs.com/cool-ultra-modern-dining-and-low-tables-by-riios-design/>. Rys. autorka

Fig. 3. Furniture of scheme of uncoiled simply supported beam and two cantilevers between supports: a) table with simply supported beam above cantilevers; b) actual and corresponding scheme of the table from Fig. 3a; c) influence lines of moment at the top of cantilevers and at the bottom of simply supported beam with most unfavourable gravitational load; d) moment diagram with shaded maximum values at the top of uncoiled cantilevers and at the bottom of uncoiled simply supported beam; e) form of the table from Fig. 3a resulting from structural behaviour; f) form of table resulting from structural behaviour (the table of scheme as in Fig. 3a, but span of simply supported beam is four times greater than span of each cantilever); g) table, source: <http://www.digsdigs.com/cool-ultra-modern-dining-and-low-tables-by-riios-design/>; h) table with cantilevers above simply supported beam; i) actual and corresponding scheme of the table from Fig. 3h; j) influence lines of moment at the top of cantilevers and at the bottom of simply supported beam with most unfavourable gravitational load; k) moment diagram with shaded maximum values at the top of uncoiled cantilevers and at the bottom of uncoiled simply supported beam; l) form of the table from Fig. 3h resulting from structural behaviour; m) table, source: https://www.1stdibs.com/furniture/tables/coffee-tables-cocktail-tables/cantilevered-gold-smokey-glass-g-coffee-table-mid-century/id-f_1546112/; n) table, source: <http://www.superwnetrze.pl/Stoly-do-salonu,k2781/Table-kawowy-na-kolkach-King-Bath-Six,t56820.html>; o) table, source: <http://www.digsdigs.com/cool-ultra-modern-dining-and-low-tables-by-riios-design/>. Fig. the author.



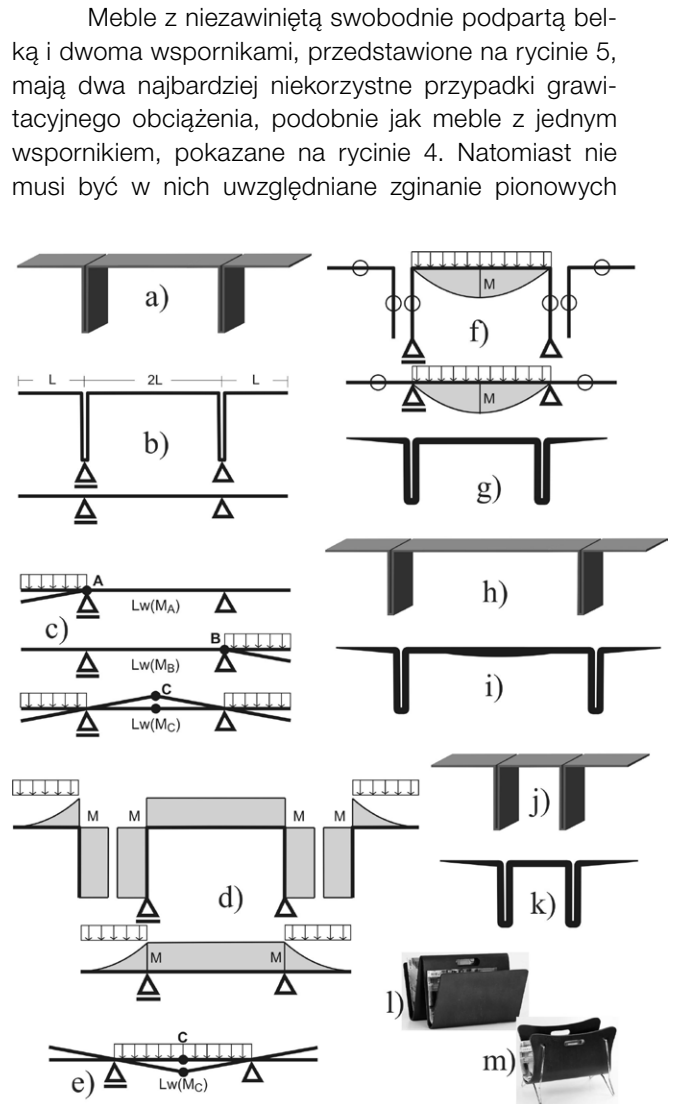
2. SWOBODNIE PODPARTA BELKA BEZ ZAWINIĘĆ I WSPORNIKI POZA PODPORAMI

W meblach o schemacie niezawiniętej swobodnie podpartej belki i jednego wspornika przyłączonym do końca belki poza liniami podpór występują dwa warianty obciążenia, które prowadzą do maksymalnych momentów w różnych częściach belki. Jeden wariant z ciągłym obciążeniem grawitacyjnym na całym wsporniku, związany z liniami wpływu przedstawionymi na rycinie 4c, daje maksymalne wartości momentów na niezawiniętym wsporniku i na górze belki (ryc. 4d). To obciążenie powoduje odrywanie się końca belki bez wspornika od prawej podpory. Dlatego razem z obciążeniem wspornika jest uwzględniona siła pionowa do dołu nad prawą podporą. Wykres momentów od tego przypadku obciążenia nigdy nie może być pominięty, ale może być uwzględniany nie jako samodzielny wykres, ale jako składnik sumy momentów, razem z wykresem momentów od drugiego przypadku. Wówczas

Ryc. 4. Meble o schemacie niezawiniętej swobodnie podpartej belki i jednego wspornika poza podporą: a) stół ze swobodnie podpartą belką o rozpiętości dwa razy większej niż rozpiętość wspornika; b) rzeczywisty i zastępczy schemat stołu z ryc. 4a; c) linie wpływu momentów na górze wspornika oraz na górze swobodnie podpartej belki z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; d) wykres momentów z zacieniowanymi maksymalnymi wartościami na górze niezawiniętego wspornika i na górze niezawiniętej swobodnie podpartej belki; e) linia wpływu momentu na dole swobodnie podpartej belki z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; f) wykres momentów z zacieniowanymi maksymalnymi wartościami na dole niezawiniętej swobodnie podpartej belki; g) wykres momentów stołu z ryc. 4a od poziomego obciążenia; h) obwiednia momentów stołu z ryc. 4a wynikająca z pracy konstrukcji; i) krzesło, projekt Sergio Fahrera, źródło: <http://blogs.tribuna.com.br/designdecor/2012/08/pecas-descoladas-dos-irmaos-fahrer/>; j) krzesło, projekt Sergio Fahrera, źródło: <http://blogs.tribuna.com.br/designdecor/2012/08/pecas-descoladas-dos-irmaos-fahrer/>; k) obwiednia momentów krzesła z ryc. 4k; l) zmiana grubości płyty krzesła z ryc. 4k wynikająca z pracy konstrukcji; m) stolik, źródło: http://www.alibaba.com/product-detail/Hot-bending-glass-little-coffee-table_1004504826.html; n) fotel, źródło: www.houzz.com/photos/751481/Le-Chat-Lounge-Chair-Artifort-modern-chairs; o) gazetnik, źródło: <http://manufakturaklimatu.pl/index.php/gazetnik.html>; p) gazetnik, źródło: <http://www.domplusdom.pl/blog/gazetnik-anu-desing>; q) leżanka, źródło: <http://decolatorium.blogspot.com/2013/10/korek-we-wnetrze.html>; r) forma leżanki z ryc. 4q wynikająca z pracy konstrukcji. Rys. autorka

