



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky**

**Návrh plovoucí větrné elektrárny**

**Proposal of a floating wind turbine**

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika, management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Vít Klein, Ph.D.

**Albina Paljević**

---

**Praha 2018**



*Bakalářská práce*  
*Návrh plovoucí větrné elektrárny*

---



Bakalářská práce  
Návrh plovoucí větrné elektrárny



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Paljević** Jméno: **Albina** Osobní číslo: **453320**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Návrh plovoucí větrné elektrárny**

Název bakalářské práce anglicky:

**Proposal of a floating wind turbine**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Větrná energie
- 2) Plovoucí větrné elektrárny - základy
- 3) Návrh turbíny
- 4) Ekonomické vyhodnocení
- 5) Ekologické vyhodnocení

Seznam doporučené literatury:

1. MANWELL, James, MCGOWAN, Jon a Anthony ROGERS. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application second edition. Washington, USA: John Wiley & Sons Ltd, 2009. ISBN 978-0-470-01500-1
2. HEMAMI, Ahmad. Wind Turbine Technology. New York, USA: Cengage Learning, 2010. ISBN 978-1-4354-8646-1
3. SHIELDS, Craig. Renewable Energy - Facts and Fantasies. USA: Clean Energy Press, 2010. ISBN: 0615388353
4. MASTERS, Gilbert. Renewable and Efficient Electric Power Systems. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2004. ISBN 0-471-28060-7

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Vít Klein, Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **03.02.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Vít Klein, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis (konzultant)

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky



## Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Vítu Kleinovi, Ph.D., za cenné rady, připomínky a věnovaný čas.



## Anotace

Tato práce se zabývá větrnou energií jako jedním z nejperspektivnějších obnovitelných zdrojů energie. V poslední době, vývojáři mají tendenci rozvíjet nové způsoby využití energie větru. Jeden z těchto způsobů je postavení větrných farem v moři, kde je vítr silnější. Cílem práce je popsat základní znalosti potřebné k postavení takové větrné farmy, a ohodnotit ji z ekonomického a ekologického pohledu.

## Klíčová slova

větrná energie, plovoucí větrná elektrárna, vítr, ekonomické hodnocení plovoucích větrných elektráren, ekologické hodnocení plovoucích větrných elektráren

## Abstract

This thesis focuses on wind energy as one of the most promising renewable energy sources. Recently, developers tend to develop new ways of using wind energy. One of those ways is the development of wind farms in the sea, where the wind is stronger. The aim of the thesis is to describe the basic knowledge needed to build such a wind farm and to evaluate it from the economic and ecological point of view.

## Key words

wind energy, offshore wind power plant, wind, economics of offshore wind power plants, ecology of offshore wind power plants



## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 23.05.2018

Albina Paljević



## Seznam obrázků a tabulek:

### Obrázky:

1. Obrázek 1 - Spotřeba energie v období 1990 – 2016 .....	1
2. Obrázek 2 - Podíl energie vyrobené z obnovitelných zdrojů podle regionů .....	2
3. Obrázek 3 - Větrný rotor z 1. století .....	5
4. Obrázek 4 - První elektrárny (vlevo ve Spojených státech, vpravo v Dansku).....	6
5. Obrázek 5 - Celkový instalovaný výkon větrných elektráren od roku 2012 .....	7
6. Obrázek 6 – Anemometr .....	9
7. Obrázek 7 - První offshore projekty .....	13
8. Obrázek 8 - Příklad offshore větrné turbíny .....	18
9. Obrázek 9 - Výroba lopatek .....	18
10. Obrázek 10 - Typy stožárů.....	20
11. Obrázek 11 – Montáž .....	23
12. Obrázek 12 - Hloubka vody a vzdálenost od přístavu v závislosti na roku stavby.....	30
13. Obrázek 13 - SCOE koncept .....	32
14. Obrázek 15 - Offshore větrná farma .....	36

### Tabulky:

1. Tabulka 1 - Největší offshore větrné farmy, stát a rok stavby a typ turbíny.....	12
2. Tabulka 2 - Charakteristiky typické větrné farmy v letech 2001 a 2015 .....	16
3. Tabulka 3 - Náklady offshore větrného projektu.....	28



## Obsah:

Úvod.....	1
<b>1. Větrná energie .....</b>	<b>4</b>
1.1. Historie větrných elektráren.....	5
1.2. Energie větru .....	7
1.3. Intenzita rychlosti a směr větru.....	8
1.4. Měření rychlosti .....	9
1.5. Větrná růžice .....	10
<b>2. Větrné turbíny na moři.....</b>	<b>11</b>
2.1. Pilotní projekty.....	13
2.2. Offshore větrné elektrárny v Evropě .....	14
2.3. Offshore větrné elektrárny ve světě .....	15
<b>3. Technologie .....</b>	<b>16</b>
3.1. Technologie dodnes .....	16
3.1.1. Rozvoj větrné farmy.....	17
3.1.2. Turbína .....	17
3.1.2.1. Rotor.....	18
3.1.2.2. Gondola.....	19
3.1.2.3. Stožár .....	19
3.1.3. Základy.....	19
3.1.4. Elektrické propojení .....	21
3.1.5. Montáž .....	21
3.1.6. Provoz, údržba a servis .....	23
3.2. Technologie v budoucnosti .....	24
3.2.1. Rozvoj větrné farmy.....	24
3.2.2. Turbína .....	24
3.2.3. Základy.....	25
3.2.4. Elektrické propojení .....	26
3.2.5. Montáž .....	26
3.2.6. Provoz, údržba a servis .....	26
<b>4. Ekonomické vyhodnocení.....</b>	<b>28</b>
<b>5. Ekologické vyhodnocení .....</b>	<b>35</b>





