

# ARCHITEKTONICZNY PROJEKT TURBINY WIATROWEJ DLA LEPSZEJ AKCEPTACJI SPOŁECZNEJ

A. P. GAWLIKOWSKA, M. MOY DE VITRY, N. CHOKANI, R. S. ABHARI

## STRESZCZENIE

Obecny trend w sektorze energii minimalizacji zależności od paliw kopalnych opiera się na stopniowym rozwoju odnawialnych źródeł energii. W celu utrzymania ekonomicznie wydajnego tempa rozwoju energetyki wiatrowej, w krajach północnej Europy i która jest technologicznie zaawansowana, należy znaleźć rozwiązania dla powiększającej się bariery społecznej. Proponowane jest w tym celu zastosowanie Architektonicznego Projektu Turbiny Wiatrowej. Sugerowane podejście dostosowuje rozwiązania z innych obszarów ludzkiego doświadczenia, które tradycyjnie stosują rozwiązania dla sytuacji, w których następuje interakcja społeczeństwa ze sztucznymi wyrobami i konstrukcjami. Proponowane podejście wykorzystuje doświadczenia z zakresu architektury, urbanistyki i marketingu, uwzględniając jednocześnie kryteria inżynierskie i możliwości produkcji. Biorąc pod uwagę psychologię formy, został zaproponowany nowy Architektoniczny Projekt Turbiny Wiatrowej. Projekt uwzględni estetyczne wytyczne dotyczące proporcji

oraz bierze pod uwagę elementy psychologiczne np. poczucie bezpieczeństwa i wprowadzenia strefy buforowej między skalą turbiny a skalą otaczającego krajobrazu. W innowacyjny sposób nadaje tożsamość, proponując wprowadzenie dodatkowych funkcji przestrzennych i partycypacyjnego procesu projektowania. Integralność strukturalna nowatorskiej turbiny wiatrowej jest lepsza od tradycyjnej konstrukcji w warunkach obniżonego naprężenia, odkształcenia i wybożenia oraz posiada większą obciążalność. Dzieje się to kosztem dodatkowej wagi i złożoności elementów strukturalnych, prowadząc również do możliwej nieznacznej poprawy wydajności rocznej produkcji elektryczności i przedłużenia strukturalnej i mechanicznej długości życia turbiny.

Słowa kluczowe: energetyka wiatrowa, akceptacja społeczności lokalnej, partycypacja, architektura, analiza inżynierska, psychologia formy, sprawiedliwość proceduralna

## ARCHITECTURAL WIND TURBINE DESIGN FOR IMPROVED SOCIAL ACCEPTANCE

### ABSTRACT

The current trend in the energy sector to minimize fossil fuel dependency relies on the gradual growth of renewable energy sources. In order to ensure the further development of wind energy, which is economically efficient and technologically advanced, barriers to social acceptance must be mitigated. The use of Architecturally Designed Wind Turbines is proposed as a novel approach to this challenge. By adapting solutions from other fields of human activity, which traditionally address social interaction with man-made products and structures, the proposed approach uses experiences from architecture, urban planning and marketing, and incorporates them into a well-engineered wind turbine mechanical design and manufacturability. Taking account of the psychology of form, a novel architectural design for wind turbines is proposed, which respects aestheti-

cal guidelines for proportions and gives sense of security and gradual scale buffer zone issues. The innovation in addressing the phenomenon of identity is based on additional social functionalities and a participatory design process. The structural integrity of the novel wind turbine design is superior to the traditional one in terms of decreased stresses, deflection and buckling, and increased load capacity. At the cost of additional weight and complexity, the new design allows for a slight improvement of the annual energy yield and increases the structural and mechanical life expectancy of the turbine.

Key words: wind power, acceptance of the local community, participation, architecture, engineering analysis, psychology of form, procedural justice

## 1. Wprowadzenie

Niezależność energetyczna stanowi jeden z najważniejszych czynników napędzających transformację sektora energetycznego. Jest to powszechny problem dla krajów Unii Europejskiej, która uzależniona jest od importu energii z państw trzecich. Odnawialne źródła energii (RES) są odpowiedzią na wyzwanie, jakim jest zwiększenie lokalnej produkcji, które Unia Europejska już w 2007 postanowiła zwiększyć pod względem udziału energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych do 20% w końcowym zużyciu do roku 2020.<sup>1</sup> W 2014 roku odnawialne źródła energii wyprodukowały 16% zużycia energii brutto, co stanowiło 80% wartości docelowej na rok 2020.<sup>2</sup> Aby wypełnić to zobowiązanie państw członkowskich Unia Europejska musi w dalszym ciągu zwiększyć udział Odnawialnych Źródeł Energii w ogólnym portfelu mocy.

Wśród odnawialnych źródeł energii, szczególnie szybki rozwój nastąpił w przypadku energetyki wiatrowej, która w 2016 roku stanowiła 51% nowych mocy zainstalowanych w Unii Europejskiej. RES reprezentował 26% wszystkich nowych mocy elektrycznych zainstalowanych w UE w 2012 roku<sup>3</sup>, ale tempo rozwoju lądowych elektrowni wiatrowych zostało spowolnione ze względu na bariery, które doprowadziły do przerwania lub zablokowania około 90% projektów wiatrowych<sup>4</sup>. Z około 12 GW mocy produkcyjnych instalowanych corocznie od 2012 roku, energetyka wiatrowa stała się w 2016 roku drugą największą formą mocy produkcji elektryczności w EU.<sup>5</sup> Aby podtrzymać to tempo wzrostu konieczna jest regularna identyfikacja i łagodzenie barier dla planowania i instalacji energetyki wiatrowej. Problemy społecznej akceptacji stanowią jeden z najwyższych kosztów dla europejskiej energetyki wiatrowej, ponieważ powodują, że 30% tych projektów zmierzyć się musi z czasowymi opóźnieniami lub jest stale blokowane.<sup>6</sup> Głównym

problemem jest percepcja lokalnych społeczności, które szczególnie negatywnie postrzegają wizualny wpływ nowych inwestycji energetyki wiatrowej.<sup>7</sup> Wiedza zgromadzona w branży marketingu, w którym od dziesięcioleci stosuje się techniki kształtowania postaw konsumentów i wyborców, może zostać wykorzystana przez przemysł wiatrowy, aby sprostać temu wyzwaniu.

Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie oceny inżynierskiej Architektonicznego Projektu Turbinowy Wiatrowej, która powstała w odpowiedzi na kwestie akceptacji społeczności lokalnej. Artykuł omawia po pierwsze wyzwania akceptacji społecznej, następnie weryfikuje kwestie związane z Architektonicznie Zaprojektowaną Turbiną Wiatrową, dalej prezentowane są ramy oraz wyniki analizy inżynierskiej. Główne ustalenia i ich konsekwencje zestawiono w podsumowaniu. W artykule została przedstawiona możliwość zastosowania w procesie akceptacji parków wiatrowych wiedzy uzyskanej z architektury, urbanistyki, marketingu i psychologii społecznej, przy jednoczesnym uwzględnieniu specyficznych zagadnień istotnych dla energetyki wiatrowej.

## 2. Akceptacja społeczna jako wyzwanie w sektorze energetyki wiatrowej

Protesty społeczne stanowią barierę, która utrudnia większości krajów europejskich osiągnięcie celów obniżenia emisji dwutlenku węgla, prowadzi do zwiększenia kosztów projektów z obszaru Odnawialnych Źródeł Energii, ich wyższego ryzyka oraz dłuższego czasu konstrukcji lub wręcz zablokowania projektów. Sprzeciw ma miejsce głównie w społecznościach lokalnych<sup>8</sup>, a wizualny wpływ na krajobraz jest uznawany za główną motywację dla opozycji<sup>9</sup>. Estetyka jest przedmiotem analiz w wielu dziedzinach, np. w obszarach architektury, urbanistyki i studiów marketingowych badano wpływ este-

<sup>1</sup> EC, Directive 2009/28/EC of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources, 2009.

<sup>2</sup> Eurostat, *Electricity Statistics*, 2017.

<sup>3</sup> EWEA, *Wind in power; 2016, European statistics*, 2017, [<http://www.ewea.org/statistics/>].

<sup>4</sup> PSEW, Polish Wind Energy Association, private communication, 2013.

<sup>5</sup> EWEA, *Wind...*, op. cit.

<sup>6</sup> DWIA and Fraunhofer, *Wind Barriers survey*, EWEA, *Administrative and grid access barriers to wind power*, 2010, [[http://www.windbarriers.eu/fileadmin/WB\\_docs/documents/WindBarriers\\_report.pdf](http://www.windbarriers.eu/fileadmin/WB_docs/documents/WindBarriers_report.pdf)].

<sup>7</sup> R. Thayer, H. Hansen, *Consumer Attitude and Choice in Local Energy Development*, Department of Environmental Design, University of California – Davis, 1989, s. 17–19.

<sup>8</sup> EWEA, *Social Acceptance of Wind Energy and Wind Farms. Wind energy – the facts: A guide to the technology, economics and future of wind power*, European Wind Energy Association, London, UK, Sterling, VA, 2009.

<sup>9</sup> J. B. Graham, J. R. Stephenson, I. J. Smith, *Public perceptions of wind energy developments: Case studies from New Zealand*, *Energy Policy*, vol. 37(9), 2009, s. 33–48.

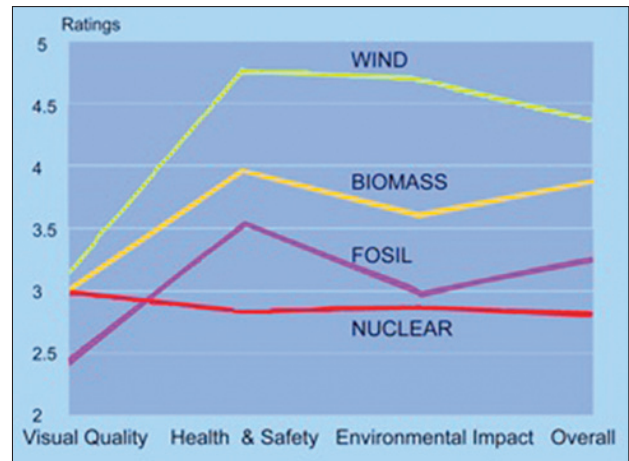
tyki na emocje, zachowanie i akceptację.<sup>10</sup> Wnioski z tych doświadczeń można częściowo zastosować w projektach mających na celu budowę wyższej lokalnej akceptacji projektów wiatrowych. Źródło problemu niskiej akceptacji projektów wiatrowych przez społeczności lokalne może zostać rozwiązane poprzez ponowne zaprojektowanie turbin wiatrowych jako unikalnych struktur, które uwzględniają estetyczne wytyczne, aspekty psychologiczne i partycypacji społecznej, oraz które są harmonijnie wkomponowane w krajobraz i dodają marketingową wartość dla regionu.

Energetyka wiatrowa jest najbardziej społecznie akceptowaną formą produkcji energii i przewyższa inne formy produkcji energii w zakresie akceptacji (il. 1) oraz dorównuje im pod względem percepcji ich jakości wizualnej.<sup>11</sup>

### 3. Kształtowanie akceptacji społecznej – lekcje z architektury

Architektura odgrywa ważną rolę w kształtowaniu myśli, uczuć i emocji użytkowników i obserwatorów. Architektura symboliczna może być ucieleśnieniem koncepcji władzy i dawać materialną formę ideałów, ale również lęków społecznych. Plany miast, jak również obiekty architektoniczne i relacje między nimi, wpływają na zachowanie i ścieżki ich użytkowników. Architektura może zatem stać się narzędziem do generowania emocji społecznych takich, jak na przykład strach, podniecenie, uwielbienie i agresja, a także wpływać na tworzenie się więzi społecznych.<sup>12</sup>

Potencjał architektury jako elementu polityki był znany już na wczesnych etapach powstawania państw narodowych, co można wywnioskować z reprezentatywnych obiektów architektonicznych. Poprzez kody symboliczne i przestrzenne, przestrzeń może mieć wpływ na postrzeganą siłę narodu, władzy i ideologii. Symboliczne obiekty związane z wartościami autotelicznymi to na przykład Europejskie Centrum Solidarności w Gdańsku (2004–2008) i Statua Wolności w Nowym Jorku (1884–1886), odpowiednio jako symbole solidarności i wolności.<sup>13</sup> Oba słowa i symbolizujące je obiekty przestrzenne mogą być



1. Badanie preferencji źródeł mocy wykazuje przewagę akceptacji energetyki wiatrowej w stosunku do innych źródeł. Na podstawie: P. Gipe, *Wind energy comes of age*, John Wiley & Sons, Inc New York, 1995, s. 287

1. A power plant preference study shows the advantage of wind power over other sources in terms of acceptance in most fields excluding visual quality. Source: after P. Gipe, *Wind energy comes of age*, John Wiley & Sons, Inc New York, 1995, p. 287

wykorzystywane jako narzędzie legitymizacji władzy i dlatego mogą być potencjalnie użyte jako instrumenty polityczne.<sup>14</sup>

Brak akceptacji społecznej nowych inwestycji przestrzennych został wcześniej zaobserwowany w rozwoju miast. Fenomen niskiej akceptacji inwestycji w najbliższym otoczeniu mieszkańców znany jest jako NIMBY (ang. Not In My Backyard – Nie Na Moim Podwórku). W niektórych przypadkach negatywnie postrzegane wizualne oddziaływanie inwestycji zostało przekształcone w pozytywnie odbierany efekt wizualny. Efekt ten uzyskano na przykład poprzez estetycznie wrażliwe projektowanie, zmieniające negatywne emocje i reakcje społeczne na pozytywne. Widok wysokich budynków może zarówno podnieść, jak i obniżyć wartość nieruchomości i zmienić atmosferę miejsca. Przykłady krajobrazów miejskich pokazane na ilustracjach (il. 2, 3) zostały wybrane ze względu na ich porównywalną skalę i kontrast estetyczny. Model komunistycznego bloku odrzucił koncepcję estetyki, co kontrastuje z architekturą Nowego Jorku, wyrażaną paradygmatem liberalnego rynku, w którym architektura jest ważnym elementem wizerunku firmy. Obraz Buka-

<sup>10</sup> R. L. Underwood, N. M. Klein, & R. R. Burke, *Packaging communication: Attentional effects of product imagery*, „Journal of Product & Brand Management”, vol. 10(7), 2001, s. 403–422; A. Gawlikowska, *Architecture in the center of conflict. Threats for its Identity*, Warsaw University of Technology, 2011.