Fig. 4. Furniture of scheme of uncoiled simply supported beam and one cantilever beyond support: a) table with simply supported beam of span two times greater than span of cantilever; b) actual and corresponding scheme of the table from Fig. 4a; c) influence lines of moment at the top of cantilever and at the top of simply supported beam with most unfavourable gravitational load; d) moment diagram with shaded maximum values at the top of uncoiled cantilever and at the top of uncoiled simply supported beam; e) influence line of moment at the bottom of simply supported beam with most unfavourable gravitational load; f) moment diagram with shaded maximum values at the bottom of uncoiled simply supported beam; g) moment diagram of the table from Fig. 4a for horizontal load; h) envelope of moments of the table from Fig. 4a; i) variation of plate thickness for the table from Fig. 4a resulting from structural behaviour; j) chair, design: Sergio Fahrera, source: <http://blogs.tribuna.com.br/designdecor/2012/08/pecas-descoladas-dos-irmaos-fahrer/>; k) envelope of moments of the chair from Fig. 4k; l) variation of plate thickness for the chair from Fig. 4k resulting from structural behaviour; m) table, source: http://www.alibaba.com/product-detail/Hot-bending-glass-little-coffee-table_1004504826.html; n) chair, source: www.houzz.com/photos/751481/Le-Chat-Lounge-Chair-Artifort-modern-chairs; o) newspaper holder, source: <http://manufakturaklimatu.pl/index.php/gazetnik.html>; p) newspaper holder, source: <http://www.domplusdom.pl/blog/gazetnik-anu-desing>; q) divan, source: <http://decolatorium.blogspot.com/2013/10/korek-we-wnetrze.html>; r) form of the divan from Fig. 4q resulting from structural behaviour. Fig. the author

pionowa siła nie musi być przykładana. Drugi wariant obciążenia, pochodzący od linii wpływu z ryciny 2e, daje maksymalne wartości momentów na dole swobodnie podpartej belki (ryc. 4f). Jeśli odcinek przy końcu belki bez wspornika jest pionowy, tak jak w przypadku stolika z ryciny 4a, to nie jest on zginany przez pionowe obciążenie. Dlatego uwzględniono jego zginanie poziomą siłą przy przesuwaniu mebla (ryc. 4g). Zmiana grubości płyty stolika z ryciny 4a, dostosowana do obwiedni momentów z ryciny 4h, jest pokazana na rycinie 4i. Krzesło z ryciny 4j było analizowane przez autorkę w artykule o meblach płytowych¹⁸. Obwiednia jego maksymalnych momentów, pokazana na rycinie 4k, uwzględnia zginanie od obciążenia na belce, od jednocześnie działających obciążeń na belce i wsporniku oraz od siły poziomej, powodującej zginanie pionowego pręta przy końcu belki bez wspornika. Rycina 4l przedstawia grubość płyty krzesła, dostosowaną do wartości pierwiastków kwadratowych z bezwzględnie maksymalnych momentów. Cechy optymalnych kształtów przekrojów mebli złożonych z niezawiniętej belki i niezawiniętego wspornika poza podporą to stopniowe zwiększanie wysokości przekroju wspornika od swobodnego końca do utwierdzenia w belce, duża wysokość przekroju belki w środku rozpiętości oraz na podporze z przyłączonym wspornikiem, przewężenia belki pomiędzy jej środkiem a wspornikiem oraz na końcu bez wspornika. Gdyby wspornik w meblach o tym schemacie był zawinięty, to nadal występowałyby tylko dwa najbardziej niekorzystne warianty obciążenia belki, natomiast liczba najgorszych wariantów obciążenia wspornika byłaby większa (zostaną one omówione w rozdz. 6).



Ryc. 5. Meble o schemacie niezawiniętej swobodnie podpartej belki i dwóch wsporników poza podporami: a) stół ze swobodnie podpartą belką o rozpiętości dwa razy większej niż rozpiętość każdego ze wsporników; b) rzeczywisty i zastępczy schemat stołu z ryc. 5a; c) linie wpływu momentów na górze wsporników oraz na górze swobodnie podpartej belki z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; d) wykres momentów z zacieniowanymi maksymalnymi wartościami na górze niezawiniętych wsporników i na górze niezawiniętej swobodnie podpartej belki; e) linia wpływu momentu na dole swobodnie podpartej belki z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; f) wykres momentów z zacieniowanymi maksymalnymi wartościami na dole niezawiniętej swobodnie podpartej belki; g) zmiana grubości płyty stołu z ryc. 5a wynikająca z pracy konstrukcji; h) stół ze swobodnie podpartą belką o rozpiętości trzy razy większej niż rozpiętość każdego ze wsporników; i) zmiana grubości płyty stołu z ryc. 5h wynikająca z pracy konstrukcji; j) stół o jednakowych rozpiętościach swobodnie podpartej belki i wsporników; k) zmiana grubości płyty stołu z ryc. 5j wynikająca z pracy konstrukcji; l) gazetnik, źródło: <http://www.sklep.meble.pl/p51479,gazetnik-g4-wykonany-ze-sklejki-halmar.html>; m) gazetnik, źródło: http://www.lepukka.pl/produkt/gazetnik_woodear.html. Rys. autorka

Fig. 5. Furniture of scheme of uncoiled simply supported beam and two cantilevers beyond supports: a) table with simply supported beam of span two times greater than span of each cantilever; b) actual and corresponding scheme of the table from Fig. 5a; c) influence lines of moment at the top of cantilevers and at the top of simply supported beam with most unfavourable gravitational load; d) moment diagram with shaded maximum values at the top of uncoiled cantilevers and at the top of uncoiled simply supported beam; e) influence line of moment at the bottom of simply supported beam with most unfavourable gravitational load; f) moment diagram with shaded maximum values at the bottom of uncoiled simply supported beam; g) variation of plate thickness for the table from Fig. 5a resulting from structural behaviour; h) table with simply supported beam of span three times greater than span of each cantilever; i) variation of plate thickness for the table from Fig. 5h resulting from structural behaviour; j) table with equal spans of simply supported beam and cantilevers; k) variation of plate thickness for the table from Fig. 5j resulting from structural behaviour; l) newspaper holder, source: <http://www.sklep.meble.pl/p51479,gazetnik-g4-wykonany-ze-sklejki-halmar.html>, m) newspaper holder, source: http://www.lepukka.pl/produkt/gazetnik_woodear.html. Fig. the author

¹⁸ A. Kozikowska, *Forma ... Meble o konstrukcji płyt zginanych jednokierunkowo*, op. cit.

prętów na końcach, spowodowane poziomym obciążeniem, ponieważ są one zginane przez pionowe obciążenie. Optymalne wysokości przekrojów wsporników zależą tylko od ich kształtu, a nie od miejsca przyłączenia i - tak jak w innych meblach - są coraz większe, im bliżej utwierdzeń, jeśli nie mają zawinąć (ryc. 5g, 5i, 5k). Natomiast optymalne zmiany wysokości przekrojów swobodnie podpartych belek zależą od proporcji rozpiętości wsporników do rozpiętości belek. Jeśli rozpiętości obu wsporników są takie same i równe połowie rozpiętości belki (ryc. 5g) lub są większe niż połowa rozpiętości belki (ryc. 5k), to wysokość przekroju belki jest stała, taka sama jak wysokości przekrojów wsporników przy utwierdzeniach. W przeciwnym przypadku wysokość przekroju belki jest największa w środku, gdy wsporniki mają takie same długości (ryc. 5i), lub w pobliżu środka, gdy różnią się długością.