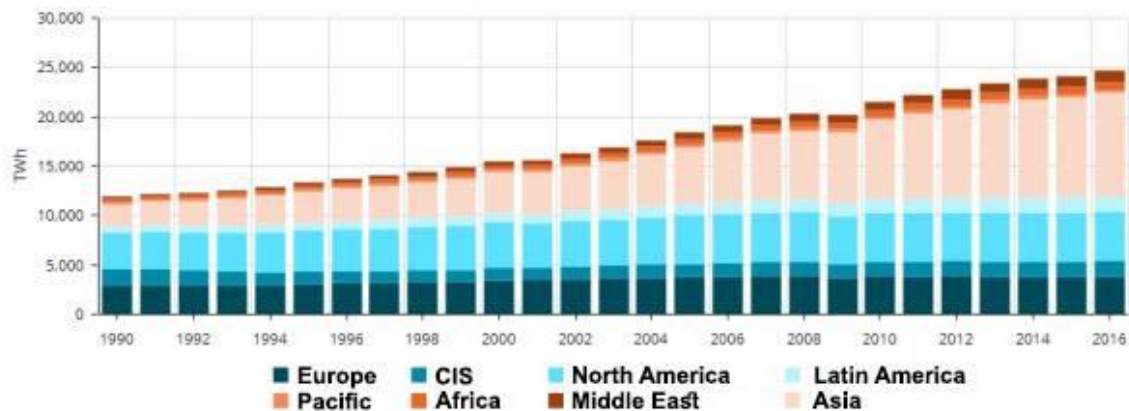
5.1. Vizuální dopad .....	35
5.2. Hluk.....	36
5.2.1. Hluk v průběhu výstavby .....	37
5.2.2. Hluk během práce .....	38
5.3. Elektromagnetické pole a mořské organismy .....	39
5.4. Vliv na mořský svět .....	39
5.4.1. Vliv na bentos .....	39
5.4.2. Vliv na ryby .....	40
5.4.3. Vliv na mořské ptáky .....	41
5.5 Kolizí lodí .....	42
5.6. Radary a rádiové signály.....	42
<b>Závěr .....</b>	<b>44</b>
<b>Použitá literatura .....</b>	<b>45</b>



## Úvod

Jednou ze základních potřeb dnešního člověka je jistě elektrická energie. Vzhledem k způsobu života, v moderní době je potřeba elektrické energie v porovnání s minulým stoletím mnohem větší. Ve stejném čase je i určitě menší v porovnání s dalšími roky. Světové energetické potřeby rostou mnohem rychleji, než je možné dosáhnout současnou výrobou z konvenčních zdrojů. S dnešní mírou výdajů budou zásoby fosilních paliv vyčerpány již několik desetiletí, což již má dopad na nepředvídatelný růst jejich cen.

Celková spotřeba energie zaznamenala v roce 2016 nárůst o 1 % oproti nárůstu o 0,9 % v roce 2015 a 1 % v roce 2014. Nárůst je nižší než desetiletý průměr, což je 1,8 % ročně. Nárůst spotřeby je podprůměrný ve všech regionech, s výjimkou Evropy a Eurasie, jak tomu bylo v roce 2015. Čína jako největší spotřebitel energie zaznamenala v roce 2016 růst spotřeby o 1,3 %<sup>1</sup>.



Obrázek 1 - Spotřeba energie v období 1990 – 2016<sup>1</sup>

Ropa je stále největším zdrojem energie na světě s třetím podílem na celkové spotřebě energie. Produkce ropy klesla v Číně, Spojených státech a Nigérii ve srovnání s Blízkým východem, kde produkce stoupá díky zemím jako Írán, Irák a Saúdská Arábie.

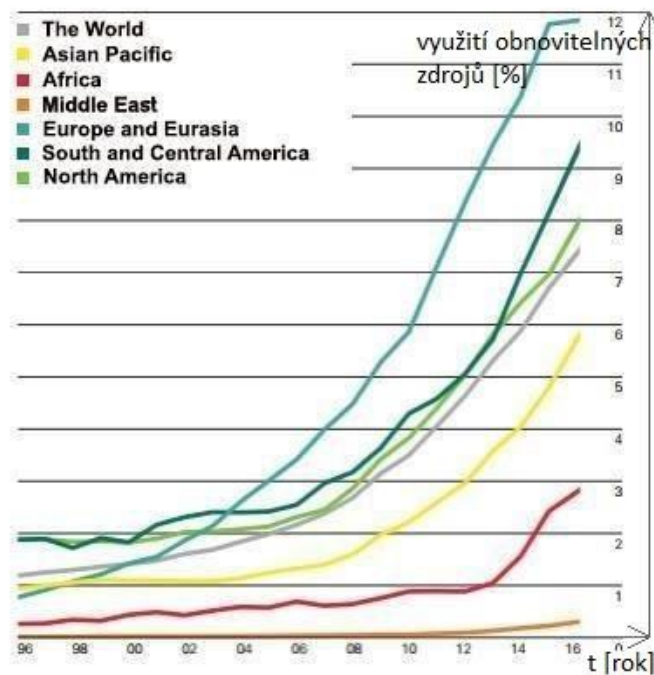
<sup>1</sup> BP Statistical Review of World Energy, červen 2017 [online]. Dostupné z:

<https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>



Celková spotřeba uhlí klesla meziročně o 1,7 %, což je druhý po sobě následující pokles. Největší pokles spotřeby je zaznamenán ve Spojených státech a v Číně. Podíl spotřeby energie z uhlí klesl na 28,1 % celkové spotřeby, což je nejnižší hodnota od roku 2004. Světová produkce uhlí klesla o 6,2 %, což je největší pokles od poloviny minulého století.

Přestože emise CO<sub>2</sub> stále rostou, tento růst je stále nižší než v předchozích letech. Důvodem jsou nové trendy v energetickém odvětví, které se stále více spoléhají na obnovitelné zdroje energie. Produkce obnovitelné energie vzrostla v roce 2016 o 14,1 %, což je nejvyšší zaznamenaný růst. S výjimkou energie získané z vody má největší podíl na zmíněném růstu výroby větrná energie (více než 50%) a sluneční energie (30%). Pokud se podíváme na regiony, vedoucí postavení producentů obnovitelné energie v roce 2016 převzalo Asijsko-tichomořská oblast z Evropy a Eurasie.



Obrázek 2 - Podíl energie vyrobené z obnovitelných zdrojů podle regionů<sup>2</sup>

<sup>2</sup> BP Statistical Review of World Energy, červen 2017 [online]. Dostupné z:

<https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>



Pokud se podíváme na statistické parametry a doprovodné trendy, lze s určitou mírou jistoty říci, že v oblasti energie dochází ke změně ve vztahu k stavu před deseti nebo dvaceti lety. Přesto je jasné, že ropa přes noc nezmizí. Technologický vývoj a politická dohoda na nejvyšší úrovni vyžadují přechod na čistší formy energie. Čistší formy energie jsou stále ale privilegium ekonomicky rozvinutých zemí, jako jsou Spojené státy, Brazílie, Španělsko, Spojené království a Itálie, které mají potenciál zvýšit podíl obnovitelných zdrojů energie.



## 1. Větrná energie

Vítr je jednoduše definován jako proud vzduchu v důsledku rozdílů teploty a tlaku. Průtok vzduchu vede k tření, tj. ke ztrátě kinetické energie, což vede ke změnám rychlosti v prostoru a čase.