<sup>11</sup> R. Thayer, H. Hansen, op. cit.

<sup>12</sup> A. Giddens, *Modernity and Self-Identity. Self and Society in the Late Modern Age*, Polity, Cambridge 1991.

<sup>13</sup> A. Gawlikowska, *Architecture...*, op. cit.

<sup>14</sup> P. Ricaeur, *Oneself as Another*, University of Chicago Press, Chicago 1990.





2. Od NIMBY do YIMBY: kontrastujące pod względem efektu wizualnego przykłady rozwoju miast poprzez różne podejście do estetycznie wrażliwego projektowania – panorama Bukaresztu. Źródło: <http://flickr.com/photos/8628950@N06/2788949359>
2. From NIMBY to YIMBY: an example of urban development showing a negative to positive visual impact transformation through aesthetically sensitive design – Bucharest Panorama. Source: <http://flickr.com/photos/8628950@N06/2788949359>



3. Od NIMBY do YIMBY: kontrastujące pod względem efektu wizualnego przykłady rozwoju miast poprzez różne podejście do estetycznie wrażliwego projektowania – panorama Nowego Jorku. Źródło: <http://pictures.4ever.eu/buildings/cities/new-york-157068>
3. From NIMBY to YIMBY: an example of urban development showing a negative to positive visual impact transformation through aesthetically sensitive design – New York Panorama. Source: <http://pictures.4ever.eu/buildings/cities/new-york-157068>

resztu powodować może subiektywny negatywny efekt wizualny, podczas gdy obraz Nowego Jorku dla dużego odsetku ludności może stanowić widok pożądany, co powoduje podniesienie wartości nieruchomości i jest przykładem YIMBY (ang. Yes In My Backyard – Tak Na Moim Podwórku).

Wiele branż uznało wizualny aspekt swoich produktów za ważny czynnik różnicowania i sprze-

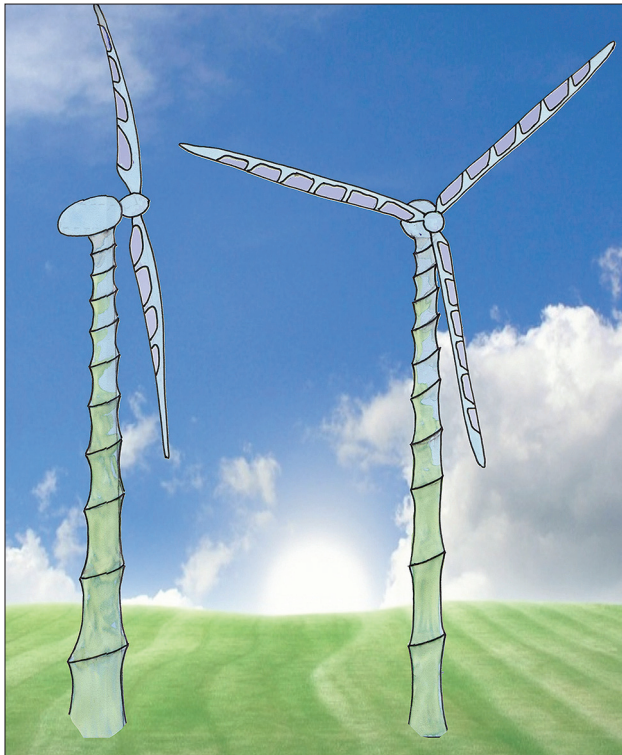
daży<sup>15</sup>, mogący wywołać reakcję emocjonalną<sup>16</sup> oraz wpływ na podejmowanie decyzji i motywację<sup>17</sup>. Lekcje z innych branż, których produkty mają mniejszą skalę, w związku z tym łatwiej jest je zaprojektować i wyprodukować, powodując krótszy cykl innowacji, powinny zostać zastosowane w branży energetyki wiatrowej. Na przykład tradycyjny czarny kabel słuchawek do telefonu został

<sup>15</sup> A. Alessi, *The Dream Factory*, Electa-Alessi, Milan 2000.

<sup>16</sup> R. L. Underwood, op. cit.

<sup>17</sup> A. Mäkelä, *Emotions, user experience and directions for designing emotional rich products*, Literature review. eDesign, Dec. 1999, [<http://www.hut.fi/~ahmakela/eDesign/literature.html>].





4. Różne konstrukcje wież turbin wiatrowych – koncepcja „Drzewo”. Źródło: ETH

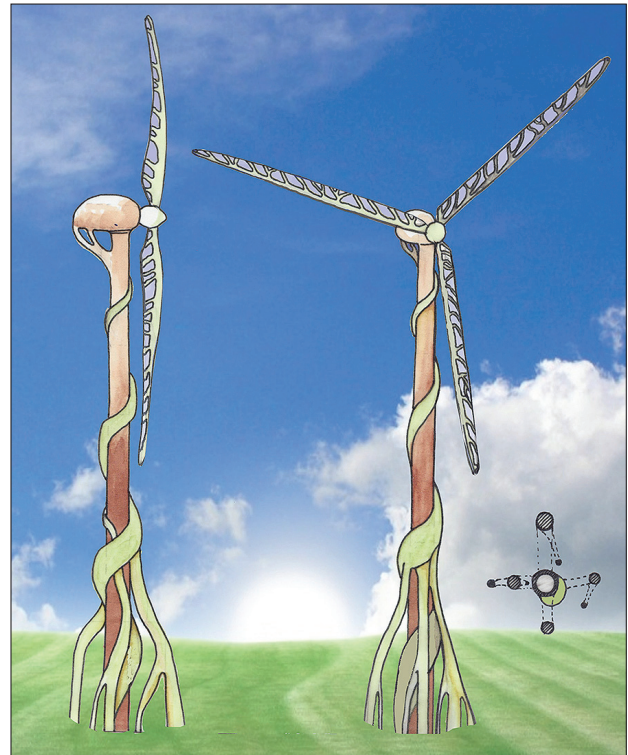
4. Various wind turbine tower designs – “Tree design” concept. Source: ETH

zmieniony w 2001 roku przez firmę Apple, która wprowadziła białe słuchawki z dołączonym białym kablem. Spowodowało to przełamanie status quo oraz otwarcie innowacyjnego rynku dla wielu kolorów, aktualnie dostępnych w branży. Obecnie zarówno kolor, jak i forma produktów są symbolem stylu życia ich właścicieli, a architektura miasta symbolizuje charakter i status jej obywateli.

#### 4. Architektoniczny Projekt Turbiny Wiatrowej – podejście koncepcyjne

W Architektonicznym Projekcie Turbiny Wiatrowej zostały zastosowane nowe wytyczne do wielomegawatowej turbiny wiatrowej o osi poziomej. Zastosowane rozwiązanie pochodzi z teorii architektonicznych i urbanistycznych oraz z metod komunikacji społecznej, w tym aspektów mimikry; przestrzennej i społecznej tożsamości; wytworzenia poczucia sprawiedliwości i otwartości procesu w społeczności lokalnej; a także zagadnienia poczucia bezpieczeństwa i psychologii formy.

Kryteria projektowania, które zostały wzięte pod uwagę, można podzielić na dwie kategorie: (I) inżynierskie, (II) projektowe i społeczne. Pośród zagadnień inżynierskich przeanalizowano następujące kwestie:



5. Różne konstrukcje wież turbin wiatrowych – koncepcja „Spirala”. Źródło: ETH

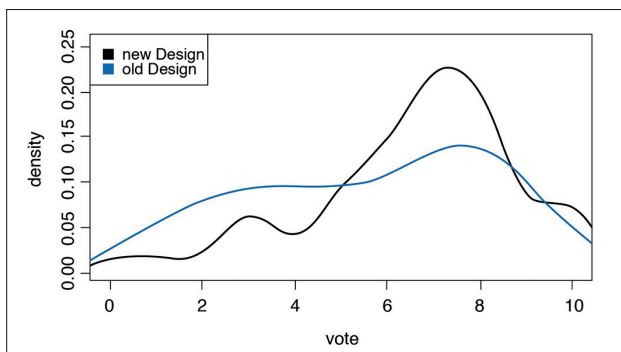
5. Various wind turbine tower designs – “Spiral design” concept. Source: ETH

- transport i montaż – konstrukcja musi być możliwa do transportu i logistyki oraz podlegać ograniczeniom pod względem wielkości i wagi;
- zdolności produkcyjne – problemy produkcyjne musiały zostać rozpatrzone i przedyskutowane z producentami;
- kwestie bezpieczeństwa i hałasu – miały wpływ na ostateczny wybór projektu;
- moment zginający i zmniejszenie obciążeń – wpływ na projekt strukturalny;
- ekonomia – została wykorzystana jako podstawowa metryka, rozpatrywana na wszystkich etapach projektu.

Wśród zagadnień estetycznych i społecznych zostały uwzględnione następujące kryteria:

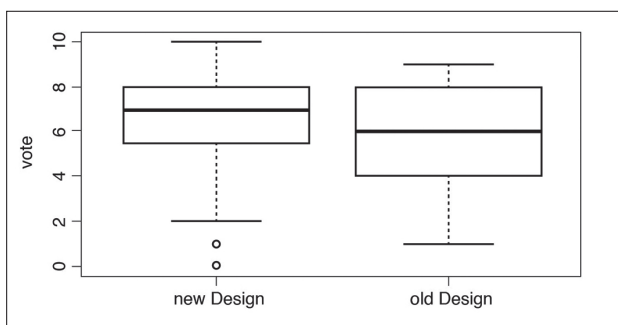
- psychologia kształtu;
- usadowienie w krajobrazie;
- symboliczne konotacje i walidacja tożsamości lokalnej;
- poczucie sprawiedliwości i funkcjonalności;
- poczucie bezpieczeństwa.

Badano różne kształty wież turbin wiatrowych: na przykład „drzewa” (il. 4) lub „spirali” (il. 5), ale nie zostały one dopuszczone do dalszych analiz ze względu na wysokie koszty produkcji i złożoność konstrukcji, a także negatywny wpływ



6. Wyniki badania akceptacji projektów turbin wiatrowych – krzywa rozproszenia. Źródło: ETH

6. Results from the acceptance survey – dispersion curve. Source: ETH



7. Wyniki badania akceptacji projektów turbin wiatrowych – średnie wartości. Źródło: ETH

7. Results from the acceptance survey – mean values. Source: ETH

na efektywność produkcji energii i poziom emisji hałasu.

Proponowany Architektoniczny Projekt Turbiny Wiatrowej najbardziej pomyślnie spełnił wytyczne projektowe, utrzymując wysoki poziom akceptacji, który został przetestowany przez badania<sup>18</sup>. W ramach badań akceptacji społecznej 64 uczestników zostało zapytanych o wpływ projektu turbin wiatrowych na ich poziom akceptacji. W tej grupie testowej tradycyjna konstrukcja turbiny wiatrowej otrzymała średni poziom akceptacji 5,62 w skali dziesięciostopniowej, natomiast Architektonicznie Zaprojektowana Turbina Wiatrowa uzyskała poziom 6,59 w tej samej skali (il. 6, 7).

Architektoniczny Projekt Turbiny Wiatrowej (il. 8, 9) uwzględniła możliwość jej wyprodukowa-

nia, transportu i montażu w ekonomicznie uzasadniony sposób, przy równoczesnym pozytywnym wpływie na zmniejszenie hałasu, naprężenia i momentów zginających konstrukcji. Projekt turbiny został również oparty na wytycznych estetycznych.