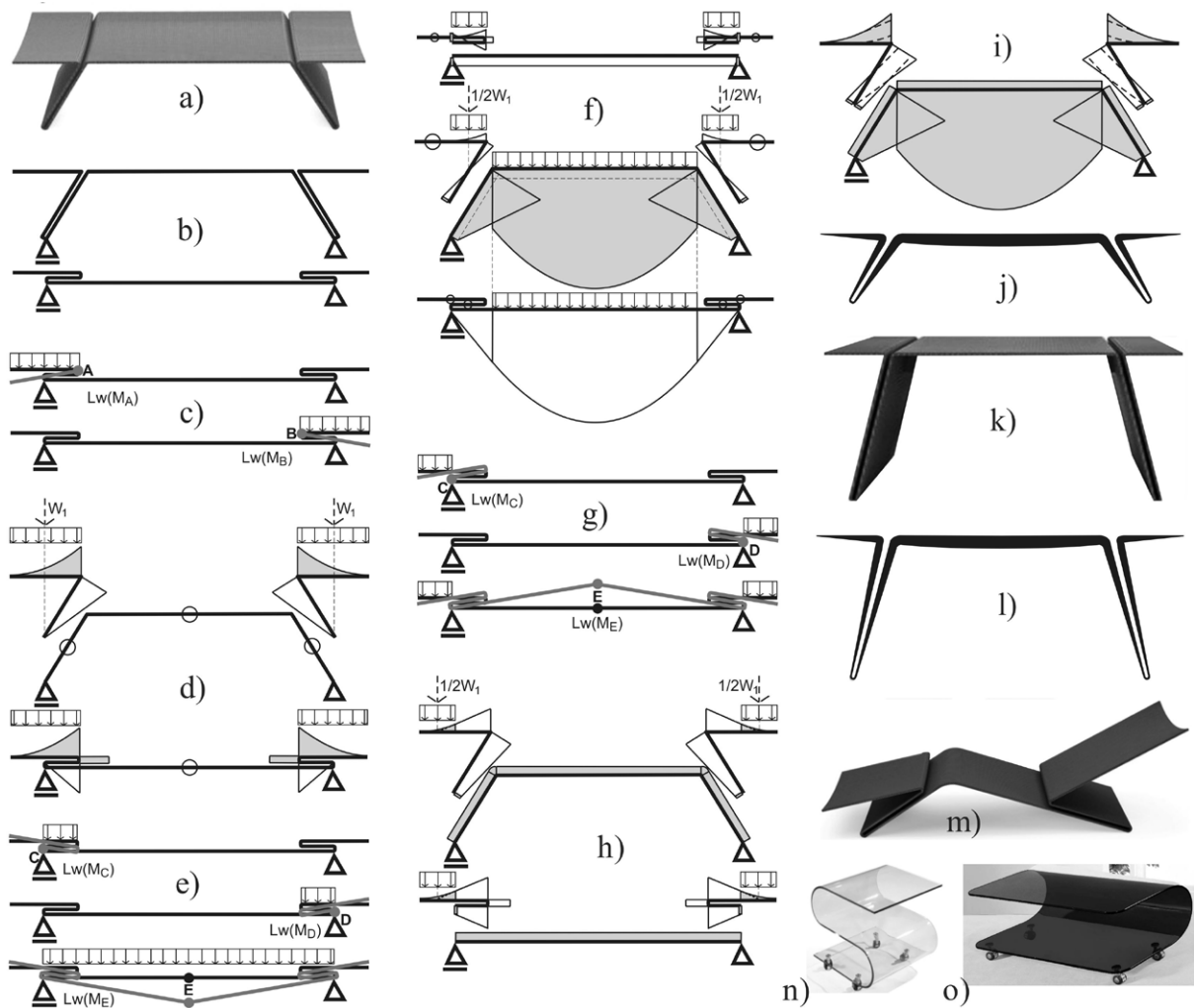
3. SWOBODNIE PODPARTA BELKA BEZ ZAWINIĘĆ ORAZ WSPORNIKI MIĘDZY I POZA PODPORAMI

Rozkłady najbardziej niekorzystnych obciążeń swobodnie podpartej belki są zależne od położenia wsporników względem linii pionowych przechodzących przez jej podpory. W meblach przedstawionych na rycinie 6 każdy ze wsporników występuje po obu stronach linii podpory, w pobliżu której jest przyłączony. W takim przypadku obciążenie na całych wspornikach zarówno pomiędzy podporami, jak i poza nimi nie powoduje maksymalnego zginania żadnej części swobodnie podpartej belki. Obciążenie na całych niezawiniętych częściach wsporników (ryc. 6c) daje maksymalne wartości momentów na górze tych części (ryc. 6d). Przyłożenie grawitacyjnego obciążenia na całej długości niezawiniętej swobodnie podpartej belki, na prawym wsporniku na lewo od prawej podpory i na lewym wsporniku na prawo od lewej podpory (wg linii wpływu z ryc. 6e) powoduje maksymalne zginanie dolnych włókien swobodnie podpartej belki (ryc. 6f) oraz górnych włókien zawinąć wsporników przy ich utwierdzeniach. Obciążenie na częściach obu wsporników leżących poza podporami (na lewym wsporniku na lewo od lewej podpory i na prawym wsporniku na prawo od prawej podpory), zgodne z linią wpływu na rycinie 6g, prowadzi do maksymalnych wartości momentów na górze niezawiniętej swobodnie podpartej belki oraz na dole zawinąć wsporników przy ich utwierdzeniach (ryc. 6h). Na podstawie obwiedni maksymalnych momentów z ryciny 6i (proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego z bezwzględnych wartości obwiedni) została dobrana optymalna grubość płyty

ławki, pokazana na rycinie 6j. Stolik z ryciny 6k ma takie same rozpiętości belki i wsporników jak ławka z ryciny 6a. Dlatego obwiednia jego momentów, kształt i proporcje optymalnej konstrukcji też są takie same (ryc. 6l). W meblach o schemacie niezawiniętej swobodnie podpartej belki i wsporników między i poza podporami występuje jedna z trzech możliwych optymalnych form belki: o stałej wysokości przekroju (a), o stopniowo wzrastającej wysokości przekroju od jednej podpory do drugiej (b) oraz o największej wysokości przekroju dokładnie w środku lub w jego pobliżu (c). To, który wariant występuje, zależy od proporcji rozpiętości obciążonych części wsporników poza podporami (prawego wspornika poza linią prawej podpory, a lewego poza linią lewej), rozpiętości belki i rozpiętości obciążanych części wsporników między podporami (prawego wspornika na lewo od linii prawej podpory, a lewego na prawo od linii lewej). Wariant (a) powstaje w przypadku jednakowych, długich części wsporników poza podporami. Wariant (b) zachodzi, gdy części wsporników poza podporami nie są równe i przynajmniej jedna z nich jest długa albo gdy części wsporników między podporami nie są równe i przynajmniej jedna z nich jest bardzo długa (jak dla stolików z ryc. 6n i 6o). Wariant (c) występuje w pozostałych przypadkach (na przykład dla mebli z ryc. 6a, 6k, 6m).