Vítr a jiné obnovitelné zdroje energie pocházejí ze sluneční energie. Každou hodinu slunce vydává Zemi 1014 kW energie. Asi 1 až 2 % energie vyzařované Sluncem se přemění na větrnou energii. Je to 50 až 100 krát více než erodování Slunce, které se přeměňuje na biomasu. Oblasti kolem rovníku jsou ohřívány solárním teplem mnohem víc než jiné části Země. Teplý vzduch nad rovníkem tyčí do výšky asi 10 km nad zemí, kde se nadále kruhově se šíří pod vlivem tzv. Coriolisovy síly (rotace Země).

Kromě globální cirkulace vzduchu, velmi důležitá je i atmosférická cirkulace, protože způsobuje velké výměny vzduchových hmot mezi póly a regionů středních a subtropických geografických šířkách.

Vítr, jako pohyb vzduchu nad určitou částí země, může být způsoben primárním oběhem způsobeným rozložením tlaku vzduchu (typické pro čtyři roční období) nebo pohybem synoptických systémů a anticyklonů, které ovlivňují tvorbu místních větrů různých charakteristik pohybu vzduchu. Cirkulace vzduchu ve středních nebo malých rozměrech, neviditelná na synoptických mapách, může také ovlivnit charakter a sílu místních větrů.

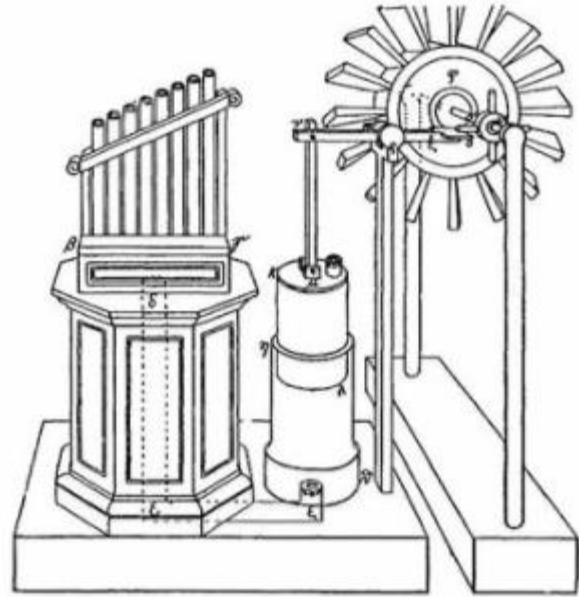


## 1.1. Historie větrných elektráren

Historie využívání větrné energie začíná v období, kdy lidé poprvé postavili plachty na lodích a umožnili tak cestovat dále než dříve. Dá se říci, že v některých ohledech byl vítr ten, který zahájil éru výzkumu a umožnil přepravu zboží v nezatíženém množství na dlouhé vzdálenosti. Dlouhou dobu po prvním postavení plachet na lodi, byla využívána větrná energie k provádění mechanických prací v mlýnech a provozování vodních čerpadel (zejména v Nizozemsku, na Středním západě USA a na vzdálených částech Austrálie). V moderní době se příchodem a vynálezem elektřiny využívá větrná energie za účelem její výroby, avšak pouze v posledních dvou desetiletích, díky rostoucímu znečištění větrné elektrárny, je stále důležitější. Dnes je jedním z hlavních zdrojů energie pro blízkou budoucnost.

Nejdříve známý případ využívání větrné energie k ovládnutí rotoru motorem je "větrný rotor" z 1. století před naším letopočtem, který postavil řecký inženýr Heron Alexandrie.

První větrné mlýny pro praktickou aplikaci byly v provincii mezi Afghánistánem a Íránem používány nejdříve v 9. století a možná už v 7. století. Jednalo se o větrné mlýny se svislou osou otáčení a obdélníkové plachetnice používané pro broušení a čerpání vody. Jejich použití bylo rozšířené ve střední Asii a na Středním východě. Větrné mlýny s horizontální osou otáčení byly zavedeny v severozápadní Evropě na začátku 80. let 20. století a byly použity pro broušení. Mnoho starých holandských větrných mlýnů dnes existuje. V té době byly větrné mlýny také používány k čerpání slané vody do soli v Číně a na Sicílii.



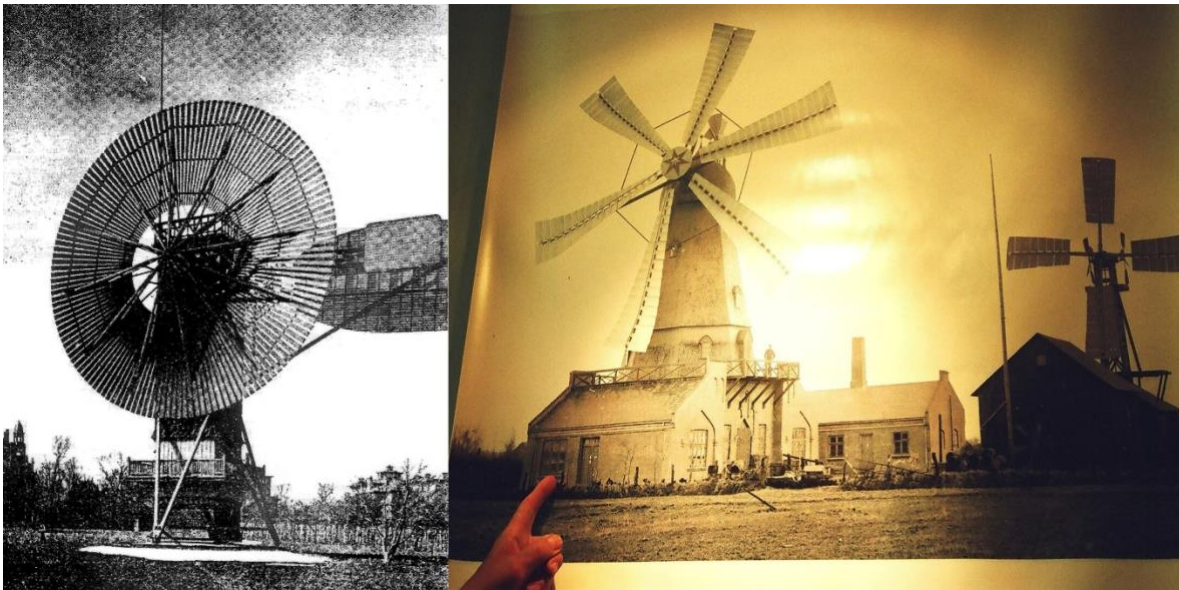
Obrázek 3 - Větrný rotor z 1. století<sup>3</sup>

<sup>3</sup> První větrný rotor [online]. Dostupné z: <http://wiki.eanswers.net/hr/Vjetroelektrana>



Nejstarší vzpomínka na větrný mlýn s vodorovnou osou pochází z roku 1185 v Weedley, Yorkshire, Spojené království. Evropské větrné mlýny s horizontálními osami byly konstruktivně odlišné od iránských a afghánských větrných mlýnů se svislou osou otáčení a jsou obecně považovány za dva zcela samostatné a nezávislé objevy. Ve středověku byly umístění vodních toků a tím i využívání vodní energie zpravidla vyhrazeny pro aristokracie, takže větrná energie byla důležitým zdrojem energie pro nižší stánky. Od 14. století se holandské větrné mlýny používaly k odčerpávání (čerpání vody) delty Rýna.