#### 4.1. Psychologia kształtu

Forma ma istotny wpływ na psychologię indywidualną i społeczną, w tym emocje, zachowania i poczucie bezpieczeństwa.<sup>19</sup> Proste i potężne kształty mogą przekazać siłę, męskość, agresję i dominację, natomiast krzywizna, lekkość i krągłości symbolizują harmonię, delikatność, kobiecość, radość, współczucie i bezpieczeństwo.<sup>20</sup> Proste linie są charakterystyczne dla tradycyjnie zaprojektowanych turbin wiatrowych, podczas gdy miękkie, krzywe linie i zaokrąglone kształty leżą u podstawy Architektonicznego Projektu Turbiny Wiatrowej. Jest on inspirowany morfologią roślin i stwarza – poprzez zastosowanie krzywizny – organiczne wrażenie. Zakrzywiona górna wieża i rozgałęziona niższa wieża to charakterystyczne cechy projektu. Krzywizna wymusiła przeprojektowanie mechanizmu odchylenia kierunkowego, który obraca całą górną część wieży. Dodatkowo zastosowano w całej nowej konstrukcji złote proporcje, uznane za najbardziej atrakcyjne dla oka ludzkiego.

#### 4.2. Usadowanie w krajobrazie

Zagadnienie to rozwiązano poprzez zaproponowane linie krzywe, które są mniej dominujące i przypominają naturalne kształty krajobrazu. Stopniowo powiększająca się struktura ma na celu złagodzenie kontrastu skali z otaczającym krajobrazem<sup>21</sup>, dodatkowo minimalizując percepcję agresywności kształtu.<sup>22</sup>

#### 4.3. Symboliczne konotacje i walidacja tożsamości lokalnej

Tożsamość społeczna i tożsamość przestrzenna są ze sobą powiązane.<sup>23</sup> Dlatego tożsamość społecz-

<sup>18</sup> Badanie przeprowadzili na głównym dworcu kolejowym w Zurychu, w Szwajcarii we wrześniu 2013 r. dr A. P. Gawlikowska i student M. Marini.

<sup>19</sup> A. Gawlikowska, *Architecture...*, op. cit.

<sup>20</sup> B. H. Schmitt, A. Simms, *Marketing Aesthetics: The Strategic Management of Brands, Identity, and Image*, The Free Press, New York 1997.

<sup>21</sup> CA-OWEE, *Offshore Wind Energy: Ready to Power a Sustainable Europe – Final report*, Concerted Action on Offshore Wind Energy in Europe, Delft, The Netherlands 2001, [www.offshorewindenergy.org].

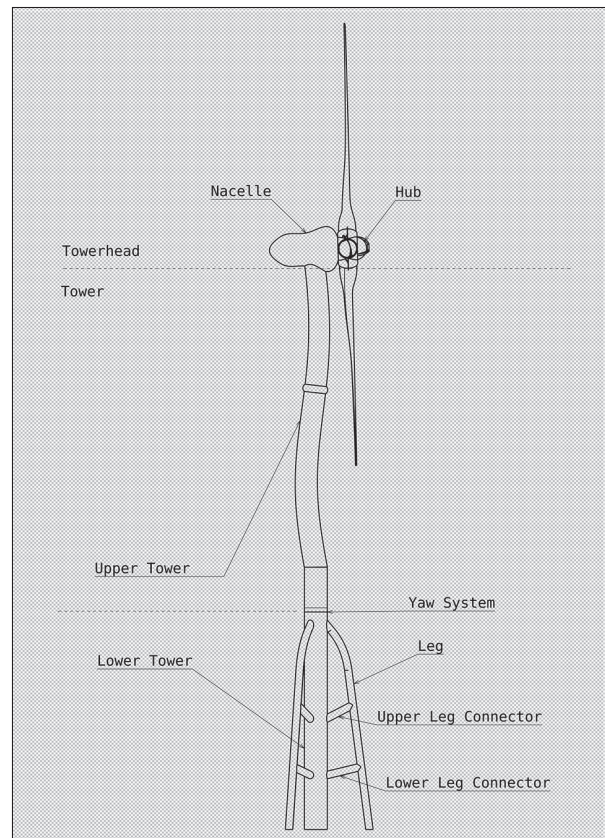
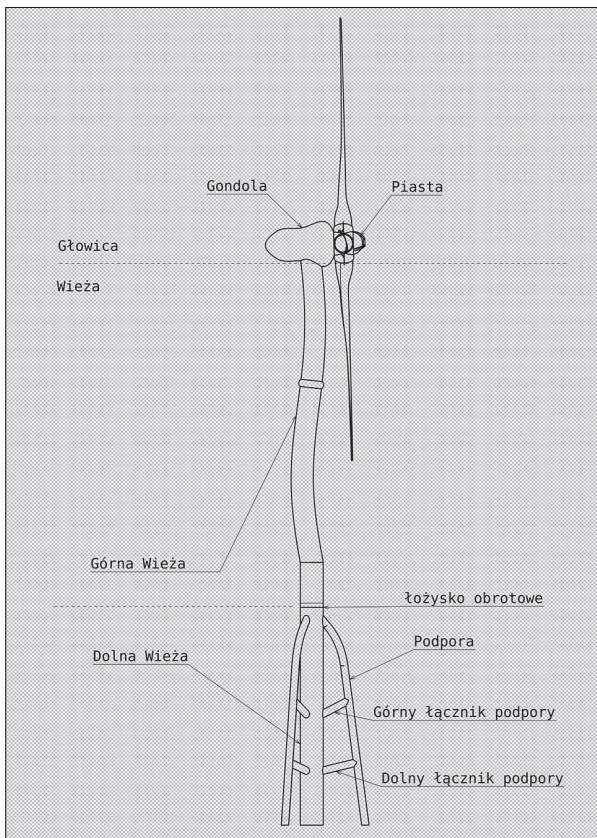
<sup>22</sup> R. G. Stein, *Architecture and Energy*, Anchor Press, Doubleday, Garden City, New York 1977.

<sup>23</sup> A. Gawlikowska, *Architecture...*, op. cit.





8. Architektonicznie Zaprojektowana Turbina Wiatrowa – koncepcja. Źródło: ETH  
 8. Architecturally Designed Wind Turbine – ADWT concept. Source: ETH



9. Architektonicznie Zaprojektowana Turbina Wiatrowa – nomenklatura. Źródło: ETH  
 9. Architecturally Designed Wind Turbine – ADWT nomenclature. Source: ETH

ności lokalnej jest zaadresowana poprzez zaproszenie jej przedstawicieli do wyboru projektu, który według nich najlepiej pasuje do lokalnej tożsamości.<sup>24</sup> Turbiny wiatrowe stanowią symbol społeczności wrażliwej na kwestie ekologiczne<sup>25</sup>, co może być dodatkowo wzmocnione dzięki unikalnemu rozwiązaniu projektowemu, w rezultacie tworząc szczególnie i przyjazny dla mediów przestrzenny symbol tożsamości.

#### **4.4. Poczucie sprawiedliwości i funkcjonalności**

Ze względu na koszty dla społeczności lokalnej, żyjącej w sąsiedztwie farmy wiatrowej, chce ona otrzymać bezpośrednie korzyści z inwestycji.<sup>26</sup> Inwestycja w estetykę turbin wiatrowych to inwestycja w jakość obrazu otaczającego krajobrazu, mogąca częściowo zrekomensować negatywne wpływy turbin wiatrowych.<sup>27</sup> Przedstawiony Architektoniczny Projekt Turbiny Wiatrowej może zostać rozszerzony o nowe funkcje przestrzenne przynoszące zarówno społeczne, jak i gospodarcze korzyści społeczności lokalnej (il. 10, 11).

#### **4.5. Poczucie bezpieczeństwa**

Stumetrowe turbiny wiatrowe z obracającymi się łopatom stanowią bardzo dominujący element w krajobrazie i mogą generować lęk u obserwatorów. Technologia stanowi podstawę obecnej formy turbin wiatrowych, która może być wzmocniona strachem przed technologią.<sup>28</sup> Elegancka Architektonicznie Zaprojektowana Turbina Wiatrowa opiera się na naturze – delikatna, wyprofilowana forma komunikować ma bezpieczeństwo i przypominać formy naturalne takie, jak rośliny i drzewa. Dodatkowe przyczyny powodujące strach związany z wysokością wieży, ruchem łopat i postrzeganą możliwością przewrócenia są łagodzone poprzez poczucie stabilności osiągnięte poprzez dodane elementy podtrzymujące. Dodane podpory minimali-

zują postrzeganą wielkość turbiny wiatrowej przez stopniowy wzrost formy.

### **5. Architektonicznie Zaprojektowana Turbina Wiatrowa – podejście symulacyjne**

Wybrany Architektoniczny Projekt Turbiny Wiatrowej został zweryfikowany pod względem jego integralności strukturalnej, a także jego wpływu na mechaniczną wydajność i oczekiwaną wydajność produkcji energetycznej w porównaniu do konwencjonalnej wieży, zaprojektowanej w oparciu o takie same specyfikacje. Projekt architektoniczny został zastosowany do skali dwumegawatowej turbiny wiatrowej o wysokości piasty 100 m, 90 m średnicy wirnika, średnicy wierzchołka wieży 3,5 m, masy głowicy wieży 114 ton i maksymalnej prędkości obrotowej końcówki łopaty 100 m/s.<sup>29</sup> Zarówno wieża konwencjonalnej, jak i Architektonicznie Zaprojektowanej Turbiny Wiatrowej została zaprojektowana z uwzględnieniem wytycznych i wybranych przypadków obciążenia IEC<sup>30</sup> (tab. 1). Charakterystykę obciążeń wirnika powstających wskutek działania wiatru wyliczono za pomocą metody BEM (Blade Element Method) dla trzech różnych przypadków. Wymagania częstotliwości zostały określone na podstawie wytycznych IEC i optymalizacji wydajności energetycznej.

#### **5.1. Masa Architektonicznie Zaprojektowanej Turbiny Wiatrowej i jej nowe elementy składowe**

Całkowita masa nowego projektu wieży jest o 31,3% większa niż w przypadku konstrukcji konwencjonalnej (231,5 ton w porównaniu do 176,4 ton). Do montażu masa jest rozłożona na 14 odcinków składowych nowego projektu (w tym liczone są elementy dużych podpór podzielonych na mniejsze odcinki), w porównaniu do 3 elementów składowych dla wież konwencjonalnych. Powoduje to dłuższy czas i złożoność procesu projektowania,

<sup>24</sup> Y. Maruyama, *Social acceptance of Wind Energy Projects: State-of-the-Art in Japan*, University of Tokyo, Japan 2010.

<sup>25</sup> A. Koskinen, O. Laitinen, *Social acceptance of Wind Energy Projects: State-of-the-Art in Finland*, Wpd Finland oy, motiva, Finland 2010.

<sup>26</sup> P. Schweizer-Ries, J. Zoellner, O. von Guericke, *Activation and Involvement – how to increase the acceptance of RES through participation: Project description*, Germany 2010.

<sup>27</sup> S. Horbaty, S. Huber, G. Ellis, *Large-scale wind deployment, social acceptance*, WIREs Energy Environ, 1: 194–205 doi: 10.1002/wene.9, 2012.

<sup>28</sup> A. C. Goodyear, *From Technophilia to Technophobia: The Impact of the Vietnam*, Leonardo, vol. 41(2), 2008, s. 169–173.

<sup>29</sup> W. Tong, *Wind power generation and wind turbine design*, WIT Press, Southampton 2010.

<sup>30</sup> IEC, *Guidelines for Design Load Cases*, IEC 61400-1, x 7.4, Germanischer Lloyd Industrial Services, 2010.





10. Architektoniczny Projekt Turbiny Wiatrowej z dodatkowymi funkcjami przestrzennymi – widok Centrum Nauki o energii odnawialnej i platformy widokowej. Projekt: arch. A. Gawlikowska, 2013; wizualizacja: Archigma  
 10. The ADWT with added architectural functionalities – view of a renewable energy science centre and the viewing platform. Design: arch. A. Gawlikowska, 2013; visualization: Archigma



11. Architektoniczny Projekt Turbiny Wiatrowej z dodatkowymi funkcjami przestrzennymi – pełny widok Architektonicznie Zaprojektowanej Turbiny Wiatrowej wraz z wieżą o zakrzywionej konstrukcji. Projekt: arch. A. Gawlikowska, 2013; wizualizacja: Archigma  
 11. The ADWT with added architectural functionalities – full ADWT view including the curved tower design. Design: arch. A. Gawlikowska, 2013; visualization: Archigma

produkcji, transportu i montażu. Składniki nowatorskiego projektu obejmują:

- gięte stalowe elementy w górnej części wieży;
- duże obciążenie łożyska obrotowego, spowodowane punktem obrotowym wieży, która obraca się w połowie wysokości, w celu uniknięcia uderzenia śmigła w wystającą część zakrzywionej wieży;
- dwustopniową windę, aby pomieścić łożysko obrotowe w połowie wysokości wieży;
- dodatkowe podpory w dolnej części wieży dla wzmocnienia konstrukcyjnego oraz ze względów estetycznych.