4. SWOBODNIE PODPARTA BELKA Z ZAWINIĘCIAMI MIĘDZY PODPORAMI I WSPORNIKI POZA PODPORAMI

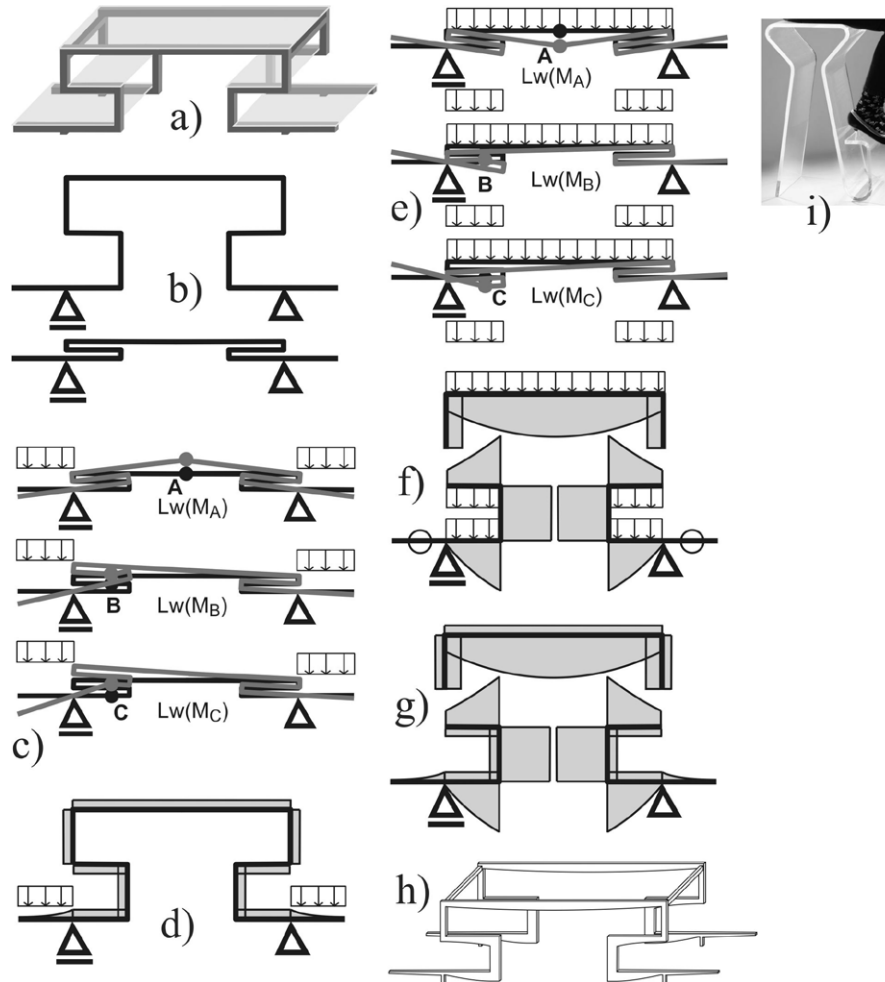
Meble o schemacie swobodnie podpartej belki z zawinięciami między podporami i wsporników poza podporami mają dwa przypadki najbardziej niekorzystnych obciążeń pionowych. Obciążenie na wspornikach, wynikające z linii wpływowych z ryciny 7c, prowadzi do maksymalnych wartości momentów na górze niezawiniętej części belki i wewnątrz jej zawinąć (ryc. 7d). Obciążenie na wszystkich fragmentach belki (na jej niezawiniętej części i na zawinięciach), odnoszące się do linii wpływu z ryciny 7e, wywołuje maksymalne możliwe zginanie na dole niezawiniętej części belki i na zewnątrz zawinąć (ryc. 7f). Konstrukcja wynikająca z obwiedni obu momentów, przedstawiona na rycinie 7g, ma zawinięcia belki - z tym większymi wysokościami przekrojów, im dalej od linii podpór - i część niezawiniętą o największej wysokości przekroju w środku. Taki sposób zmiany wysokości przekrojów optymalnej formy występuje w meblach o krótkich wspornikach. W przypadku bardzo długich wsporników swobodnie podparta belka ma optymalną formę o stałej wysokości przekroju.



Ryc. 6. Meble o schemacie niezawiniętej swobodnie podpartej belki i wsporników między i poza podporami: a) ławka, projekt Joel Escalona, źródło: <http://interiordesign-tips.org/v-collection-outdoor-furniture/>; b) rzeczywisty i zastępczy schemat ławki z ryc. 6a; c) linie wpływu momentów na górze niezawiniętych części wsporników z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; d) wykres momentów z zacieniowanymi maksymalnymi wartościami na górze niezawiniętych części wsporników; e) linie wpływu momentów na górze zawinięć wsporników przy utwierdzeniach w belce oraz na dole swobodnie podpartej belki z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; f) wykres momentów z zacieniowanymi maksymalnymi wartościami na górze zawinięć wsporników przy utwierdzeniach w belce oraz na dole swobodnie podpartej belki; g) linie wpływu momentów na górze swobodnie podpartej belki z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; h) wykres momentów z zacieniowanymi maksymalnymi wartościami na dole zawinięć wsporników przy utwierdzeniach w belce oraz na górze swobodnie podpartej belki; i) obwiednia momentów ławki z ryc. 6a; j) zmiana grubości płyty ławki z ryc. 6a wynikająca z pracy konstrukcyjnej; k) stół, projekt Joel Escalona, źródło: <http://interiordesign-tips.org/v-collection-outdoor-furniture/>; l) zmiana grubości płyty stołu z ryc. 6k wynikająca z pracy konstrukcyjnej; m) leżanka, projekt Joel Escalona, źródło: <http://interiordesign-tips.org/v-collection-outdoor-furniture/>; n) stolik, źródło: http://www.camif.fr/10005246-bout-de-canape-samba.html?utm_medium=Affiliation&utm_campaign=349288&utm_source=Affilinet; o) stolik, źródło: http://it.aliexpress.com/store/product/Hot-Bend-Glass-Coffee-Table-Black-Glass-Side-Table-Measures-100-x-60-x-43cm/314798_1503266085.html. Rys. autorka

Fig. 6. Furniture of scheme of uncoiled simply supported beam and cantilevers between and beyond supports: a) bench, design: Joel Escalona, source: <http://interiordesign-tips.org/v-collection-outdoor-furniture/>; b) actual and corresponding scheme of the bench from Fig. 6a; c) influence lines of moment at the top of uncoiled parts of cantilevers with most unfavourable gravitational load; d) moment diagram with shaded maximum values at the top of uncoiled parts of cantilevers; e) influence lines of moment at the top of coiled parts of cantilevers next to supports and at the bottom of simply supported beam with most unfavourable gravitational load; f) moment diagram with shaded maximum values at the top of coiled parts of cantilevers next to supports and at the bottom of simply supported beam; g) influence lines of moment at the bottom of coiled parts of cantilevers next to supports and at the top of simply supported beam with most unfavourable gravitational load; h) moment diagram with shaded maximum values at the bottom of coiled parts of cantilevers next to supports and at the top of simply supported beam; i) envelope of moments of the bench from Fig. 6a; j) variation of plate thickness for the bench from Fig. 6a resulting from structural behaviour; k) table, design: Joel Escalona, source: <http://interiordesign-tips.org/v-collection-outdoor-furniture/>; l) variation of plate thickness for the table from Fig. 6k resulting from structural behaviour; m) divan, design: Joel Escalona, source: <http://interiordesign-tips.org/v-collection-outdoor-furniture/>; n) table, source: http://www.camif.fr/10005246-bout-de-canape-samba.html?utm_medium=Affiliation&utm_campaign=349288&utm_source=Affilinet; o) table, source: http://it.aliexpress.com/store/product/Hot-Bend-Glass-Coffee-Table-Black-Glass-Side-Table-Measures-100-x-60-x-43cm/314798_1503266085.html.