První velkou větrnou turbínu na výrobu elektřiny vystavil ve Spojených státech Charles Brush v roce 1888 s rotorem průměru 17 m postaveným na 18 m vysokém pilíři. Navzdory své velikosti vyvinula maximální výkon pouze 12 kW, otáčela se poměrně pomalu a měla 144 nožů. Jeho turbína fungovala až do roku 1900, kdy byla v Clevelandu postavena centrální elektrárna. Na konci 19. století vybudoval dánský vědec Poul la Cour generátor větrné turbíny pro výrobu elektřiny, který byl poté použit k výrobě vodíku pro testování na střední škole Ashok. Jeho větrný agregát z roku 1896 se potom stal místní elektrárnou obce Askov. Rozdíl mezi těmito dvěma elektrárnami spočíval v tom, že Brushova elektrárna vypadala jako kolo s mnoha lopatkami, a la Courova byla inspirovaná větrnými mlýny<sup>4</sup>.



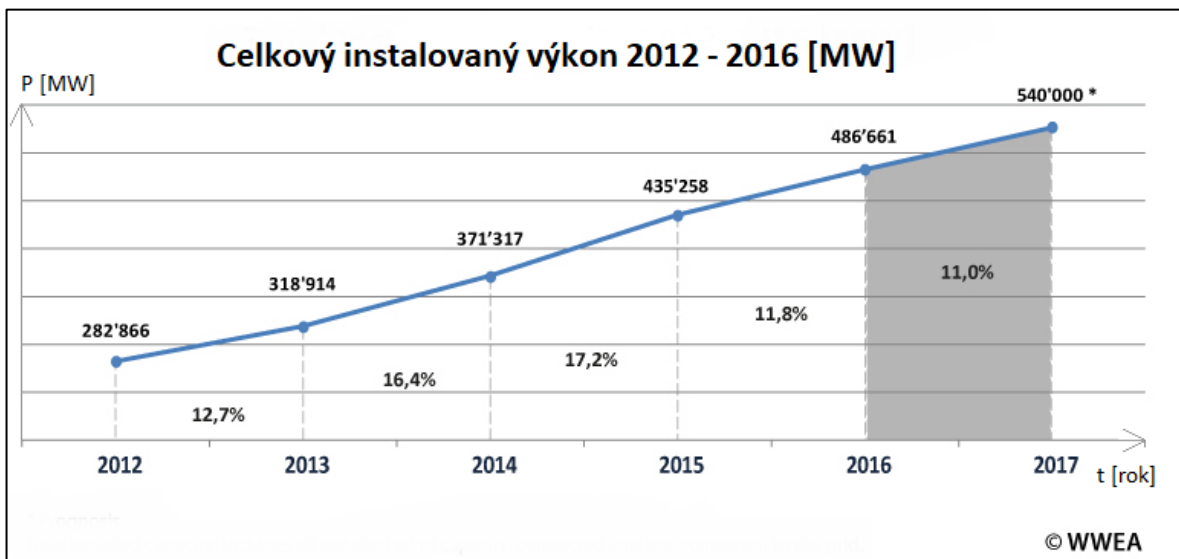
*Obrázek 4 - První elektrárny (vlevo ve Spojených státech, vpravo v Dansku)<sup>4</sup>*

<sup>4</sup> První elektrárny [online]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/13452-vetrne-elektrarny-i-historie-do-roku-1975>



Historii větrných elektráren v Evropě i ve 20. století dál psalo především Dánsko.

Je známo, že se v dnešní době obnovitelné zdroje energie nevyužívají dostatečně a že se lidi stále více snaží vyvíjet koncepty pro jejich využívání. V poslední době se lidi snaží co nejvíc používat obnovitelné zdroje energie, proto jsou i větrné elektrárny častěji využívány. Využívání větru je jen jedním z těchto zdrojů energie a vyvíjí se už mnoho let. K dnešnímu dni byly využívány převážně standardní větrné elektrárny, které nebyly dostatečně výnosné, a proto se rozvila myšlenka umístit elektrárny na moře, kde by mohla být lépe využita síla větru.



Obrázek 5 - Celkový instalovaný výkon větrných elektráren od roku 2012<sup>5</sup>

## 1.2. Energie větru

Větrná turbína získává svůj vstupní výkon tím, že mění sílu větru na rotační sílu rotoru. Množství energie přenášené větrem na rotor je v přímé závislosti na hustotě vzduchu, povrchu rotoru a rychlosti větru. Kinetická energie větru tedy závisí na hustotě vzduchu, tj. jeho hmotnosti na jednotku objemu. Jinými slovy, čím hušší vzduch, tím více energie ve větrné turbíně. Při normálním atmosférickém tlaku a teplotě vzduchu 15 °C je hustota vzduchu 1,225 kg.m<sup>-3</sup>.

<sup>5</sup> Celkový instalovaný výkon 2012-2016 [online]. Dostupné z: <http://www.wwindea.org/category/statistics/>





Hustota vzduchu však mírně klesá s rostoucí vlhkostí. Stejně tak je chladnější vzduch hustší než teplejší. Ve vyšších nadmořských výškách je tlak vzduchu nižší a vzduch je méně hustý.

Typický typ turbíny (středního výkonu) 600 kW s průměrem rotoru 43 - 44 m má povrch rotoru přibližně 1500 m<sup>2</sup>. Právě povrch rotoru určuje množství energie, kterou může větrná turbína produkovat. Když víme, že povrch rotoru roste se druhou mocninou průměru rotoru, dvojitá větrná turbína produkuje čtyřnásobek síly.

Větrná energie je měřítkem teoreticky dostupné energie ve větrné turbíně a je obecně přímo úměrná třetímu stupni rychlosti větru:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad [W; kg \cdot m^{-3}; m \cdot s^{-1}] \quad (1)$$

kde: P – specifická větrná energie [W],  $\rho$  – hustota vzduchu [kg.m<sup>-3</sup>], v - průměrná rychlost větru [m.s<sup>-1</sup>]

### 1.3. Intenzita rychlosti a směr větru

Dvěma základními složkami větru jsou intenzita rychlosti a směr foukání větru. Tyto velikosti lze stanovit vizuálně nebo měřeními. Vizuální hodnocení je realizováno prostřednictvím vizuálních efektů větru na přírodní prostředí a je obvykle vyjádřeno tzv. Beaufortovou stupnicí větrné energie. Směr větru je určen pomocí rotujícího mechanického ukazatele.