## 5.2. Ograniczenia mechaniczne

Do projektu mechanicznego wieży, ograniczenia wytrzymałości materiałów, stabilności strukturalnej (wyboczenie) przeanalizowano rezonans dla częstotliwości przejścia łopaty wirnika w konkretnych przypadkach obciążenia takich, jak działanie przy parametrach znamionowych, gwałtowne podmuchy wiatru w trakcie pracy przy parametrach dopuszczalnych oraz działanie przy skrajnie silnym wietrze (patrz: tab. 1). Stwierdzono, że przypadek nagłych podmuchów wiatru jest sytuacją najpoważniejszą pod względem naprężeń materiału, w związku z tym zastosowano go przy ocenie ograniczeń mechanicznych i stabilności konstrukcyjnej. Oprócz dynamicznych naprężeń działających na fundament wieży, zmęczenie materiału nie zostało wzięte pod uwagę i musi zostać zbadane.

### 5.2.1. Obliczanie obciążeń

Dla oszacowania obciążeń łopat wirnika, wykorzystano metodę ETH BEM (Blade Element Method).<sup>31</sup> Do obliczeń specyfikacje łopat wirnika dla 5 MW morskiej turbiny NREL WT<sup>32</sup> zostały dostosowane do rozmiarów łopat 2 MW. W wyniku powyższego uzyskano wartości nacisku osiowego i momentu obrotowego działającego na wirnik przy ustawieniu łopat w pozycji roboczej oraz w chorągiewkę. Szacunki obciążeń wiatrem zostały uzyskane za pomocą geometrycznych modeli elementów struktury i odpowiadających współczynników oporu czołowego. Po oszacowaniu naporu na łopaty wirnika przy różnych obciążeniach, najbardziej krytyczne przypadki zostały wybrane do kolejnych szacunków momentu obrotowego działającego na wirnik oraz obciążenia wieży na skutek wiatru. Grawitacyjne obciążenia, w zależności od geometrycznego projektu turbiny zastosowano bezpośrednio w symulacji elementów skończonych. Masy i moment dla głowicy wieży zostały założone w przybliżeniu na podstawie specyfikacji turbiny.

### 5.2.2. Ograniczenia dla wyboczeń

Poprzez analizę przypadków wyboczenia określono minimalny względny współczynnik wyboczeniowy dla konstrukcji. Zastosowano normy IEC 61400-2<sup>33</sup> odnoszące się do uproszczonych konstrukcji wieżowych oraz szczególne normy DIN 18800<sup>34</sup>. Dla celów analizy wyboczenia wieży Architektonicznie Zaprojektowanej Turbiny Wiatrowej

Tabela 1. Zestawienie przypadków obciążeń stosowanych do projektowania Architektonicznie Zaprojektowanej Turbiny Wiatrowej

	Prędkość wiatru (m/s)	Kąt obrotu nasady łopaty (°)	Kąt odchylenia wirnika (°)	Częstotliwość zdarzenia
Obciążenie nominalne	2.5-25	zmienna	0°	–
Gwałtowne podmuchy wiatru	26.4	0°	0-60°	1 rok
Skrajnie silny wiatr	70	81.5° (pozycja w chorągiewkę)	0-15°	50 lat

<sup>31</sup> S. Barber, N. Chokani, R. S. Abhari, *Effect of Wake Flow Nonuniformity on Wind Turbine Performance and Aerodynamics*, „Journal of Turbomachinery”, Vol. 135, No. 1, 011012, 2013.

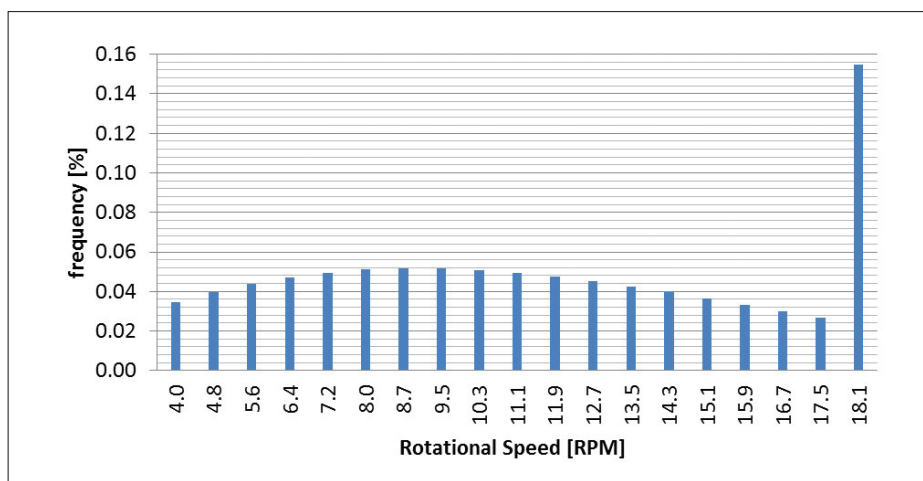
<sup>32</sup> G. Jonkman, S. Musial, W. Scott, J. Butterfield, *Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development*, Technical report, National Renewable Energy Laboratory

(NREL), Golden, CO., 17 Wind Energy; Design; Manufacturers; Specifications; Turbines; Wind Turbines; Wind Power, 2009.

<sup>33</sup> IEC, op. cit.

<sup>34</sup> Germanischer Lloyd Industrial Services gmbH, *Guideline for the certification of wind turbines*, Technical report, Rules and Guidelines Industrial Services, 2010.





12. Prawdopodobny rozkład częstotliwości przejścia łopatek dla Architektonicznie Zaprojektowanej Turbiny Wiatrowej.  
Źródło: ETH

12. Probable blade passing frequency distribution of the ADWT. Source: ETH

wej, ostateczne obciążenia projektowe zostały odtworzone przy zastosowaniu analizy wybożenia elementów końcowych, ze współczynnikiem bezpieczeństwa równym dwa.

### 5.3. Ograniczenia częstotliwości

Wymiary wieży Architektonicznie Zaprojektowanej Turbiny Wiatrowej zostały dobrane tak, aby uniknąć jej naturalnego rezonansu częstotliwościowego, powstającego podczas przejścia łopatek wirnika oraz częstotliwości związanej z ruchem obrotowym. Rozważono ewentualne przypadki, w kilku klasach sztywności. Ponieważ częstotliwość przejścia łopatek zależy od prędkości wiatru wykazano, że turbina wytworzyłaby około 50% uzysku energii przy znamionowej prędkości obrotowej (il. 12), która w związku z tym stanowi najważniejszą częstotliwość dla konstrukcji wieży.

Przyjęte warunki brzegowe dla częstotliwości Architektonicznie Zaprojektowanej Turbiny Wiatrowej unikając częstotliwości przejścia łopatek (0,91 Hz) i częstotliwości prędkości obrotowej (0,30 Hz = 18,1 RPM) pozostawiły następujące możliwości:

1. Sztywna Wieża (częstotliwość > 0,91 Hz)  
Korzyści: turbina może zawsze działać w optymalnym stosunku prędkości końcówki łopaty.  
Wady: nieekonomiczne rozwiązanie ze względu na konieczność zastosowania wielu dodatkowych materiałów.
2. Miękka Wieża (częstotliwość < 0,91 Hz oraz ≠ 0,30 Hz)  
Korzyści: początkowa niska częstotliwość wieży (0,31 Hz) sprawia, że to opcja opłacalna.

Wady: konieczność zastosowania regulatora w celu uniknięcia prędkości obrotowych powodujących rezonans, co zmniejsza efektywność konwersji energii.

Należy zauważyć, że współczynnik bezpieczeństwa został przyjęty przy akceptacji częstotliwości drgań wieży poza zakresami  $\pm 10\%$ , zarówno częstotliwości mijania łopaty i częstotliwości obrotowej.

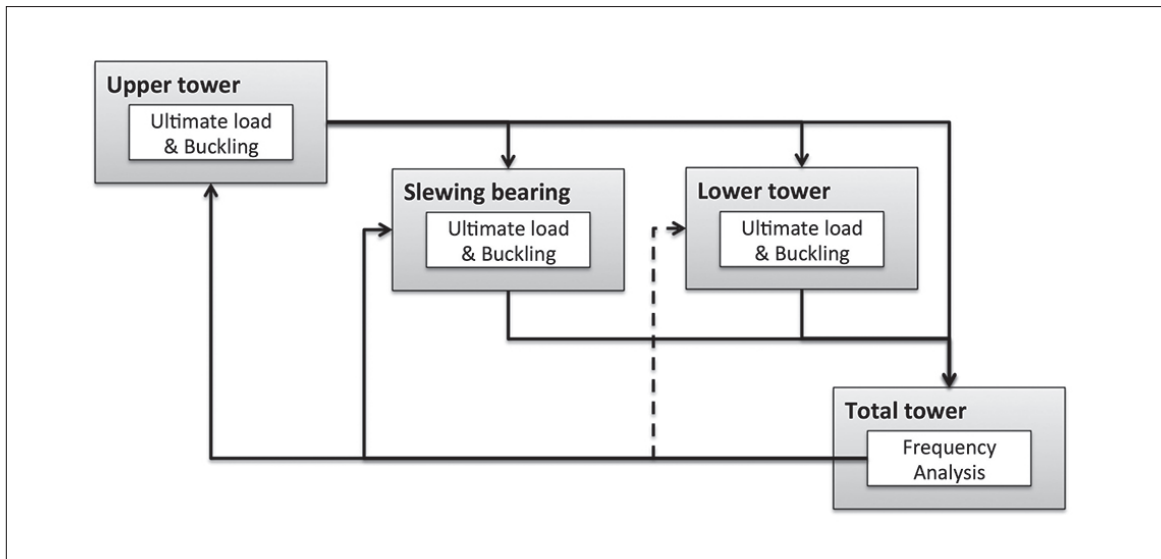
Ze względu na to, że wieża Architektonicznie Zaprojektowanej Turbiny Wiatrowej została zwymiarowana dla obciążeń oraz aby zmienić częstotliwości drgań – poprzez zwiększenie grubości lub średnicy wieży, zamiast usuwania materiału – została wybrana jako metoda dostrajania częstotliwości.

### 5.4. Metodologia i procedura modelowania

Analiza przy użyciu końcowego modelu elementów spawanych części wieży, składających się z elementów powierzchniowych, została wykonana przy użyciu oprogramowania CATIA. Podczas tego procesu symulacji konstrukcyjnych, początkowy projekt został zmieniony na bardziej stabilną strukturę.

### 5.5. Założenia przyjęte na potrzeby modelu elementów skończonych

Modelowane sztywne połączenia spawalnictwa nie uwzględniają systemu ryglującego, który będzie używany w rzeczywistości. Przez to połączenia są modelowane jako bardziej elastyczne, niż są w rzeczywistości, utrzymując konserwatywność modelu. Kolejnym potencjalnym źródłem nadmier-



13. Schemat procedury projektowania wieży: projekt rozpoczyna się od górnej części wieży, a następnie kontynuuje w kierunku dołu wieży, dostarczając informacji na temat częstotliwości wieży, dzięki czemu możliwa jest ponowna ocena komponentów.

Źródło: ETH

13. Schematic tower design procedure: design initiated with the upper tower, continued towards the tower, providing the information on tower frequency, allowing component re-evaluation. Source: ETH

nych ograniczeń jest połączenie z fundamentem, które w symulacji przedstawiono jako całkowicie sztywne, podczas gdy w rzeczywistości byłoby ono do pewnego stopnia elastyczne. Łożysko obrotowe jest uważane za część elastyczną.

## 5.6. Procedura projektowania

Procedura projektowania (il. 13) zawiera projekt dla obciążeń wynikających z ograniczeń materialnej plastyczności i wybożenia i jest wykonywana w następującej kolejności:

- górna wieża;
- łożysko obrotowe (komponent strukturalny mechanizmu odchylania kierunkowego);
- dolna wieża;
- analiza częstotliwości i dostosowanie wieży;
- szacunki dynamicznych naprężeń w fundamentach wieży.

### 5.6.1. Główne zagadnienia dotyczące projektowania

Ważnym czynnikiem dla Architektonicznie Zaprojektowanej Turbiny Wiatrowej jest to, że dodana złożoność i połączenia między formami generują lokalną koncentrację naprężeń. Jest to szczególnie ważne na połączeniach pomiędzy podporami i wieżą oraz w górnym obszarze podpór, jak i górnych łączników między podporami i wieżą. Aby rozwiązać

ten problem, złącza między podporami a wieżą poniżej głównego połączenia podpór i wieży zostały podniesione bliżej głównego połączenia.