Fig. the author



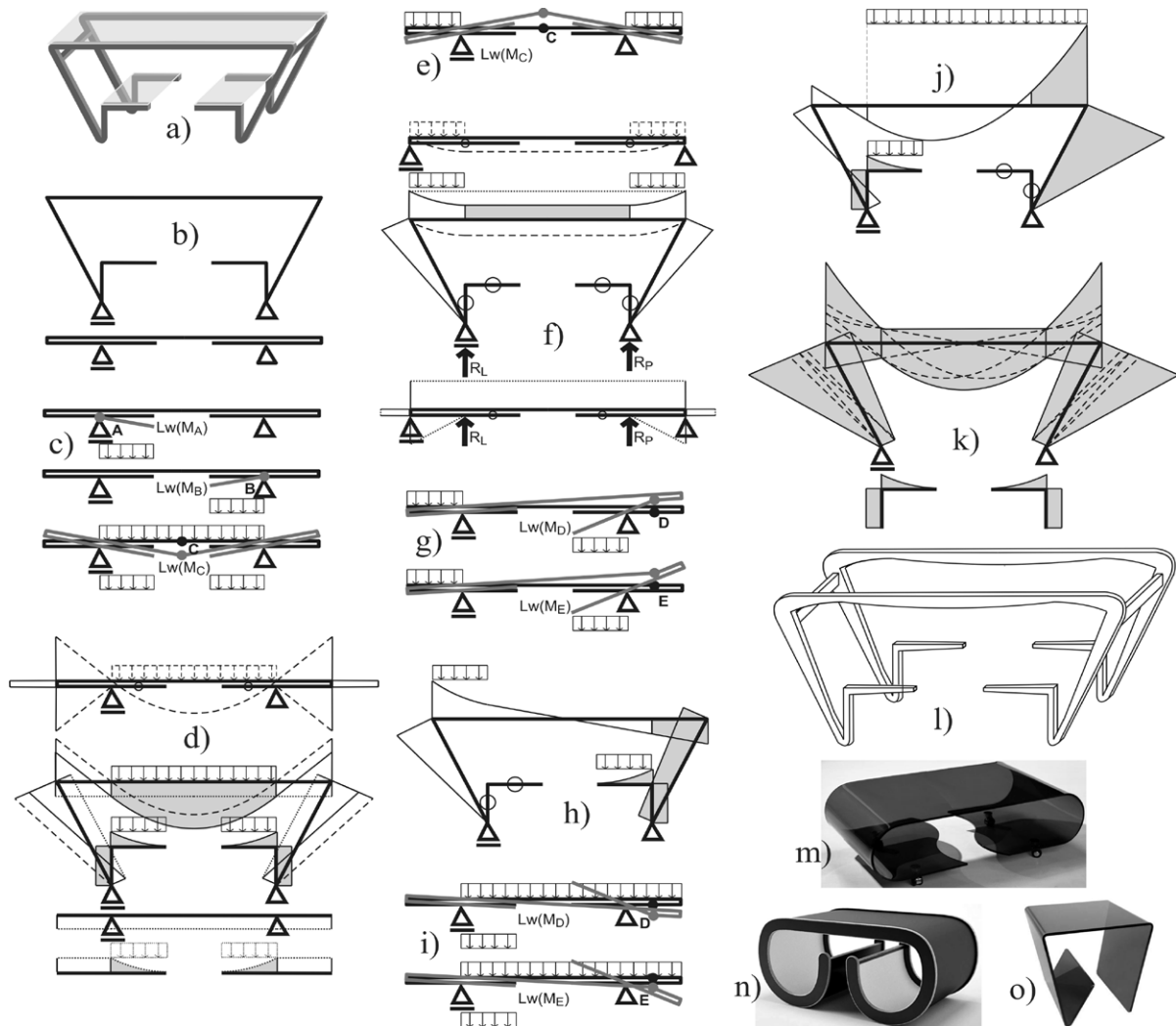
Ryc. 7. Meble o schemacie swobodnie podpartej belki z zawinięciami między podporami i wsporników poza podporami: a) stolik ze swobodnie podpartą belką o rozpiętości wyraźnie większej niż rozpiętość każdego ze wsporników; b) rzeczywisty i zastępczy schemat stolika z ryc. 7a; c) linie wpływu momentów na górze niezawiniętej części swobodnie podpartej belki, wewnątrz zawiniętej swobodnie podpartej belki i na górze niezawiniętych wsporników z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; d) wykres momentów z zacięowanymi maksymalnymi wartościami na górze niezawiniętej części swobodnie podpartej belki i na górze niezawiniętych wsporników; e) linie wpływu momentów na dole niezawiniętej części oraz na zewnątrz zawiniętej swobodnie podpartej belki z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; f) wykres momentów z zacięowanymi maksymalnymi wartościami na dole niezawiniętej części oraz na zewnątrz zawiniętej swobodnie podpartej belki; g) obwiednia momentów stolika z ryc. 7a; h) forma stolika z ryc. 7a wynikająca z pracy konstrukcji; i) stółek barowy, źródło: https://lh6.googleusercontent.com/-ccxpcqxHlNK/TYS-m_Sn_Nl/AAAAAAAAAUBk/ZgZ1klSSZxw/s1600/Magino-Stool.jpg. Rys. autorka

Fig. 7. Furniture of scheme of simply supported beam with coiled parts between supports and cantilevers beyond supports: a) table with simply supported beam of span clearly greater than span of each cantilever; b) actual and corresponding scheme of the table from Fig. 7a; c) influence lines of moment at the top of uncoiled part of simply supported beam, inside coiled parts of simply supported beam, and at the top of uncoiled cantilevers with most unfavourable gravitational load; d) moment diagram with shaded maximum values at the top of uncoiled part of simply supported beam, inside coiled parts of simply supported beam and at the top of uncoiled cantilevers; e) influence lines of moment at the bottom of uncoiled part and on the outside of coiled parts of simply supported beam with most unfavourable gravitational load; f) moment diagram with shaded maximum values at the bottom of uncoiled part and on the outside of coiled parts of simply supported beam; g) envelope of moments of the table from Fig. 7a; h) form of the table from Fig. 7a resulting from structural behaviour; i) bar stool, source: https://lh6.googleusercontent.com/-ccxpcqxHlNK/TYS-m_Sn_Nl/AAAAAAAAAUBk/ZgZ1klSSZxw/s1600/Magino-Stool.jpg. Fig. the author

5. SWOBODNIE PODPARTA BELKA Z ZAWINIĘCIAMI POZA PODPORAMI I WSPORNIKI MIĘDZY PODPORAMI

Kształtowanie optymalnych wysokości przekrojów mebli o schemacie swobodnie podpartej belki z zawinięciami poza podporami oraz wsporników po-

między podporami powinno być poprzedzone analizą zginania od następujących przypadków grawitacyjnego obciążenia:



Ryc. 8. Meble o schemacie swobodnie podpartej belki z zawinięciami poza podporami i wsporników między podporami: a) stolik ze swobodnie podpartą belką o rozpiętości wyraźnie większej niż rozpiętość każdego ze wsporników; b) rzeczywisty i zastępczy schemat stolika z ryc. 8a; c) linie wpływu momentów na górze niezawiniętych wsporników oraz na dole niezawiniętej części swobodnie podpartej belki z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; d) wykres momentów z zacięowanymi maksymalnymi wartościami na górze niezawiniętych wsporników oraz na dole niezawiniętej części swobodnie podpartej belki; e) linia wpływu momentu na górze niezawiniętej części swobodnie podpartej belki z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; f) wykres momentów z zacięowanymi maksymalnymi wartościami na górze niezawiniętej części swobodnie podpartej belki; g) linie wpływu momentów wewnątrz prawego zawinięcia swobodnie podpartej belki z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; h) wykres momentów z zacięowanymi maksymalnymi wartościami wewnątrz prawego zawinięcia swobodnie podpartej belki i na górze niezawiniętego prawego wspornika; i) linie wpływu momentów na zewnątrz prawego zawinięcia swobodnie podpartej belki z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; j) wykres momentów z zacięowanymi maksymalnymi wartościami na zewnątrz prawego zawinięcia swobodnie podpartej belki i na górze niezawiniętego lewego wspornika; k) obwiednia momentów stolika z ryc. 8a; l) forma stolika z ryc. 8a wynikająca z pracy konstrukcji; m) stolik, źródło: <http://www.endtables-direct.com/fraser-black-glass-coffee-table>; n) stolik, źródło: <http://www.worldlux.pl/newsy/Stylowe-Stoliki-Od-Unto-To-This-Last,1512.html>; o) stolik, źródło: <http://www.meubles-delmas.com/salon/25-bout-de-canape-combi.html>. Rys. autorka

Fig. 8. Furniture of scheme of simply supported beam with coiled parts beyond supports and cantilevers between supports: a) table with simply supported beam of span clearly greater than span of each cantilever; b) actual and corresponding scheme of the table from Fig. 8a; c) influence lines of moment at the top of uncoiled cantilevers and at the bottom of uncoiled part of simply supported beam with most unfavourable gravitational load; d) moment diagram with shaded maximum values at the top of uncoiled cantilevers and at the bottom of uncoiled part of simply supported beam; e) influence line of moment at the top of uncoiled part of simply supported beam with most unfavourable gravitational load; f) moment diagram with shaded maximum values at the top of uncoiled part of simply supported beam; g) influence lines of moment inside right coiled part of simply supported beam with most unfavourable gravitational load; h) moment diagram with shaded maximum values inside right coiled part of simply supported beam and at the top of uncoiled right cantilever; i) influence lines of moment on the outside of right coiled part of simply supported beam with most unfavourable gravitational load; j) moment diagram with shaded maximum values on the outside of right coiled part of simply supported beam and at the top of uncoiled left cantilever; k) envelope of moments of the table from Fig. 8a; l) form of the table from Fig. 8a resulting from structural behaviour; m) table, source: <http://www.endtables-direct.com/fraser-black-glass-coffee-table>; n) table, source: <http://www.worldlux.pl/newsy/Stylowe-Tablei-Od-Unto-To-This-Last,1512.html>; o) table, source: <http://www.meubles-delmas.com/salon/25-bout-de-canape-combi.html>. Fig. the author.