Meteorologické měření na meteorologických stanicích jsou prováděny v souladu s jednoznačně stanovenými normami Světové meteorologické organizace (WMO). Pokud jsou metrické údaje v souladu se standardy Světové meteorologické organizace, mohou se vztahovat na plochu o průměru přibližně 5 km od místa, kde se nachází anemometr (přístroj pro měření rychlosti větru), a také na výšku 60 m nad místem přístroje.



## 1.4. Měření rychlosti

Je obvyklé, že rychlost větru je měřena anemometrem se třemi nebo čtyřmi dutými polokoulemi otáčejících se kolem společného středu – Miskový anemometr.

Tento typ anemometru je tvořen vertikální hřídelí se třemi polokoulemi nahoře, na které působí vítr. Počet otáček za minutu se zaznamenává elektronicky.

V praxi se vedle anemometru nastaví "větrný mlýn" - mechanismus pro určení směru větru. Jiné typy anemometrů, včetně ultrazvukových nebo laserových, určují fázový posun zvuku nebo koherentní světlo odražené od molekuly vzduchu, čímž se přesně určuje rychlost větru.

Nejlepší způsob pro měření rychlosti větru v potenciálních míst pro výstavbu větrných elektráren je skutečnost, že anemometr je umístěn na horní části měřícího stožáru, na předpokládané výšce osy rotoru větrné elektrárny.



Obrázek 6 – Anemometr<sup>6</sup>

Umístěním anemometru na samém vrcholu měřícího stožáru se sníží chyby měření způsobené vlivem samotného měřícího stožáru na rychlost větru. Měřící stožáry jsou dodávány v prvcích, které lze snadno a rychle namontovat bez použití jeřábů.

---

<sup>6</sup> Anemometr [online]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Anemometer>



## 1.5. Větrná růžice

Na základě meteorologických údajů o rychlostech a směru větru lze vytvářet diagramy větrných růžic, které graficky poskytují informace o rychlosti větru a jejich frekvenci v některých směrech.

Diagram je ukazován ve tvaru kruhu, který je jako kompas rozdělen do 12 stejných sektorů, každý sektor má 30 stupňů, což je považováno za standard pro Evropský atlas větrů.

Větrná růžice zobrazuje informace o relativní rychlosti větru v různých směrech proudění. Větrová růžice se pro každou lokalitu liší. Ve skutečnosti jsou větrové růžice nějakou formou jedinečného meteorologického charakteru lokality.

Charakteristiky větru na daném místě se mohou každoročně lišit, což znamená, že se potenciál větrné energie může meziročně lišit až o 10 %. Proto je vhodné poskytnout víceleté měření charakteristik větru v místě, aby se dosáhly spolehlivější průměrné parametry.

Návrháři své výpočty obvykle založí na nepřetržitém jednoročním měření na potenciálním místě s maximálním možným využitím dlouhodobých měření.



## 2. Větrné turbíny na moři

Větrná energie na moři může přispět ke snížení znečištění ovzduší a skleníkových plynů, ke snížení dovozu elektřiny, splnění standardů v oblasti obnovitelných zdrojů energie a vytvoření pracovních míst a místních obchodních příležitostí. Přestože větrná energie, jako důležitý zdroj obnovitelné energie, byla primárně využívána na pozemcích, získávání elektrické energie využívající větrné turbíny na moři je stále důležitější. Vzhledem k vyšší rychlosti větru na moři má pobřežní větrná energie přednost před pozemním větrem. Vzhledem k tomu, že síla větru stoupá s třetí mocninou rychlosti větru, je mořský větrný proud schopen dodat větší energii než pozemní vítr. Dále kvůli vysoké vlhkosti vzduchu, vítr (nebo vzduch) v mořských oblastech má větší hustotu než v půdních oblastech: kinetická energie vzduchu je funkce jeho hustoty, jeho hmotnosti na objemovou jednotku. Vysoká hustota směsi vzduchových výparů znamená, že větrné turbíny na moři jsou schopny přeměnit více energie. Na rozdíl od větru nad kontinentem, vítr na moři může být silnější odpoledne, což odpovídá době, kdy lidé využívají většinu elektřiny. Offshore turbíny mohou být také umístěny poblíž energeticky náročných populací podél pobřeží, čímž se eliminuje potřeba nových pozemních přenosových vedení. Vítr na moři je obecně méně turbulentní než na pevnině, což umožňuje relativně snadnější efektivní provoz větrné turbíny. Při zohlednění toho, že nejsou k dispozici žádné překážky kromě ostrovů, bude turbulence mořské povrchové vrstvy nižší než na zemi, protože teplotní rozdíly v různých výškách atmosféry jsou nižší. To znamená, že rychlost větru netrpí zásadními změnami a druhy vysokých věží, které jsou nezbytné pro pozemní turbíny, již nejsou potřebné, což dále vede ke snížení mechanické zátěže a tím k delší životnosti turbín, snížení nákladů na materiál a údržbu. Obvykle se více větrných turbín spojuje v jedné větrné farmě a používá společný podvodní kabel pro přenos energie.



Větrná farma	Výkon [MW]	Stát	Turbína	V provozu od
London Array	630	UK	175 × Siemens SWT-3.6	2012
Gemini Wind Farm	600	Nizozemí	150 × Siemens SWT-4.0	2017
Greater Gabbard	504	UK	140 × Siemens SWT-3.6	2012
Anholt	400	Dánsko	111 × Siemens SWT-3.6-120	2013
BARD Offshore 1	400	Německo	80 × BARD 5.0 turbines	2013
Walney	367	UK	102 × Siemens SWT-3.6	2012
Thorntonbank	325	Belgie	54 × Senvion 6 MW	2013
Sheringham Shoal	317	UK	88 × Siemens 3.6	2013
Thanet	300	UK	100 × Vestas V90-3MW	2010
Meerwind Süd/Ost	288	Německo	80 × Siemens SWT-3.6-120	2014
Lincs	270	UK	75 × Siemens 3.6	2013
Horns Rev II	209	Dánsko	91 × Siemens 2.3-93	2009

Tabulka 1 - Největší offshore větrné farmy, stát a rok stavby a typ turbíny<sup>7</sup>

Nevýhodou jsou větší počáteční náklady, než při stavbě obyčejné větrné elektrárny. Vzhledem k vlnám a mořskému proudu musí být offshore turbíny silnější, a tím i dražší než ty, které jsou postaveny na zemi. Většina peněz není ale vynaložena na turbínu. Turbína představuje dnes jen jednu třetinu až polovinu nákladů na offshore projekty, zbytek pochází z infrastruktury, údržby a dohledu. Větší turbíny se zvýšeným využíváním energie mají větší ekonomický význam v důsledku dodatečné infrastruktury v pobřežních systémech. Kromě toho v současné době neexistují přesné simulační modely vnějších vlivů na větrné farmy na moři, jako např. účinky na stabilitu hraniční vrstvy a efekty probuzení. To způsobuje obtíže při přesném předvídání výkonnosti, což je kritický nedostatek při financování pobřežních zařízení v miliardách dolarů.