### 5.6.2. Projektowanie w celu ograniczenia częstotliwości

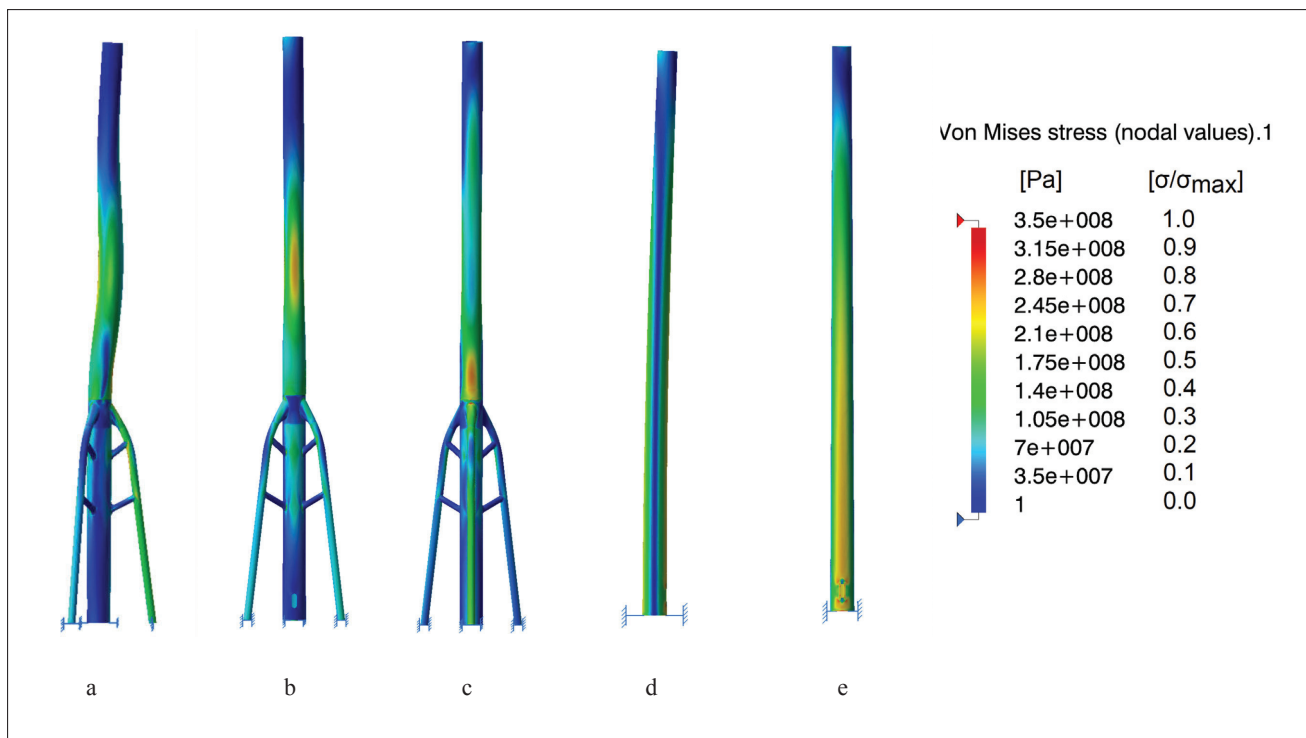
Po doborze poszczególnych składników przeprowadzono analizę częstotliwości dla całej struktury. Początkowe wyniki (il. 13) wykazały, że nowa częstotliwość rezonansowa konstrukcji (0,312 Hz) mieści się w zakresie częstotliwości obrotowej (0,27–0,33 Hz). Strojenie wieży przeprowadzono poprzez zwiększenie sztywności górnej części wieży, przez dostosowanie grubości ścianki. Stwierdzono, że pierwsza częstotliwość drgań może być zwiększona do 0,334 Hz, poprzez zmianę grubości ścianki górnej wieży do 22 mm dla niższej części wieży długości 10 m, a następnie wprowadzenie liniowej redukcji grubości ścianki do 10 mm na szczycie wieży.

## 6. Wydajność strukturalna: wyniki symulacji

### 6.1. Wybożenie

Porównanie wybożenia dla konwencjonalnych turbin wiatrowych i Architektonicznie Zaprojektowanych Turbin Wiatrowych pokazuje korzyści





14. Wzrost dystrybucji koncentracji naprężeń w przypadku obu projektów turbin wiatrowych; porównanie końcowych wartości naprężeń ekwiwalentnych von Misesa – Architektonicznie Zaprojektowana Turbina Wiatrowa: a) z boku; b) z przodu; c) z tyłu; konwencjonalna turbina wiatrowa: d) z boku; e) z przodu. Źródło: ETH

14. Improvement of stress concentration distribution in the ADWT as compared to the conventional WT; ultimate von Mises equivalent stress – ADWT: a) side; b) front; c) back; conventional WT design: d) side; e) front. Source: ETH

płynące z rozwiązania architektonicznego, które poprawia efekty osiągalne w obszarze wybożenia – z minimalnego współczynnika 3,0 dla konwencjonalnej konstrukcji możliwy jest wzrost do 4,5 dla nowego projektu. Zaletą tej konstrukcji jest również brak potrzeby wprowadzania elementu wzmacniającego w progu drzwi wejściowych, co w przypadku tradycyjnej turbiny wiatrowej wymaga grubości wzmocnienia 60 mm.

## 6.2. Naprężenia wewnętrzne

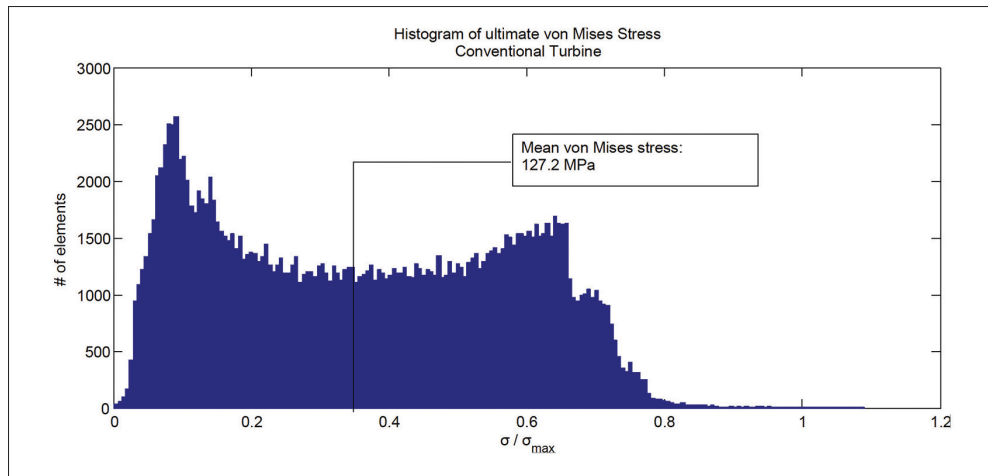
Wyniki analiz konwencjonalnych turbin wiatrowych wskazują na bardziej równomierny rozkład naprężeń strukturalnych, natomiast w strukturze architektonicznej pewne komponenty charakteryzują się koncentracją naprężeń. Pokazano to ilościowo poprzez naprężenia von Misesa (il. 14) i histogramem (il. 15, 16), gdzie pokazany jest rozkład naprężeń von Misesa w każdym punkcie węzłowym zgodnie z wielkością względną. Oprócz tej wady, ogólne naprężenia ekwiwalentne von Misesa nowego projektu są średnio o 40% niższe niż w przypadku konwencjonalnej konstrukcji.

## 6.3. Ugięcie

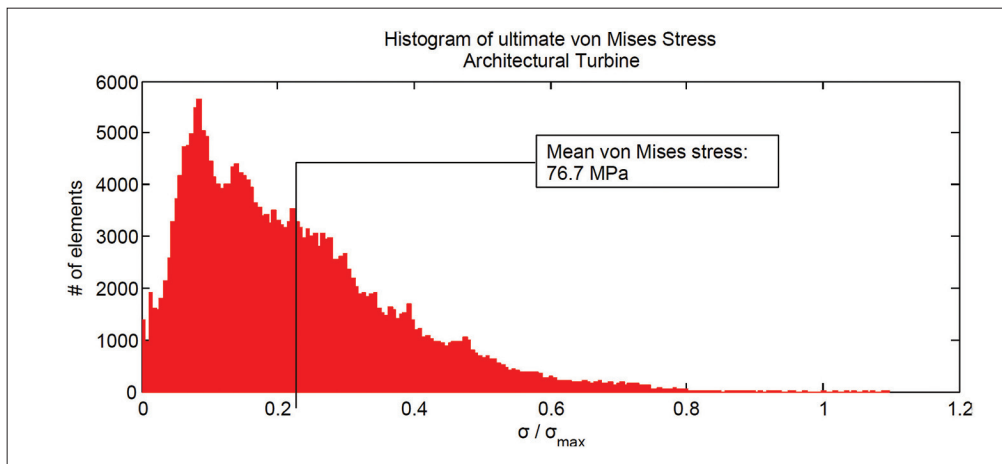
Maksymalne ugięcie konstrukcji Architektonicznie Zaprojektowanej Turbiny Wiatrowej występuje na wysokości głowicy wieży pod granicznym obciążeniem 1.31 m, co stanowi tylko 45% wartości w przypadku konwencjonalnej turbiny wiatrowej (il. 17), głównie ze względu na wysoką sztywność dolnego, wzmocnionego podporami odcinka wieży (il. 18).

## 7. Wnioski

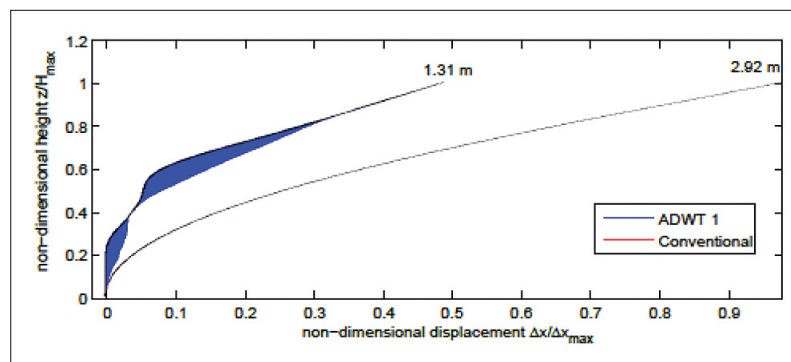
Architektonicznie Zaprojektowane Turbiny Wiatrowe mogą być wykorzystane jako narzędzie do zwiększenia akceptacji społecznej parków wiatrowych. Projektem turbiny wiatrowej uwzględniającym estetykę, psychologię i harmonijną integrację z krajobrazem, można uzyskać lepszą akceptację miejscowej ludności. Pożądane jest również zastosowanie procesu konsultacji i partycypacji społeczności lokalnych. Może to odbyć się poprzez proces projektowania uwzględniający lokalne poczucie tożsamości z wybranym Architektonicznym



15. Histogram końcowych wartości naprężeń ekwiwalentnych von Misesa – konwencjonalna konstrukcja turbiny wiatrowej; o 40 proc. wyższe naprężenia niż w przypadku Architektonicznie Zaprojektowanej Turbiny Wiatrowej. Źródło: ETH  
 15. Histogram of ultimate von Mises equivalent stress; conventional WT design; stress about 40% higher than in the ADWT. Source: ETH

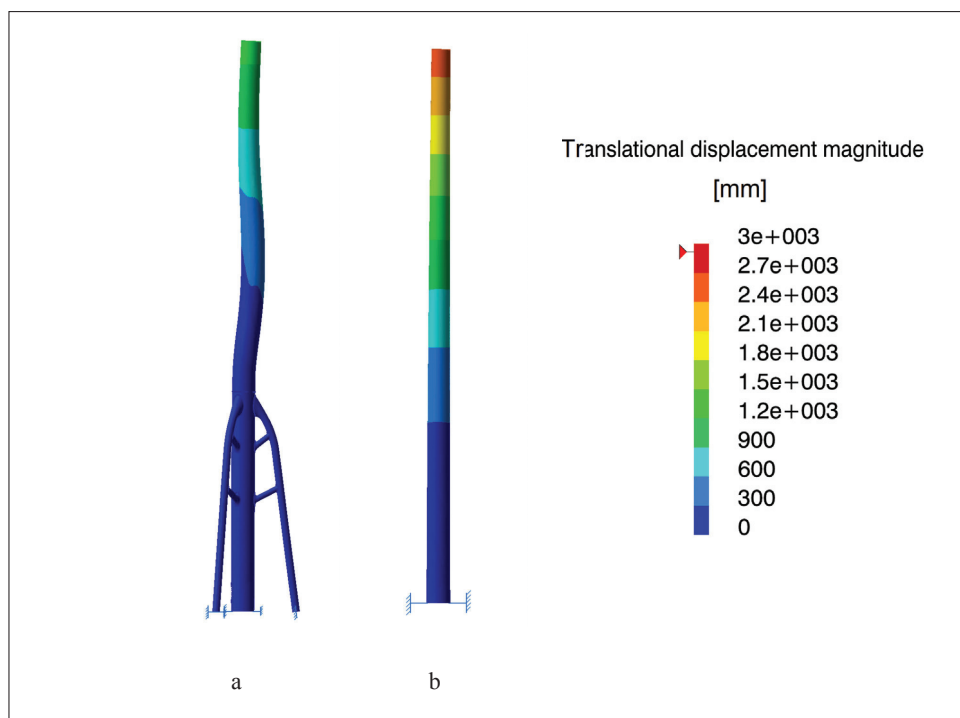


16. Histogram końcowych wartości naprężeń ekwiwalentnych von Misesa – Architektonicznie Zaprojektowana Turbina Wiatrowa; około 40 proc. niższe naprężenia niż w przypadku konwencjonalnej turbiny wiatrowej. Źródło: ETH  
 16. Histogram of ultimate von Mises equivalent stress – ADWT; stress about 40% lower than in the conventional WT. Source: ETH