- obciążenie na niezawiniętej części belki i obu wspornikach (ryc. 8c), powodujące maksymalne zginanie dołu niezawiniętej części belki i góry niezawiniętych wsporników (ryc. 8d);
- obciążenie na obu zawinięciach belki (ryc. 8e), powodujące maksymalne zginanie góry niezawiniętej części belki (ryc. 8f);
- obciążenie na prawym wsporniku oraz na lewym zawinięciu belki (ryc. 8g), powodujące maksymalne zginanie wewnętrznej strony prawego zawinięcia belki (ryc. 8h) oraz odwrotny przypadek dla wewnętrznej strony lewego zawinięcia belki;
- obciążenie na prawym zawinięciu belki, na niezawiniętej części belki oraz na lewym wsporniku (ryc. 8i), powodujące maksymalne zginanie zewnętrznej strony prawego zawinięcia belki (ryc. 8j) oraz odwrotny przypadek dla zewnętrznej strony lewego zawinięcia belki.

Obwiednia momentów od tych przypadków obciążenia, pokazana na rycinie 8k, prowadzi do optymalnej formy swobodnie podpartej belki z coraz większą wysokością przekrojów zawinięć, im dalej od linii podpór, i największą wysokością przekroju niezawiniętej części w środku (ryc. 8l). Meble przedstawione na rycinach 8m-8n mają optymalne przekroje o tym samym charakterze. Optymalna forma stolika z ryciny 8o różni się tylko tym, że największy przekrój niezawiniętej części swobodnie podpartej belki występuje nie w środku, ale w pobliżu środka, bliżej strony bez wspornika. Optymalna forma niezawiniętej części ze stałą wysokością przekroju występuje w meblach o tym schemacie, gdy rozpiętości zawinięć belki są wyraźnie dłuższe niż rozpiętość niezawiniętej części. Natomiast optymalna zmiana wysokości przekrojów zawinięć zawsze rośnie wraz z oddalaniem się od linii podpór.

6. SWOBODNIE PODPARTA BELKA Z ZAWINIĘCIAMI MIĘDZY I POZA PODPORAMI ORAZ WSPORNIKI MIĘDZY I POZA PODPORAMI

Najbardziej niekorzystne przypadki ciągłego obciążenia grawitacyjnego belki w meblach o schematach swobodnie podpartej belki z dwoma zawinięciami oraz dwóch wsporników utwierdzonych w tej belce, przy czym zarówno belka, jak i wsporniki występują poza i między podporami, są pokazane na rycinie 9. Części prętów z maksymalnymi wartościami momentów od każdego przypadku obciążenia zostały oznaczone na rycinie 9 linią przerywaną po stronie rozciąganej lub literą T, z trzonem T przecinającym pręt w pojedynczym przekroju z maksymalnym momentem i poprzeczką T po stronie rozciąganej. Przypadki obciążenia swobod-

nie podpartej belki obejmują (zawinięcia i część niezawinięta dotyczą belki):

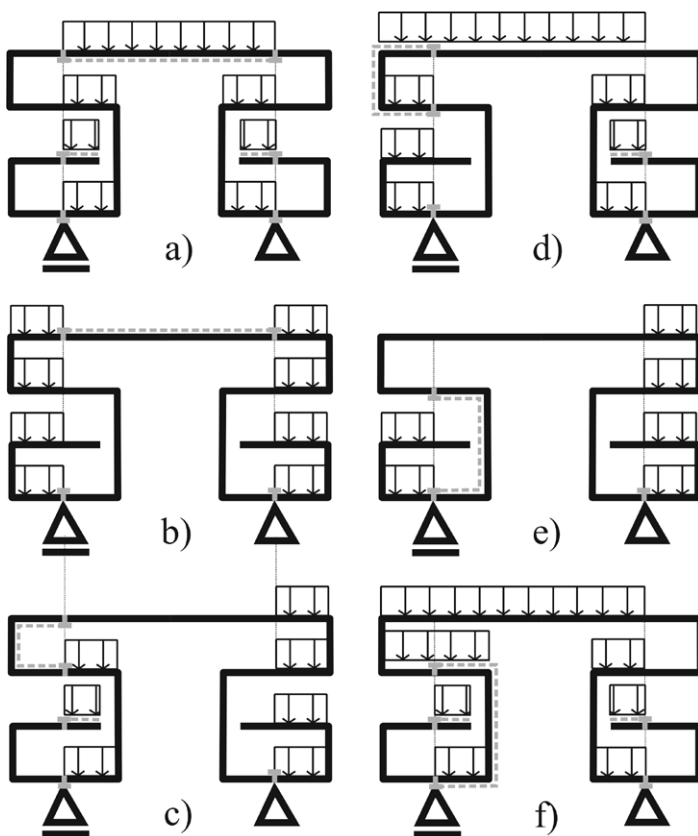
- obciążenie na niezawiniętej części, na obu zawinięciach między podporami, na lewym wsporniku na prawo od linii lewej podpory i na prawym wsporniku na lewo od linii prawej podpory (daje maksymalne wartości momentów na dole niezawiniętej części, ryc.9a);
- obciążenie na obu zawinięciach poza podporami, na lewym wsporniku na lewo od linii lewej podpory i na prawym wsporniku na prawo od linii prawej podpory (daje maksymalne wartości momentów na górze niezawiniętej części, ryc.9b);
- obciążenie na lewym zawinięciu między podporami, na lewym wsporniku na prawo od linii lewej podpory, na prawym zawinięciu poza podporą i na prawym wsporniku na prawo od linii prawej podpory (daje maksymalne wartości momentów wewnątrz lewego zawinięcia poza podporą, ryc. 9c), odwrotnie w przypadku momentów wewnątrz prawego zawinięcia poza podporą;
- obciążenie na lewym zawinięciu poza podporą, na lewym wsporniku na lewo od linii lewej podpory, na niezawiniętej części, na prawym zawinięciu między podporami oraz na prawym wsporniku na lewo od linii prawej podpory (daje maksymalne wartości momentów na zewnątrz lewego zawinięcia poza podporą, ryc. 9d), odwrotnie w przypadku momentów na zewnątrz prawego zawinięcia poza podporą;
- obciążenie na lewym wsporniku na lewo od linii lewej podpory, na prawym zawinięciu poza podporą oraz na prawym wsporniku na prawo od linii prawej podpory (daje maksymalne wartości momentów wewnątrz lewego zawinięcia między podporami, ryc. 9e), odwrotnie w przypadku momentów wewnątrz prawego zawinięcia między podporami;
- obciążenie na lewym zawinięciu poza podporą i między podporami, na lewym wsporniku na prawo od linii lewej podpory, na niezawiniętej części, na prawym zawinięciu między podporami oraz na prawym wsporniku na lewo od linii prawej podpory (daje maksymalne wartości momentów na zewnątrz lewego zawinięcia między podporami, ryc. 9f), odwrotnie w przypadku momentów na zewnątrz prawego zawinięcia między podporami. Najniekorzystniejsze warianty obciążeń zawiniętego wspornika są pokazane na rycinie 10. Szczegółowe omówienie pracy mebli z zawiniętym wspornikiem zostało zawarte w innym artykule autorki¹⁹. Części wsporników z maksymalnymi wartościami momentów od poszczególnych przypadków obciążeń są zazna-

czony na rycinie 10 linią przerywaną, T oraz L. Najbardziej niekorzystne przypadki obciążeń wspornika obejmują:

- obciążenie na całej niezawiniętej części, dające maksymalne wartości momentów na górze tej części (ryc.10a);
- obciążenie na niezawiniętej części od swobodnego końca do linii pionowej przechodzącej przez wybrany przekrój zawinięcia (tu 3 przekroje A, B i C), dające maksymalną wartość momentu na dole zawinięcia w tym przekroju (ryc. 10b-10d);
- obciążenie na niezawiniętej części i na zawinięciu po przeciwnej stronie linii pionowej przechodzącej przez wybrany przekrój zawinięcia (tu 3 przekroje A, B i C), dające maksymalną wartość momentu na górze zawinięcia w tym przekroju (ryc. 10e-10g).

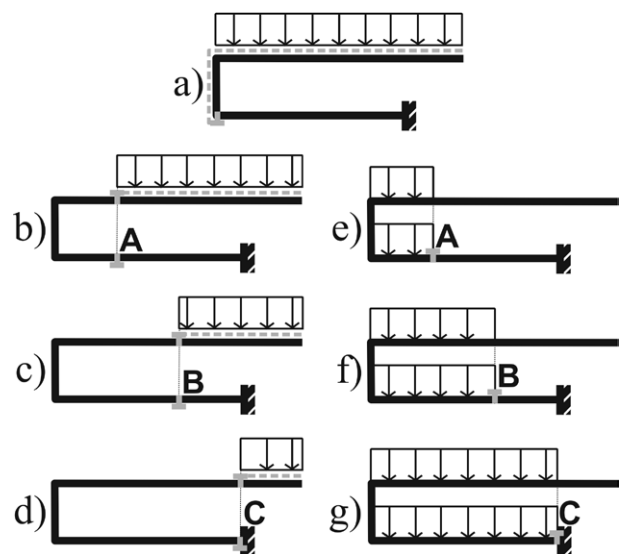
Kształtowanie optymalnej formy zawinięcia wspornika wymaga rozważenia przypadków obciążeń

pokazanych na rycinach 10b-10g w tym większej liczbie przekrojów, im zawinięcie jest dłuższe. Następnie należy sporządzić obwiednie maksymalnych momentów po obu stronach zawinięcia na drodze aproksymacji maksymalnych wartości momentów otrzymanych w tych przekrojach i dostosować optymalną grubość do obwiedni. Prostszy sposób doboru optymalnej formy wymaga znalezienia przekroju zawinięcia o minimalnej wysokości, w którym występuje minimalna wartość bezwzględna momentu od obciążeń na całym wsporniku (na niezawiniętej części i zawinięciu). W tym przekroju trzeba znaleźć wartości momentów od dwu przypadków obciążenia, takich jak dla przekrojów na rycinach 10b-10g, wybrać wartość bezwzględnie większą i na jej podstawie dobrać najmniejszą wysokość przekroju zawinięcia. Jeśli ten przekrój nie występuje przy utwierdzeniu, to należy również znaleźć bezwzględnie maksymalną wartość momentu przy utwierdzeniu.



Ryc. 9. Najbardziej niekorzystne przypadki obciążenia belki o schemacie swobodnie podpartej belki z dwoma zawinięciami i dwóch wsporników (zawinięcia i wsporniki poza i między podporami), dające maksymalne wartości momentów na odcinkach przętów oznaczonych linią przerywaną i w przekrojach oznaczonych T lub L. Rys. autorka

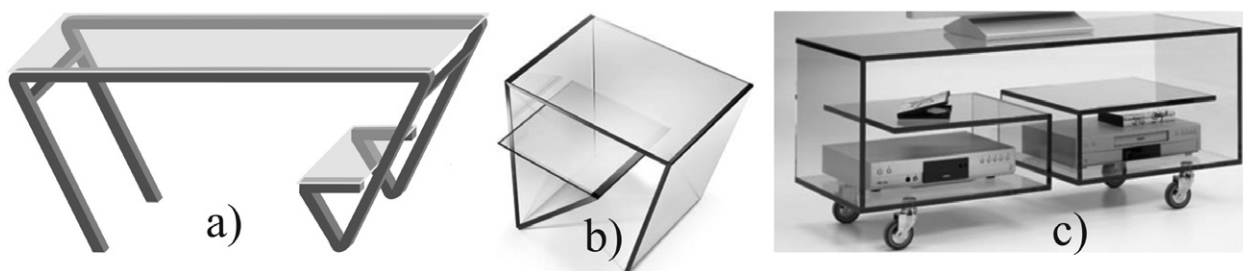
Fig. 9. Most unfavourable load cases of furniture with scheme of simply supported beam with two coiled parts and two cantilevers (coiled parts and cantilevers beyond and between supports), giving maximum moment values on segments highlighted by dashed line and in cross sections with T or L. Fig. the author



Ryc. 10. Najbardziej niekorzystne przypadki obciążenia zawiniętego wspornika, dające maksymalne wartości momentów na odcinkach przętów oznaczonych linią przerywaną i w przekrojach oznaczonych T lub L. Rys. autorka

Fig. 10. Most unfavourable load cases of coiled cantilever, giving maximum moment values on segments highlighted by dashed line and in cross sections with T or L. Fig. the author

¹⁹ A. Kozikowska, *Kształtowanie form ...*, op. cit.



Ryc. 11. Meble o schemacie swobodnie podpartej belki z zawinięciami poza podporami oraz wsporników między i poza podporami: a) stolik; b) stolik, projekt Elisabetta Gonzo and Alessandro Vicari, źródło: <http://www.tonellidesign.com/eng/prodotti.php?id=70&des=12>; c) stolik, projekt Isao Hosoe, źródło: <http://www.tonellidesign.com/eng/prodotti.php?id=157&des=16&pag=4692>. Rys. autorka

Fig. 11. Furniture of scheme of simply supported beam with coiled parts beyond supports and cantilevers between and beyond supports: a) table; b) table design: Elisabetta Gonzo and Alessandro Vicari, source: <http://www.tonellidesign.com/eng/prodotti.php?id=70&des=12>; c) table, design: Isao Hosoe, source: <http://www.tonellidesign.com/eng/prodotti.php?id=157&des=16&pag=4692>. Fig. the author.

Meble pokazane na rycinie 11 mają schematy belek z zawinięciami tylko poza podporami, dlatego przy doborze optymalnych kształtów ich swobodnie podpartych belek trzeba uwzględnić tylko warianty obciążeń pokazane na rycinach 9a-9d. Natomiast ich wsporniki mają zawinięcia i kształtowanie ich form jest związane z analizą przypadków przedstawionych na rycinie 10.