Umístění větrných elektráren na moři odhaluje jednotky vysoké vlhkosti, slané vodě a slunečnímu spreji, které negativně ovlivňují životnost, způsobují korozi a oxidaci, zvyšují náklady na údržbu a opravy a zpravidla činí každý aspekt instalace a provozu mnohem obtížnější a časově náročnější, mnohem nebezpečnější a mnohem dražší než místa na pozemku.

<sup>7</sup> Největší offshore větrné farmy [online]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Offshore\\_wind\\_power](https://en.wikipedia.org/wiki/Offshore_wind_power)



## 2.1. Pilotní projekty

První pilotní projekt plovoucích větrných turbín byl v létě roku 2008 umístěn vedle sicilského pobřeží holandským Blue H Group Technologies, který postavil malou 80 kW větrnou turbínu se dvěma lopatkami na inovativní polo-ponorné plošině. Plán byl vytvořit větrnou turbínu o výkonu 2 MW později, ale dosud nedošlo k jejímu uskutečnění. První reálný test byl známý projekt Hywind Statoil, který byl umístěn 200 metrů jihozápadně od norského pobřeží. Byla postavena základna 100 metrů pod mořem, s průměrem 8 metrů (tzv. "Spar buoy"), kterou podporuje šestimetrová základna. Na základně je umístěn standardní motor větrné turbíny Siemens s výkonem 2,3 MW, který byl spuštěn v září 2009, a byl nesmírně úspěšný s 40 % produkčním faktorem a bez problémů vydržel bouře, které způsobily vlny vysoké až 11 metrů. Zpočátku bylo plánováno, že bude pracovat 2 testovací roky. Po dvou letech Hywind pokračovala ve své práci a je nyní první plovoucí pobřežní větrnou farmou a poskytuje elektrickou energii více než 650 000 britským domům

Floating Wind Turbine Pioneers				
				
Developer	• StatoilHydro, Norway	• Blue H, Netherlands	• Principle Power, USA	• SWAY, Norway
Platform	• "Hywind" spar buoy with catenary moorings	• Tension-leg concept with gravity anchor	• "WindFloat" semi-submersible with catenary moorings	• Spar buoy with single taut tether
Wind Turbine	• Siemens 2.3-MW upwind, 3-bladed	• Gamma 2-bladed, teetering, yaw-regulated	• Coordinating with suppliers for 5-MW+ units	• Swivels downwind • Partnering with Multibrid
Status	• \$78M demonstration project in North Sea • First PoC installed in Summer 2009 • Plans to license technology	• Deployed PoC system with 80-kW turbine in Italy in summer 2007 • Receiving funding from ETI for UK-based projects	• Extensive numerical modeling • Tested in wave tank • Planning demonstration projects	• Extensive numerical modeling • Planning demonstration projects

AWEA Offshore Wind Project Workshop 3 National Renewable Energy Laboratory

Obrázek 7 - První offshore projekty<sup>8</sup>

<sup>8</sup> Průkopníci offshore projektů. A *Quantitative Comparison of Three Floating Wind Turbines* [online]. Dostupné z: [https://www.sintef.no/globalassets/project/nowitech/wind\\_presentations/jonkman-j.-nrel.pdf](https://www.sintef.no/globalassets/project/nowitech/wind_presentations/jonkman-j.-nrel.pdf)



Dalším norským konceptem je SWAY, pokročilá realizace velkých offshore větrných turbín. Patentovaný systém SWAY se skládá z plovoucí věže, která se táhne hluboko do vody, a jediné trubky ukotvené na mořském dně. S plovoucím předřadníkem na dolním konci má věž své těžiště mnohem pod středem vztlaku stability. Rotor je orientován proti větru třemi lopatkami. Když vítr zasáhne rotor, systém se nakloní o 5 až 8 stupňů. Když vítr změní směr, celá věž se otočí kolem podmořského otáčení, což vynutí věž, aby se vyrovnala s větrem. Tyto vlastnosti nejen zvyšují energetickou účinnost, ale umožňují přidání vyztužení drátu na věži, což by zvýšilo tuhost věže. Věž je tudíž schopna přenášet větší turbíny.

## 2.2 Offshore větrné elektrárny v Evropě

Rok 2017 byl rekordním rokem pro větrné elektrárny v Evropě podle statistik, které zveřejnila společnost WindEurope začátkem roku 2018. Evropa instalovala 3,1 GW nového offshore větru, přičemž celková kapacita dosáhla 15,8 GW, což představuje nárůst celkové kapacity o 25 % za pouhý rok.<sup>9</sup>

Bylo dokončeno 13 nových pobřežních větrných elektráren, včetně první plovoucí pobřežní větrné farmy na světě, Hywind Scotland. 53 % celkové nové kapacity bylo instalováno ve Spojeném království (včetně uvedení první plovoucí pobřežní větrné elektrárny do provozu: Hywind ve Skotsku). Druhou největší zemí bylo Německo se 40 % celkové evropské kapacity, z velké části realizované uvedením Veja Mate a Wikinger do provozu. Belgie představovala 5 % celkového podílu. Tento rok byla uvedená do provozu i první pobřežní větrná elektrárna speciálně navržená pro ledové podmínky – Pori Tahkuoloto 2. Stalo se to ve Finsku. Také byl uveden do provozu 2 MW Floatgen demonstrant. Je to první pobřežní větrná turbína ve Francii. 5 MW bylo také vyřazeno z provozu v Dánsku ve Vindeby. V roce 2017 byla provedena práce celkem na 26 větrných elektrárnách včetně síťových připojení, montáže větrných turbín a základů.

---

<sup>9</sup> WINDEUROPE. *Wind in power 2017* [online]. Dostupné z: <https://windeurope.org/about-wind/statistics/european/wind-in-power-2017/>



Průměrný výkon nových turbín v roce 2017 je 493 MW, což představuje nárůst o 34 % ve srovnání s výkonem v roce 2016. Důležité je taky zaznamenat, že faktory kapacity se také zvyšují. Faktor kapacity dostaneme jednoduše když vydělíme průměrnou výkonnost jmenovitým špičkovým výkonem. V Evropě existují projekty, které již působí na kapacitních faktorech 54 % (Nahost 1, Dánsko) nebo dokonce 65 % (Dudgeon, Spojené království).