17. Ugięcie wieży pod granicznym obciążeniem – porównanie Architektonicznie Zaprojektowanej Turbiny Wiatrowej z konwencjonalną konstrukcją turbiny; grubość wykresu dla Architektonicznie Zaprojektowanej Turbiny wiatrowej odpowiada przemieszczeniu elementów na danej wysokości. Źródło: ETH  
 17. Tower deflection under ultimate loading – comparison of the ADWT versus conventional design; ADWT plot thicknesses – elements displacement at a given altitude. Source: ETH





18. Ugięcie wieży przy obciążeniu granicznym; porównanie pokazuje niższe poziomy ugięcia dla nowego projektu:  
 a) Architektonicznie Zaprojektowana Turbina Wiatrowa; b) projekt konwencjonalny. Źródło: ETH  
 18. Tower deflection under ultimate loading; comparison showing the lower deflection levels for the ADWT:  
 a) ADWT; b) conventional design. Source: ETH

Projektem Turbiny Wiatrowej i dodawanie nowych przestrzennych funkcjonalności. Architektonicznie Zaprojektowana Turbina Wiatrowa spełnia również kryteria inżynierskie bycia możliwą do produkcji, przewozu, a także bezpieczną, wpływającą na zmniejszenie hałasu i mechanicznie sprawną, przynoszącą ulepszenia konstrukcyjne w porównaniu z konwencjonalną turbiną wiatrową, pozostając ekonomicznie opłacalną. Nowa konstrukcja jest lepsza od konwencjonalnej konstrukcji pod względem właściwości mechanicznych, osiągając obniżenie wybożenia o 33%, ugięcia przy obciążeniu granicznym – o 45%, a naprężeń ekwiwalentnych von Misesa – o 40%. Nowa konstrukcja ma również zmniejszoną częstotliwość rezonansową, która jest poza zakresem częstotliwości operacyjnych. Korzyści strukturalne osiągnięte są kosztem dodatkowej złożoności i wzrostu o 31% w masie konstrukcji. Architektoniczny Projekt Turbiny Wiatrowej może potencjalnie przynieść poprawę wydajności produkcji energii: nieznacznie zwiększa się wydajność całkowitego rocznego uzysku energii w porównaniu z konwencjonalnym projektem turbiny wiatrowej. Dzieje się to dzięki obniżonemu kątowi nachylenia wirnika i zwiększonej sztywności konstrukcji. Projekt architektoniczny może również po-

prawić żywotność turbiny wiatrowej. Mniejszy kąt nachylenia będzie skutkował zmniejszeniem zmęczenia komponentów w gondoli, natomiast zminimalizowanie efektu przejścia łopat będzie miało pozytywny wpływ na długość eksploatacji oraz na konserwację komponentów mechanizmu, co z kolei oznacza wydłużenie okresu eksploatacji całej konstrukcji.

## Bibliografia

- A. Alessi, *The Dream Factory*, Electa-Alessi, Milan 2000.
- S. Barber, N. Chokani, R. S. Abhari, *Effect of Wake Flow Nonuniformity on Wind Turbine Performance and Aerodynamics*, „Journal of Turbomachinery”, Vol. 135, No. 1, 011012, 2013.
- CA-OWEE, *Offshore Wind Energy: Ready to Power a Sustainable Europe – Final report*, Concerted Action on Offshore Wind Energy in Europe, Delft, The Netherlands 2001, [www.offshorewindenerge.org].
- O. Demirbilek, B. Sener, *Product Design, Semantics and Emotional Response*, „Ergonomics”, vol. 46(13/14), 2001, s. 1346–1360.
- DWIA and Fraunhofer, *Wind Barriers survey*, EWEA, *Administrative and grid access barriers to wind power*, 2010, [http://www.windbarriers.eu/fileadmin/WB\_docs/documents/WindBarriers\_report.pdf].

EC, *Directive 2009/28/EC of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources*, 2009.

Eurostat, *Electricity Statistics*, 2017, [[http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics\\_explained/index.php/Renewable\\_energy\\_statistics](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Renewable_energy_statistics)].

EWEA, *Social Acceptance of Wind Energy and Wind Farms. Wind energy – the facts: A guide to the technology, economics and future of wind power*, European Wind Energy Association, London, UK, Sterling, VA, 2009.

EWEA, *Wind in power, 2016, European statistics*, 2017, [<http://www.ewea.org/statistics/>].

A. Gawlikowska, *Architecture in the center of conflict. Threats for its Identity*, Warsaw University of Technology, 2011.

A. Gawlikowska, *Przestrzeń i Energia. Zarządzanie społeczną akceptacją zmiany*, Wydawnictwo Wydziału Architektury Politechniki Poznańskiej, 2014.

Germanischer Lloyd Industrial Services gmbH, *Guideline for the certification of wind turbines*, Technical report, Rules and Guidelines Industrial Services, 2010.

A. Giddens, *Modernity and Self-Identity. Self and Society in the Late Modern Age*, Polity, Cambridge 1991.

A. C. Goodyear, *From Technophilia to Technophobia: The Impact of the Vietnam*, Leonardo, vol. 41(2), 2008, s. 169–173.

J. B. Graham, J. R. Stephenson, I. J. Smith, *Public perceptions of wind energy developments: Case studies from New Zealand*, Energy Policy, vol. 37(9), 2009, s. 3348.

S. Horbaty, S. Huber, G. Ellis, *Large-scale wind deployment, social acceptance*, WIREs Energy Environ, 1: 194–205 doi: 10.1002/wene.9, 2012.

IEC, *Guidelines for Design Load Cases*, IEC 61400-1, x 7.4, Germanischer Lloyd Industrial Services, 2010.

G. Jonkman, S. Musial, W. Scott, J. Butterfield, *Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development*, Technical report, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO., 17 Wind Energy; Design; Manufacturers; Specifications; Turbines; Wind Turbines; Wind Power, 2009.

A. Koskinen, O. Laitinen, *Social acceptance of Wind Energy Projects: State-of-the-Art in Finland*, Wpd Finland oy, motiva, Finland 2010.

A. Mäkelä, *Emotions, user experience and directions for designing emotional rich products*, Literature review. eDesign, Dec. 1999, [<http://www.hut.fi/~ahmakela/eDesign/literature.html>].

Y. Maruyama, *Social acceptance of Wind Energy Projects: State-of-the-Art in Japan*, University of Tokyo, Japan 2010.

M. Moy de Vitry, *Structural Integrity of Architecturally Designed Wind Turbines*, Internal Report, Laboratory for Energy Conversion, ETHZ, Zurich 2012.

PSEW, Polish Wind Energy Association, private communication, 2013.

P. Ricaeur, *Oneself as Another*, University of Chicago Press, Chicago 1990.

B. H. Schmitt, A. Simms, *Marketing Aesthetics: The Strategic Management of Brands, Identity, and Image*, The Free Press, New York 1997.

J. P. Schoormans, H. S. Robben, *The effect of new package design on product attention, categorization and evaluation*, „Journal of Economic Psychology”, vol. 18, 1997, s. 271–287.

P. Schweizer-Ries, J. Zoellner, O. von Guericke, *Activation and Involvement – how to increase the acceptance of RES through participation: Project description*, Germany 2010.

R. G. Stein, *Architecture and Energy*, Anchor Press, Doubleday, Garden City, New York 1977.

R. Thayer, H. Hansen, *Consumer Attitude and Choice in Local Energy Development*, Department of Environmental Design, University of California – Davis, 1989, s. 17–19.

W. Tong, *Wind power generation and wind turbine design*, WIT Press, Southampton 2010.

R. L. Underwood, N. M. Klein, R. R. Burke, *Packaging communication: Attentional effects of product imagery*, „Journal of Product & Brand Management”, vol. 10(7), 2001, s. 403–422.

*Anna Gawlikowska, dr inż. arch.,  
M. Moy de Vitry, N. Chokani, R. S. Abhari  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Procesowej  
Laboratorium Konwersji Energii, ETH Zurich,  
Szwajcaria*

# ARCHITECTURAL WIND TURBINE DESIGN FOR IMPROVED SOCIAL ACCEPTANCE

A. P. GAWLIKOWSKA, M. MOY DE VITRY, N. CHOKANI, R. S. ABHARI

## 1. Introduction

Striving for energy independence is one of the most important factors driving the transformation of the energy sector. This is a pressing issue for the European Union, which depends on energy imports from non-member countries. RESs provide an answer to the challenge of adding local capacity, addressed by the EU in 2007 in a decision to increase the final consumption of energy derived from RESs to 20% by 2020.<sup>1</sup> In 2010, renewable electricity's share in newly installed capacity within the EU was at 62% and RESs accounted for 8,7% of gross inland energy consumption, representing 44% of Europe's 2020 target.<sup>2</sup> To adhere to this commitment, EU Member States must keep rapidly increasing their share of RESs. Current national RES policies would lead to a RES share of 14,8% by 2020. Meeting the goal will require mitigation of barriers and improvement of RES support mechanisms.<sup>3</sup>

Among RESs, a particularly rapid expansion has been observed in the domain of wind energy, which in 2012 accounted for 105.6 GW. RESs represented 26% of all new EU power capacity installed in 2012<sup>4</sup>, but the rate of development of onshore wind power installations has since slowed down due to difficulties that resulted in about 90% of wind turbine projects being aborted or blocked<sup>5</sup>. Public acceptance issues are among the largest contributors to this situation, causing 30% of these projects to

face temporary delay or permanent blockage.<sup>6</sup> The biggest public concern is the visual impact of new wind turbines.<sup>7</sup> In order to address this challenge, the wind power sector could benefit from the knowledge gathered in the marketing industry, which for decades has used various techniques to shape the attitudes of consumers and voters.

The objective of this paper is to present an engineering evaluation of the Architecturally Designed Wind Turbine (ADWT), which addresses the issue of social acceptance. The paper is structured as follows: firstly, the challenge of social acceptance is discussed, then the considerations related to the ADWT are reviewed. The framework for the engineering analysis is then presented, followed by its results. The main findings and their implications are summarised in the conclusion. This paper combines and applies insights from the fields of architecture, urban planning, marketing and social psychology, while addressing specific issues relevant to wind energy, including the process of wind park acceptance.

## 2. Social Acceptance Challenge in the Wind Energy Sector

Social protests represent a barrier that prevents most European countries from reaching lower emission targets, leading to increased costs, higher risk, and delayed or blocked project development. Opposition is mainly raised by local communities<sup>8</sup>, and

<sup>1</sup> EC – Directive 2009/28/EC of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources, 2009.

<sup>2</sup> Eurostat, *Electricity Statistics*, 2010, [[http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics\\_explained/index.php/Renewable\\_energy\\_statistics](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Renewable_energy_statistics)].

<sup>3</sup> C. Panzer, G. Resch, L. Liebmann, *Renewable energies in Europe – Scenarios on future European policies for RES*, [in:] M. Ragwitz, et al., *RE-Shaping: Shaping an effective and efficient European renewable energy market*, Report within the European research project “RE-Shaping”, Intelligent Energy for Europe – Programme, Karlsruhe 2012, [[http://www.green-x.at/RS-SV/scenarios-o\\_2-1\\_2020\\_RES\\_target.php](http://www.green-x.at/RS-SV/scenarios-o_2-1_2020_RES_target.php)].

<sup>4</sup> EWEA, *Wind in power, 2012, European statistics*, 2017, [<http://www.ewea.org/statistics/>].

<sup>5</sup> PSEW, 2013, Polish Wind Energy Association, private communication 2012.

<sup>6</sup> DWIA and Fraunhofer, *Wind Barriers survey*, EWEA, *Administrative and grid access barriers to wind power*, 2010, [[http://www.windbarriers.eu/fileadmin/WB\\_docs/documents/WindBarriers\\_report.pdf](http://www.windbarriers.eu/fileadmin/WB_docs/documents/WindBarriers_report.pdf)].

<sup>7</sup> R. Thayer, H. Hansen, *Consumer Attitude and Choice in Local Energy Development*, Department of Environmental Design, University of California – Davis, 1989, pp. 17–19.