PODSUMOWANIE

W artykule przeanalizowano pracę konstrukcji mebli o schemacie swobodnie podpartej belki oraz jednego lub dwóch wsporników przyłączanych do końców belki. Zbadano wpływ zakrzywienia osi prętów i płyt tych mebli na wysokości ich przekrojów, dostosowane do obwiedni maksymalnych momentów zginających. Pokazano wiele szczegółowych rozwiązań zadań optymalizacji kształtu i wykryto charakterystyczne cechy optymalnych form. Optymalne wysokości przekrojów prętów i płyt swobodnie podpartej belki są najmniejsze na liniach pionowych przechodzących przez podpory, w tym na podporze bez wspornika. Wysokości przekrojów zawięć belki są tym większe, im bardziej oddalone są od linii podpór. Najlepszy kształt niezawiniętej części belki (między liniami podpór) jest uzależniony od rozpiętości fragmentów belki rozdzielonych przez linie podpór. Jeśli poza podporami występują długie wsporniki i długie zawinięcia belki, natomiast między podporami są krótkie zawinięcia belki i krótka część niezawinięta, to wysokość przekroju niezawiniętej części jest stała (w meblach symetrycznych) lub stopniowo wzrasta od przecięcia z linią jednej podpory do przecięcia z linią drugiej. W przeciwnym przypadku część niezawinięta ma największy przekrój w środku (w meblach symetrycznych) lub w pobliżu środka i coraz mniejszy, im bliżej jest przecięć z linia-

mi podpór. Wspornik niezawinięty ma coraz większy przekrój, im bliżej utwierdzenia, a przekrój zawinięcia z najmniejszą wartością momentu od obciążenia na całym wsporniku ma najmniejszą wysokość. Wyniki pracy mogą pomóc architektom w projektowaniu ekonomicznych i estetycznych form mebli o analizowanych schematach, nie tylko poprzez dobieranie wysokości przekrojów do intensywności zginania, ale również sugerując kształt osi prętów i płyt.

LITERATURA

1. **Becker H. H. (2015)**, *Structural Competency for Architects*, Taylor & Francis, New York.
2. **Cywiński Z. (2006)**, *Mechanika budowli w zadaniach. Układy statycznie wyznaczalne*, PWN, Warszawa.
3. **Darkov A., Kuznetsov V. (1969)**, *Structural mechanics*, Mir Publishers, Moscow.
4. **Kozikowska A. (2010)**, *Forma a konstrukcja mebli. Meble o konstrukcji wspornikowej*, „Architecturae et Artibus” vol. 4.
5. **Kozikowska A. (2010)**, *Forma a konstrukcja mebli. Meble o konstrukcji belkowej oraz ramowej*, „Architecturae et Artibus” vol. 4.
6. **Kozikowska A. (2013)**, *Forma a konstrukcja mebli. Meble o konstrukcji płyt zginanych jednokierunkowo*, „Architecturae et Artibus” vol. 1.
7. **Kozikowska A. (2013)**, *Forma a konstrukcja mebli. Stoły*, „Architecturae et Artibus” vol. 3.
8. **Kozikowska A. (2015)**, *Kształtowanie form mebli o schematach zakrzywionych swobodnie podpartych belek ze wspornikami przyłączonymi poza końcami belek*, „Architecturae et Artibus” vol. 4.
9. **Litewka P. Sygulski R. (2012)**, *Wybrane zagadnienia zaawansowanej mechaniki budowli*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
10. **Macdonald A. J. (2001)**, *Structure and Architecture*, Taylor & Francis, New York.

11. **Olsen C., Namara S. M. (2014)**, *Collaborations in Architecture and Engineering*, Taylor & Francis, New York.
12. **Prakash Rao D. S. (1997)**, *Graphical methods in structural analysis*, Universities Press, Hyderabad.
13. **Pressman A. (2014)**, *Designing Relationships: The Art of Collaboration in Architecture*, Taylor & Francis, New York.
14. **Sandaker B. N. (2008)**, *On Span and Space: Exploring Structures in Architecture*, Taylor & Francis, New York.
15. **Shihua B., Yaoging G. (2008)**, *Structural Mechanics*, Wuhan University Press, Wuhan.
10. http://www.alibaba.com/product-detail/Hot-bending-glass-little-coffee-table_1004504826.html (ryc. 4m) [dostęp: 24-04-2015].
11. www.houzz.com/photos/751481/Le-Chat-Lounge-Chair-Artifort-modern-chairs (ryc. 4n) [dostęp: 24-04-2015].
12. <http://manufakturaklimatu.pl/index.php/gazetnik.html> (ryc. 4o) [dostęp: 24-04-2015].
13. <http://www.domplusdom.pl/blog/gazetnik-anu-desing> (ryc. 4p) [dostęp: 24-04-2015].
14. <http://decoloratorium.blogspot.com/2013/10/korek-we-wnetrze.html> (ryc. 4q) [dostęp: 24-04-2015].
15. <http://www.sklep.meble.pl/p51479,gazetnik-g4-wykonany-ze-sklejki-halmar.html> (ryc. 5l) [dostęp: 24-04-2015].
16. http://www.lepukka.pl/produkt/gazetnik_woodear.html (ryc. 5m) [dostęp: 24-04-2015].
17. <http://interiordesign-tips.org/v-collection-outdoor-furniture/> (ryc. 6a, 6k, 6m) [24-04-2015].
18. http://www.camif.fr/10005246-bout-de-canape-samba.html?utm_medium=Affiliation&utm_campaign=349288&utm_source=Affilinet (ryc. 6n) [24-04-2015].
19. http://it.aliexpress.com/store/product/Hot-Bend-Glass-Coffee-Table-Black-Glass-Side-Table-Measures-100-x-60-x-43cm/314798_1503266085.html (ryc. 6o) [24-04-2015].
20. https://lh6.googleusercontent.com/-ccxpcqxHINK/TYs-m_Sn_NI/AAAAAAAAUBk/ZgZ1klSSZxw/s1600/Magino-Stool.jpg (ryc. 7h) [dostęp: 24-04-2015].
21. <http://www.endtables-direct.com/fraser-black-glass-coffee-table> (ryc. 8m) [dostęp: 24-04-2015].
22. <http://www.worldlux.pl/newsy/Stylowe-Stoliki-Od-Unto-This-Last,1512.html> (ryc. 8n) [dostęp: 24-04-2015].
23. <http://www.meubles-delmas.com/salon/25-bout-de-canape-combi.html> (ryc. 8o) [dostęp: 24-04-2015].
24. <http://www.tonellidesign.com/eng/prodotti.php?id=70&des=12> (ryc. 11b) [dostęp: 24-04-2015].
25. <http://www.tonellidesign.com/eng/prodotti.php?id=157&des=16&pag=4692> (ryc. 11c) [dostęp: 24-04-2015].

ŹRÓDŁA INTERNETOWE

1. <http://www.tonellidesign.com/eng/prodotti.php?id=71> (ryc. 2a) [dostęp: 24-04-2015].
 2. <http://www.aliexpress.com/item/Best-off-simple-laptop-computer-desk-office-desk-desktop-fashion-student-bedroom-living-room-study-tables/32313129988.html> (ryc. 2j) [dostęp: 24-04-2015].
 3. <http://weheartit.com/tag/hospital%20bedside%20table> (ryc. 2k) [24-04-2015].
 4. http://www.design-plaza.de/media/image/thumbnail/tonin-casa-couchtisch-velo-8166-detail-4_285x255.jpg (ryc. 2l) [dostęp: 24-04-2015].
 5. <http://www.digsdigs.com/cool-ultra-modern-dining-and-low-tables-by-rlos-design/> (ryc. 3g) [24-04-2015].
 6. https://www.1stdibs.com/furniture/tables/coffee-tables-cocktail-tables/cantilevered-gold-smokey-glass-g-coffee-table-mid-century/id-f_1546112/ (ryc. 3m) [24-04-2015].
 7. <http://www.superwnetrze.pl/Stoly-do-salonu,k2781/Stolik-kawowy-na-kolkach-King-Bath-Six,t56820.html> (ryc. 3n) [dostęp: 24-04-2015].
 8. <http://www.digsdigs.com/cool-ultra-modern-dining-and-low-tables-by-rlos-design/> (ryc. 3o) [24-04-2015].
 9. <http://blogs.tribuna.com.br/designdecor/2012/08/pecas-descoladas-dos-irmaos-fahrer/> (ryc. 4j) [dostęp: 24-04-2015].
- Pracę wykonano w ramach projektu badawczego S/WA/1/2011 Politechniki Białostockiej.