Dalších 11 pobřežních větrných elektráren je v současné době ve výstavbě a oni přidají dalších 2,9 GW. Potrubní tok by pak měl do roku 2020 dát dohromady 25 GW. Větrné elektrárny v Evropě ale zůstávají silně koncentrované v malém počtu zemí: 98 % z nich pochází z Velké Británie, Německa, Dánska, Nizozemska a Belgie.

Evropa nyní disponuje celkem instalovanou větrnou výkon větru 15 780 MW. V současné době existuje 92 pobřežních větrných elektráren ve 11 evropských zemích a 4 149 větrných turbín<sup>9</sup>.

### 2.3. Offshore větrné elektrárny ve světě

Výkon dodnes instalovaná v Asii je 1,2 GW a nachází se hlavně v Číně a Japonsku. To zahrnuje několik demonstračních větrných elektráren v regionu, přičemž v roce 2010 byla uvedena do provozu první 100 MW farma (Donghai Bridge, Čína). V Asii offshore větrné elektrárny vytytváří méně než 0,1 % celkové elektřiny. Počet vývojářů a dodavatelských řetězců je také menší než v Evropě. Taky nejsou aktivní žádné významné nezávislé provozní a údržbářské společnosti.

Pokud jde o Severní Ameriku, předpokládá se, že do roku 2026 bude instalováno 2,2 GW větrné kapacity na moři. V USA se do teď vyvinula pouze malá větrná elektrárna s pěti turbíny a řada pilotních projektů. Průmysl je hlavně zaměřen na stanovení norem, vyvíjení předpisů a dražení mořských vod pro potenciální rozvoj.

Jinde na světě je činnost minimální.<sup>10</sup>

---

<sup>9</sup> WINDEUROPE. *Wind in power 2017* [online]. Dostupné z: <https://windeurope.org/about-wind/statistics/european/wind-in-power-2017/>

<sup>10</sup> IRENA. *Innovation Outlook: Offshore Wind* [online]. Dostupné z: <http://www.irena.org/publications/2016/Oct/Innovation-Outlook-Offshore-Wind>





### 3. Technologie

Od začátku 21. století se offshore větrné elektrárny ukázaly jako jeden z nejperspektivnějších obnovitelných zdrojů energie. Hlavním problémem při využívání offshore větrných elektráren jsou konstrukční obtíže i finanční náklady, protože offshore větrné elektrárny vyžadují větší náklady především kvůli nákladům na údržbu. Následující kapitoly vyhodnotí nejdůležitější konstrukční části větrné farmy na moři, jakož i jejich ekonomický a ekologický vliv na prostředí.

#### 3.1. Technologie dodnes

Typická pobřežní větrná elektrárna postavená na konci roku 2015 má zcela odlišné charakteristiky od elektrárny postavené na počátku století. Tabulka číslo 2 porovnává hlavní rozdíly mezi charakteristikami typické větrné farmy v letech 2001 a 2015.

	Typická plovoucí větrná farma v roce 2001	Typická plovoucí větrná farma v roce 2015
Hloubka vody [m]	10	25
Vzdálenost od přístavu [km]	20	40
Výkon [MW]	60	300
Rychlost větru ve výšce 100 m nad hladinou moře [ $m \cdot s^{-1}$ ]	9.0	9.8
Počet turbín	30	75
Výkon turbíny [MW]	2	4
Průměr rotoru turbíny [m]	80	130
Základ	Monopile	Monopile

Tabulka 2 - Charakteristiky typické větrné farmy v letech 2001 a 2015<sup>11</sup>

Nejvýznamnější technologickou inovací bylo zavedení nové generace turbín s velkými rotory a řada inovace v oblasti základnách, což vedlo ke snížení nákladů z 250 \$.MW<sup>-1</sup> na 170 \$.MW<sup>-1</sup>.

<sup>11</sup> IRENA. *Innovation Outlook: Offshore Wind* [online]. Dostupné z: <http://www.irena.org/publications/2016/Oct/Innovation-Outlook-Offshore-Wind>



### 3.1.1. Rozvoj větrné farmy

Začátek výstavby offshore větrných elektráren obvykle začíná 7 až 10 let před rokem instalace první turbíny. Jinými slovy, farmy, které se v současné době zřizují, byly ve skutečnosti vytvořeny někdy mezi roky 2008 - 2010. Rozvoj offshore větrných elektráren probíhá souběžně s povolovacími činnostmi.

Primární projekty v oblasti větrné farmy zahrnují:

- hodnocení zdrojů větru,
- optimalizace rozložení větrné farmy (umístění turbín a elektrické propojení),
- návrh turbínových základů a
- strategický rozvoj instalace a operace.

Pro řadu projektů jsou stavěné meteorologické stanice postaveny na místě větrné farmy v počáteční fázi výstavby za účelem monitorování meteorologických a oceánografických podmínek. Stožáry mají typicky anemometry ve třech výškách. Obvykle se doporučuje minimálně dva roky shromažďování údajů o životním prostředí před začátkem projektování větrné farmy.

### 3.1.2. Turbína

Turbína zahrnuje rotor, gondolu a stožár.

Většina turbín provozovaných na konci roku 2016 byla v rozsahu výkonů 3 MW až 4 MW s průměrem rotoru 90 m až 120 m. Největší offshore větrná turbína postavena dodnes, byla turbína MHI Vestas V164-8.0 MW s průměrem rotoru 164 m. Byla postavena před koncem roku 2016.



Obrázek 8 - Příklad offshore větrné turbíny<sup>12</sup>

### 3.1.2.1. Rotor

Rotor se skládá z kompozitních lopatek, železného ložiska, systému vyvrtávání lopatek, pomocných systémů a krytu centra proti povětrnostním vlivům. Do konce roku 2017 měly největší komerčně rozvinuté rotory 75 m dlouhé lopatky. Výška ložiska byla přibližně 100 m nad mořem, což je minimální úroveň, která odpovídá omezením námořní bezpečnosti pro tento průměr rotoru.