<sup>8</sup> EWEA, *Social Acceptance of Wind Energy and Wind Farms, Wind energy – the facts: A guide to the technology, economics and future of wind power*, European Wind Energy Association, London, UK, Sterling, VA, 2009.



its primary motivation is visual impact on the landscape<sup>9</sup>. Visual impact as a subject in architecture, urban planning and marketing has been studied for its effect on emotions, behaviours and acceptance.<sup>10</sup> The acceptance issue can be tackled by re-framing WT's as unique structures that follow aesthetic guidelines, are sensitive to psychological associations, are harmoniously integrated into the landscape and add marketing value to the region.

Even though wind is the most socially accepted form of electrical power generation (Fig. 1), it falls short in terms of visual quality.<sup>11</sup>

### 3. Shaping Social Acceptance – Lessons from Architecture

Architecture plays an important role in shaping the thoughts, feelings and emotions of users and observers. Symbolic architecture can embody the concept of power and produce vivid and sublime forms of anxieties as well as ideals. City plans, as well as architectural objects and their relationships, influence the behaviours and paths of their users. Architecture can become a tool to generate social emotions such as fear, elation, praise and aggression, as well as to influence the formation of social bonds.<sup>12</sup>

The potential of architecture as an element of state policy was already known in the early stages of the formation of nation states, which can be inferred from representative architectural works. Through symbolic and spatial codes, space can have an impact on the perception of national strength, power and ideology. Examples of symbolic objects associated with autotelic values are the European Solidarity Centre in Gdansk (2004–2008) and the Statue of Liberty in New York (1884–1886), which symbolize solidarity and liberty, respectively.<sup>13</sup> Both these words and their spatial symbols are used as tools of power legitimization and are therefore political instruments.<sup>14</sup>

The lack of community acceptance for new developments has previously been observed in urban environments – NIMBY (“Not In My Backyard”), where negative visual impact has been transformed into positive visual impact through aesthetically sensitive design, changing negative community emotions and responses into positive ones. The view of tall buildings can both raise and diminish property values and change the atmosphere. The examples of city skylines shown in illustrations (Figs. 2, 3) have been selected due to their comparable scale and contrast in aesthetic design. The communist apartment block model rejected the concept of aesthetics, whereas New York’s architecture expresses the liberal market paradigm, where architecture is an important component of a company’s image. The former has a negative subjective visual impact, while the latter can be expected to be a desirable view for a large percentage of the population, raising property values and becoming an example of the YIMBY approach (“Yes In My Back Yard”).

Other industries have considered the visual aspect of their products as an important selling and differentiation factor<sup>15</sup>, which can evoke an emotional response<sup>16</sup> and influence decision-making and motivation<sup>17</sup>. Lessons from other industries, where products are smaller in scale, and therefore easier to redesign and manufacture, should be adapted to the wind energy industry. For example, the traditional black headphone cable design was challenged in 2001 by Apple, which introduced white headphones with a white cable attached, breaking through the status quo, and opening an innovative market of multiple colours, currently available in the industry. At present, both the colour and form of products symbolize the lifestyle of their owners, much like city architecture symbolizes the character of its citizens.

<sup>9</sup> J. B. Graham, J. R. Stephenson, I. J. Smith, *Public perceptions of wind energy developments: Case studies from New Zealand*, Energy Policy, vol. 37(9), 2009, pp. 33–48.

<sup>10</sup> R. L. Underwood, N. M. Klein, R. R. Burke, *Packaging communication: Attentional effects of product imagery*, “Journal of Product & Brand Management”, vol. 10(7), 2001, pp. 403–422; A. Gawlikowska, *Architecture in the center of conflict. Threats for its Identity*, Warsaw University of Technology, 2011.

<sup>11</sup> R. Thayer, H. Hansen, op. cit.

<sup>12</sup> A. Giddens, *Modernity and Self-Identity. Self and Society in the Late Modern Age*, Polity, Cambridge 1991.

<sup>13</sup> A. Gawlikowska, *Architecture...*, op. cit.

<sup>14</sup> P. Ricœur, *Oneself as Another*, University of Chicago Press, Chicago 1990.

<sup>15</sup> A. Alessi, *The Dream Factory*, Electa-Alessi, Milan 2000.

<sup>16</sup> R. L. Underwood, op. cit.

<sup>17</sup> A. Mäkelä, *Emotions, user experience and directions for designing emotional rich products*, Literature review. eDesign, 3.12.1999, [<http://www.hut.fi/~ahmakela/eDesign/literature.html>].

## 4. Architecturally Designed Wind Turbines (ADWTs) – Conceptual Approach

In this paper, novel guidelines have been applied to the multi-megawatt horizontal axis wind turbine. The solution has been derived from architectural and urban theories and social communication methods, including aspects of mimicking, spatial and social identity, open process and sense of justice, sense of security, and psychology of shape.

The design criteria which were taken into consideration can be divided into two categories: (I) engineering, (II) design & social. The former comprises the following issues:

- Transportation & assembly – the design had to be transportable and keep to the logistics limits in terms of sizes and weights;
- Manufacturability – production issues had to be considered and discussed with the producers;
- Safety & noise issues – had an impact on the final design choice;
- Bending moment & stress reduction – impacted the structural design;
- Economics – used as an underlying metric, and considered at all stages of the design.

Within the aesthetic and social criterion the following issues were taken into consideration:

- Psychology of shape;
- Mimicking into landscape;
- Symbolic connotation & local identity validation;
- Sense of justice & functionality;
- Sense of security.

A variety of wind turbine tower shapes were studied, for example the “Tree design” (Fig. 4) or the “Spiral design” (Fig. 5), but they were rejected due to high cost and complexity, as well as the negative impact on power output and noise emission.

The proposed ADWT most successfully fulfilled the design guidelines, maintaining a high level of acceptance, which was tested in a survey.<sup>18</sup> During the survey, 64 respondents were inquired on how the wind turbine design influenced their acceptance of a wind park. Within this test group the traditional

wind turbine design received a mean vote of 5.62 in the decimal scale, whereas the ADWT received a mean vote of 6.59 (Figs. 6, 7).

The ADWT solution (Figs. 8, 9) has been engineered to be manufacturable, transportable and possible to assemble in an economically viable manner, at the same time reducing noise, stresses and bending moments of the structure. It has also been designed with account taken of the aesthetic guidelines.

### 4.1. Psychology of shape

Form has a major impact on individual and social psychologies, including emotions, behaviour and sense of security.<sup>19</sup> Straight shapes convey strength, masculinity, aggression, dominance, whereas curvature and roundness evoke harmony, softness, femininity, happiness, compassion, community, safety and perfection.<sup>20</sup> Straight lines characterize traditionally designed WTs, whereas soft, curvy lines and rounded architecture at the tower base characterize the ADWT. It is inspired by the morphology of plants, and creates an organic impression through the application of curvature. The curved upper tower and the branching lower tower are distinctive features of the design. The curvature made it necessary to redesign the yaw system, which rotates the whole upper section of the tower. Additionally, golden proportions, believed to be the most attractive for the human eye, are used throughout the new design.

### 4.2. Mimicking the landscape

Mimicking the landscape by introducing curved lines, which are less dominant and resemble the natural shapes of nature.<sup>21</sup> The gradual growth from the landscape additionally minimizes the sharpness of form.<sup>22</sup>

### 4.3. Symbolic connotation & local identity validation

Social identity and spatial identity are interrelated<sup>23</sup>, and therefore community identity percep-

<sup>18</sup> The survey was conducted on the Central Train Station in Zurich, Switzerland in September 2013 by Phd A. P. Gawlikowska and student M. Marini.

<sup>19</sup> A. Gawlikowska, *Architecture...*, op. cit.

<sup>20</sup> B. H. Schmitt, A. Simms, *Marketing Aesthetics: The Strategic Management of Brands, Identity, and Image*, The Free Press, New York 1997.

<sup>21</sup> CA-OWEE, *Offshore Wind Energy: Ready to Power a Sustainable Europe – Final report*, Concerted Action on Offshore Wind Energy in Europe, Delft, The Netherlands 2001, [www.offshorewindenerge.org].

<sup>22</sup> R. G. Stein, *Architecture and Energy*, Anchor Press, Doubleday, Garden City, New York 1977.

<sup>23</sup> A. Gawlikowska, *Architecture...*, op. cit.

tion is addressed through an invitation to choose the design that best fits the local identity<sup>24</sup>. WTs create a green image of the community<sup>25</sup>, which can be additionally strengthened by a unique design solution, creating a specific and media-friendly spatial identity symbol.

#### 4.4. Sense of justice & functionality

Due to the cost a community needs to incur when living next to a wind farm, it wants to see a direct benefit from the investment.<sup>26</sup> Investment in WT aesthetics is an investment in the visual quality of the surrounding landscape and can partially compensate for the externalities.<sup>27</sup> The ADWT presented can be enlarged to serve new architectural functions, bringing social and economic benefits to the community (Figs. 10, 11).

#### 4.5. Sense of security

100 m WTs with moving blades are very dominant and can generate fear in observers. Technology is the core of the current WT image, which may translate into fear of technology.<sup>28</sup> The sleek ADWT is based on nature – a smooth, curvaceous, feminine form is designed to communicate security and resemble natural forms, like plants and trees. Additional causes of fear, related to the height of the structure, its movement and the danger of falling – are mitigated through the sense of stability that the supportive legs add. The legs also minimise the perceived size of the WT through the gradual growth of the form.

### 5. Architecturally Designed Wind Turbine (ADWT) Simulation Approach

The selected ADWT was further validated for its structural integrity, as well as its impact on WT mechanical performance and the expected energy

yield in comparison to a conventional tower, designed to the same specifications. Architectural design was applied to utility scale 2 MW WT of hub height of 100 m, 90 m rotor diameter, top tower diameter of 3.5 m, tower head mass of 114 tons and a maximum tip speed of 100 m/s.<sup>29</sup> The towers of both the conventional WT and ADWT were designed with consideration taken of development guidelines and selected load cases from the IEC<sup>30</sup> (Table 1). A blade element method (BEM) code was used to predict wind loads on the rotor for 3 different cases. Frequency requirements were defined based on IEC guidelines and the optimization of the energy yield.

#### 5.1. ADWT turbine mass and novel subcomponents

The total weight of the ADWT tower is 31.3% higher than the conventional design (231.5 tons compared to 176.4 tons). For assembly, the weight is spread over 14 sections for the new design (including subdivision of large tower components), compared to three for the conventional one, adding time and complexity to the design, production, transportation and assembly processes. The novel design components include:

1. Curved steel components in the upper tower and legs for aesthetic reasons.
2. High-load slewing bearing to allow the turbine to rotate at mid-height without causing the blades to intersect the curved tower.
3. Two-stage elevator to accommodate the mid-height bearing.
4. Additional supportive legs in the lower section of the tower for structural reinforcement.

#### 5.2. Mechanical constraints

For the mechanical design of the tower, constraints of material strength, structural stability

<sup>24</sup> Y. Maruyama, *Social acceptance of Wind Energy Projects: State-of-the-Art in Japan*, University of Tokyo, Japan 2010.

<sup>25</sup> A. Koskinen, O. Laitinen, *Social acceptance of Wind Energy Projects: State-of-the-Art in Finland*, Wpd Finland oy, motiva, Finland 2010.

<sup>26</sup> P. Schweizer-Ries, et al., *Activation and Involvement – how to increase the acceptance of RES through participation: Project description*, Germany 2010.

<sup>27</sup> S. Horbaty, S. Huber, G. Ellis, *Large-scale wind deployment, social acceptance*, WIREs Energy Environ, 1: 194–205 doi: 10.1002/wene.9, 2012.

<sup>28</sup> A. C. Goodyear, *From Technophilia to Technophobia: The Impact of the Vietnam*, Leonardo, vol. 41(2), 2008, pp. 169–173.

<sup>29</sup> W. Tong, *Wind power generation and wind turbine design*, WIT Press, Southampton 2010.

<sup>30</sup> IEC, *Guidelines for Design Load Cases*, IEC 61400-1, x 7.4, Germanischer Lloyd Industrial Services, 2010.



(buckling), and resonance with blade passing frequencies have been considered for specific load cases including nominal operation, gusts during rated operation, and extreme wind speeds (see: Table 1). The gust load case was found to be the most severe situation in terms of material stress and was therefore used when evaluating the mechanical limits and instability of the structure. Apart from the dynamic stresses on the tower foundation, fatigue was not taken into account and has to be further investigated.

Table 1. Summary of load cases used for the design of the ADWT

	Wind speed (m/s)	Blade root pitch (°)	Yaw angle (°)	Return period
Nominal loading	2.5-25	variable	0°	–
Gusts	26.4	0°	0-60°	1 year
Extreme wind	70	81.5° (feathered)	0-15°	50 years

### 5.2.1. Calculation of loads

For the blade loading estimation, the ETH unsteady BEM code<sup>31</sup> been utilised. For the calculations, blade specifications for NREL's 5MW offshore WT<sup>32</sup> were scaled down to the 2MW blade dimensions. As a result, axial thrust and torque on the rotor were obtained for the operating and feathered blade positions. Wind loading was approximated, using geometrical models of the components and corresponding drag coefficients. After estimating the thrust on the blades in various load cases, the most critical cases were chosen for the subsequent estimates of the torque on the rotor and wind loading on the tower. Gravitational loads, depending on the geometric turbine design, were applied directly in the FEA simulation. The weight and moment resulting from the tower head were approximated from the turbine specifications.

### 5.2.2. Buckling constraints

Buckling case analysis determined the minimum relative buckling factor of the structure. The IEC 61400-2<sup>33</sup> standards referring to simplified tower structures use DIN 18800 details<sup>34</sup>. For the purpose of the ADWT tower buckling analysis, the ultimate design loads were reproduced in FE buckling analysis, with a safety factor of two.

### 5.3. Frequency constraints

The ADWT tower has been dimensioned to avoid its natural frequency resonance with the blade passing and rotational frequencies. Possible cases, including several rigidity classes, have been considered. Since the blade passing frequency depends on the wind speed, it was demonstrated that the turbine would produce around 50% of its energy yield at rated rotation speed (Fig. 12), which therefore constitutes the most important frequency for tower design.

The recognised boundary conditions for the ADWT frequencies avoiding the blade passing (0.91 Hz) and rated rotation speed (0.30 Hz = 18.1 RPM) left the following possibilities:

1. *Stiff tower* (frequency > 0.91 Hz)  
Benefits: The turbine would always function at the optimal tip speed ratio.  
Drawbacks: Non-economical because much additional material is needed.
2. *Soft tower* (frequency < 0.91 Hz and ≠ 0.30 Hz)  
Benefits: Low initial tower frequency (0.31 Hz) makes this option cost-effective.  
Drawbacks: Need for a regulator to avoid the resonant rotational speeds, reducing the power conversion efficiency.

It has to be noted that a safety factor has been adopted, accepting the natural tower frequencies outside the ranges of ±10% of both the blade passing frequency and rotational frequency.

Because the ADWT tower has been dimensioned for loads, in order to change the natural frequency

<sup>31</sup> S. Barber, N. Chokani, R. S. Abhari, *Effect of Wake Flow Non-uniformity on Wind Turbine Performance and Aerodynamics*, "Journal of Turbomachinery", Vol. 135, No. 1, 011012, 2013.

<sup>32</sup> G. Jonkman, S. Musial, W. Scott, J. Butterfield, *Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development*, Technical report, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO., 17 Wind Energy; Design; Manufacturers; Specifications; Turbines; Wind Turbines; Wind Power, 2009.

<sup>33</sup> IEC, op. cit.

<sup>34</sup> Germanischer Lloyd Industrial Services gmbH, *Guideline for the certification of wind turbines*, Technical report, Rules and Guidelines Industrial Services, 2010.

– increasing thickness or diameter, rather than removal of material – has been chosen as a frequency tuning method.

#### **5.4. Modelling methodology and procedure**

FEM analysis of the welded parts of the tower, composed of surface elements, was done using *CATIA*. During this structural design simulation process, the initial design was changed to be more structurally stable.

#### **5.5. Finite element model assumptions**

The modelled rigid welding connections do not take into account the bolting system that will be used in reality. Thus, the connections are modelled as more flexible than they really are, keeping the model conservative. Another potential source of over-constraints is the connection to the foundation, which is simulated as completely rigid, whereas in practice it will have a degree of flexibility. The slewing bearing has been considered as a flexible component.

#### **5.6. Design Procedure**

The design procedure (Fig. 13) includes design for ultimate loads under the constraints of material yield strength and buckling:

- (a) Upper tower;
- (b) Slewing bearing (yaw system structural component);
- (c) Lower tower;
- (d) Frequency analysis and tuning of the tower;
- (e) Estimates of dynamic stresses in the tower foundation.

##### **5.6.1. Main design considerations**

An important consideration for the ADWT is that the added complexity and interfaces generate intense local stress concentrations. This is particularly notable at the welding interfaces between the legs and the upper tower and in the top area of the legs, as well as the upper connectors between the legs and the tower. To address this issue, the connectors below the main connection were raised closer to the main connection.

##### **5.6.2. Design for frequency constraints**

After dimensioning the individual components, a frequency analysis of the whole structure was performed. The initial result (Fig. 13) showed that the new resonant frequency of the structure (0.312 Hz) was in the range of the rotational frequency (0.27-0.33 Hz). Tuning of the tower was conducted by increasing the rigidity of the upper tower, through the adjustment of wall thickness. It was found that the first natural frequencies could be increased to 0.334 Hz by changing the upper tower thickness to 22 mm for the lower 10 m, then linearly reducing thickness to 10 mm at the top.

### **6. Structural Performance: Simulation Results**

#### **6.1. Buckling**

The comparison of the buckling for the conventional WT and the ADWT show the benefit of architectural design that improves the buckling factors – from the minimum factor of 3,0 for conventional design to 4,5 for architectural design. A benefit of the ADWT design is that no reinforcement is needed around the doorway, which requires a 60-mm thick reinforcement in case of the conventional design.

#### **6.2. Internal stress**

The conventional turbine design results in a more uniform structural stress distribution whereas in the architectural structure certain components have stress concentrations. This is shown quantitatively in the von Mises stress pattern (Fig. 14) and in the corresponding histogram (Figs. 15, 16), where the von Mises stress in each mesh node is distributed according to relative magnitude. Apart from this drawback, the overall von Mises stress of the new design is on average about 40% lower than for the conventional design.

#### **6.3. Deflection**

The maximum deflection of the ADWT structure at the tower head under ultimate loading is 1.31 meters, which is only 45% of the conventional WT (Fig. 17), mainly due to the high rigidity of the lower multi-legged tower (Fig. 18).

## 6.4. Blade passing distance

The novel form of the WT tower has an advantage of increased efficiency through its decreased rotor tilt and cone angle of approximately 4°, while keeping an appropriate clearance distance between the blades and the tower. This will result in an annual energy yield increase of 0.21% compared to conventional turbines (from 2.792 to 2.798 MW).

## 7. Conclusions

The architectural WT design can be used to increase social acceptance of wind parks. WT designs that address aesthetics, psychology and harmonious landscape integration, can meet with improved acceptance of the local population. Appropriate, inclusive consultations – a design process bridging the local sense of identity with the chosen ADWT and adding new functionalities – can reinforce these benefits. The ADWT also fulfils the engineering criteria of manufacturability, transportability, safety, as well as noise reduction and mechanical soundness, bringing structural improvements to the WT design, and remaining economically viable. The new design outperforms the conventional design in terms of mechanical performance, with reductions of: 33% in buckling, 45% in deflection under ultimate loading and 40% in mean von Mises equivalent stress. The new design also has a reduced resonance frequency that is outside the range of operational frequencies. The structural benefits come at the cost of added complexity and a 31% increase in weight. The ADWT can potentially bring about an improvement in energy output: its overall AEY output increases slightly in comparison with the conventional WT thanks to a reduced rotor tilt and increased rigidity. Architectural design can improve the WT's lifetime. The smaller tilt angle will lead to reduced fatigue of components in the nacelle, while the minimised effect of blade passing will have a positive impact on the lifetime and maintenance of components in the hub mechanism, and ultimately increase the lifetime of the entire structure.

### Nomenclature

ADWT – architecturally designed wind turbine  
AEY – annual energy yield  
FEA – finite elements analysis  
RES – renewable energy sources  
WT – wind turbine

Translated by the Author  
and Z. Owczarek

## Bibliography

- A. Alessi, *The Dream Factory*, Electa-Alessi, Milan 2000.
- S. Barber, N. Chokani, R. S. Abhari, *Effect of Wake Flow Nonuniformity on Wind Turbine Performance and Aerodynamics*, “Journal of Turbomachinery”, Vol. 135, No. 1, 011012, 2013.
- CA-OWEE, *Offshore Wind Energy: Ready to Power a Sustainable Europe – Final report*, Concerted Action on Offshore Wind Energy in Europe, Delft, The Netherlands 2001, [www.offshorewindenerge.org].
- O. Demirbilek, B. Sener, *Product Design, Semantics and Emotional Response*, “Ergonomics”, vol. 46(13/14), 2003, pp.1346–1360.
- DWIA and Fraunhofer, *Wind Barriers survey*, EWEA, *Administrative and grid access barriers to wind power*, 2010, [http://www.windbarriers.eu/fileadmin/WB\_docs/documents/WindBarriers\_report.pdf].
- EC, *Directive 2009/28/EC of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources*, 2009.
- Eurostat, *Electricity Statistics*, 2010, [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics\_explained/index.php/Renewable\_energy\_statistics].
- EWEA, *Social Acceptance of Wind Energy and Wind Farms. Wind energy – the facts: A guide to the technology, economics and future of wind power*, European Wind Energy Association, London, UK, Sterling, VA, 2009.
- EWEA, *Wind in power, 2012, European statistics*, 2017, [http://www.ewea.org/statistics/].
- A. Gawlikowska, *Architecture in the center of conflict. Threats for its Identity*, Warsaw University of Technology, 2011.
- Germanischer Lloyd Industrial Services gmbH, *Guideline for the certification of wind turbines*, Technical report, Rules and Guidelines Industrial Services, 2010.
- A. Giddens, *Modernity and Self-Identity. Self and Society in the Late Modern Age*, Polity, Cambridge 1991.
- A. C. Goodyear, *From Technophilia to Technophobia: The Impact of the Vietnam*, Leonardo, vol. 41(2), 2008, pp. 169–173.
- J. B. Graham, J. R. Stephenson, I. J. Smith, *Public perceptions of wind energy developments: Case studies from New Zealand*, Energy Policy, vol. 37(9), 2009, pp. 3348.
- S. Horbaty, S. Huber, G. Ellis, *Large-scale wind deployment, social acceptance*, WIREs Energy Environ, 1: 194–205 doi: 10.1002/wene.9, 2012.
- IEC, *Guidelines for Design Load Cases*, IEC 61400-1, x 7.4, Germanischer Lloyd Industrial Services, 2010.
- G. Jonkman, S. Musial, W. Scott, J. Butterfield, *Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development*, Technical report, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO., 17 Wind Energy; Design; Manufacturers; Specifications; Turbines; Wind Turbines; Wind Power, 2009.
- A. Koskinen, O. Laitinen, *Social acceptance of Wind Energy Projects: State-of-the-Art in Finland*, Wpd Finland oy, motiva, Finland 2010.



A. Mäkelä, *Emotions, user experience and directions for designing emotional rich products*, Literature review. eDesign, 3.12.1999, [<http://www.hut.fi/~ahmakela/eDesign/literature.html>].

Y. Maruyama, *Social acceptance of Wind Energy Projects: State-of-the-Art in Japan*, University of Tokyo, Japan 2010.

M. Moy de Vitry, *Structural Integrity of Architecturally Designed Wind Turbines*, Internal Report, Laboratory for Energy Conversion, ETHZ, 2012.

C. Panzer, G. Resch, L. Liebmann, *Renewable energies in Europe – Scenarios on future European policies for RES*, [in:] M. Ragwitz, et al., *RE-Shaping: Shaping an effective and efficient European renewable energy market*, Report within the European research project “RE-Shaping”, Intelligent Energy for Europe – Programme, Karlsruhe 2012, [[http://www.green-x.at/RS-SV/scenarios-o\\_2-1\\_2020\\_RES\\_target.php](http://www.green-x.at/RS-SV/scenarios-o_2-1_2020_RES_target.php)].

PSEW, 2013, Polish Wind Energy Association, private communication, 2012.

P. Ricœur, *Oneself as Another*, University of Chicago Press, Chicago 1990.

B. H. Schmitt, A. Simms, *Marketing Aesthetics: The Strategic Management of Brands, Identity, and Image*, The Free Press, New York 1997.

J. P. Schoormans, H. S. Robben, *The effect of new package design on product attention, categorization and evaluation*, “Journal of Economic Psychology”, vol. 18, 1997, pp. 271–287.

P. Schweizer-Ries, et al., *Activation and Involvement – how to increase the acceptance of RES through participation: Project description*, Germany 2010.

R. G. Stein, *Architecture and Energy*, Anchor Press, Doubleday, Garden City, New York 1977.

R. Thayer, H. Hansen, *Consumer Attitude and Choice in Local Energy Development*, Department of Environmental Design, University of California – Davis, 1989, pp. 17–19.

W. Tong, *Wind power generation and wind turbine design*, WIT Press, Southampton 2010.

R. L. Underwood, N. M. Klein, R. R. Burke, *Packaging communication: Attentional effects of product imagery*, “Journal of Product & Brand Management”, vol. 10(7), 2001, pp. 403–422.

Anna Gawlikowska, *Phd, Arch.*,  
M. Moy de Vitry, N. Chokani, R. S. Abhari  
Department of Mechanical and Process Engineering  
Laboratory for Energy Conversion, ETH Zurich,  
Switzerland