Obrázek 9 - Výroba lopatek<sup>13</sup>

<sup>12</sup> Příklad offshore větrné turbíny [online]. Dostupné z: <https://www.americangeosciences.org/critical-issues/faq/what-are-advantages-and-disadvantages-offshore-wind-farms>

<sup>13</sup> Výroba lopatek offshore větrné turbíny [online]. Dostupné z: [https://www.siemens.co.uk/en/news\\_press/index/news\\_archive/2014/major-uk-offshore-wind-manufacturing-site-to-be-built-by-siemens.htm](https://www.siemens.co.uk/en/news_press/index/news_archive/2014/major-uk-offshore-wind-manufacturing-site-to-be-built-by-siemens.htm)



### 3.1.2.2. Gondola

Gondola se skládá z hnacího ústrojí, prvků systému odvodu výkonu, řídicích a monitorovacích systémů a pomocných systémů, jako je chladicí systém a zařízení, které pomáhají údržbě a servisním činnostem, všechny uzavřené v krytu proti povětrnostním vlivům.

Tři koncepty hnacího ústrojí se používají v komerčních offshore turbinech o výkonu 5 MW a vyšších:

- třístupňová převodovka s vysokorychlostním generátorem (pracuje při rychlosti přibližně 1500 otáček za minutu),
- převodovka s nízkým poměrem a generátorem střední rychlosti (pracující při přibližně 400 otáčkách za minutu), a
- generátor permanentních magnetů s přímým nízkorychlostním pohonem (pracující při rychlosti přibližně 12 otáček za minutu), který zabraňuje použití převodovky.

Kapitálové náklady a hmotnost těchto projektů jsou podobné a je nejisté, který nakonec nabídne nejnižší náklady na energii na základě spolehlivosti a provozních nákladů.

### 3.1.2.3. Stožár

Stožáry jsou svařované kuželové ocelové konstrukce vyrobené ve dvou nebo třech úsecích a přišroubovány během doby výstavby. Stožáry jsou vybaveny vnitřními žebříky a osobním výtahem. V některých případech jsou napájecí elektronika a stupňovitý střídavý transformátor pro turbínu umístěny u základny stožáru. V ostatních případech jsou umístěny v gondole. Vrchní část stožáru je spojena s výložníkem uvnitř gondoly a základna má přírubové spojení s základem. Konstrukce a výrobní procesy jsou podobné těm, které se používají v menších turbínách na pevnině, avšak se zvýšenou ochranou proti korozi.

### 3.1.3. Základy

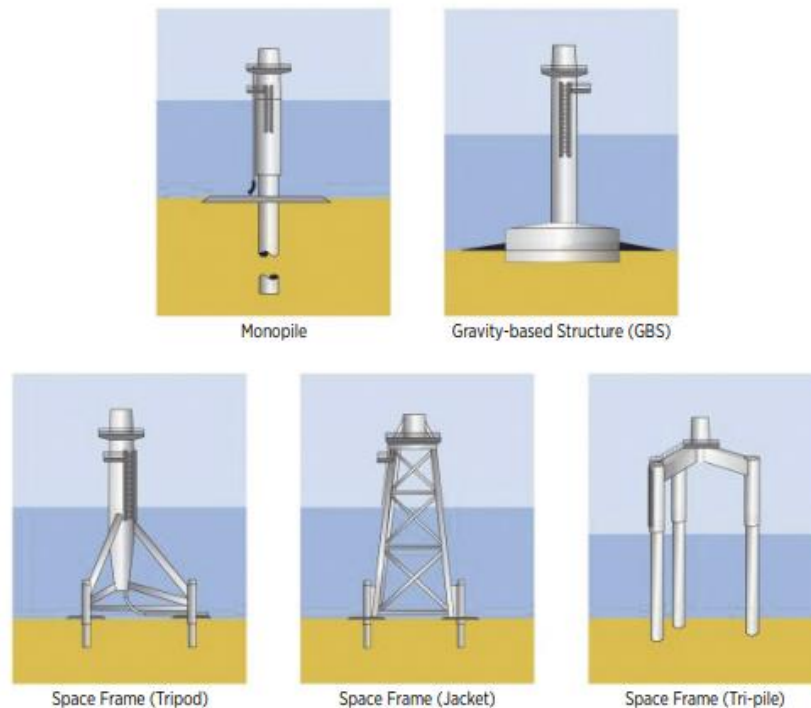
Vývojáři offshore větrných elektráren využívají řadu základů na podporu turbín. Tyto jsou také někdy označovány jako podstruktury. Mnoho faktorů řídí výběr základů v každém



projektu. Mezi hlavní faktory, které řídí výber základů patří hloubka vody, podmínky na mořském dně, zatížení turbíny, hmotnost rotoru a gondoly a rychlost rotoru, zkušenosti firem a schopnost dodavatelského řetězce.

Základy jsou fixovány na dno (upevněny na mořském dně, sáním nebo gravitací) a lze je rozdělit do tří hlavních skupin:

- monopiles - založení ocelového a betonem zalitého tubusu přímo do dna,
- jackets (prostorová hrázďená čtyřnožka zakotvená ve dně) a jiné konstrukce z ocelových prostorových rámců zajištěné pomocí pilot – tripods (trojnožka) a tripiles (tři spojené pilíře) a
- GBS (Gravity – Based Structures) - základy postaveny na základě gravitace vyrobené převážně z betonu.<sup>14</sup>



Obrázek 10 - Typy stožárů<sup>14</sup>

<sup>14</sup> Typy základních fundamentů [online]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/15249-vetrne-elektrarny-viii-morske-offshore-vetrne-elektrarny>



### 3.1.4. Elektrické propojení

Elektrické propojení zahrnuje onshore a offshore infrastrukturu a propojuje větrnou farmu s existující elektrickou rozvodnou sítí. Tato část práce se zaměřuje na elektrické propojení na moři, které zahrnuje:

- kabely, které sbírají energii z řetězců turbín a které se ve většině případů připojují k offshore rozvodné stanici,
- offshore rozvodny, které obsahují rozváděč turbínových řetězců, zvyšují napětí, spravují kompenzace jalového výkonu a v případě potřeby převádějí na DC a
- kabely pro export, které propojují větrnou farmu s pozemní sítí.

Výstup z turbíny je obvykle třífázový a s variabilní frekvencí. Je spojen s konvertorem v turbíně, který transformuje výstup na pevnou frekvenci vhodnou pro síť (obecně, ale nikoliv univerzálně 50 Hz v Africe, Asii a Evropě a 60 Hz v Americe). Transformátor nacházející se v gondole nebo stožárové základně pak zvyšuje napětí až na 33 kilovoltů (kV) pro připojení k kabelové síti větrných elektráren. Sada tří ochranných spínačů normálně spojuje turbínu se sériově připojeným kabelovým řetězcem.

### 3.1.5. Montáž

Montážní činnosti jsou obvykle založeny ve stavebním přístavu. Stavební přístav slouží k dokončení montáže a přípravy větrných turbín před instalací. Stavební přístav potřebuje:

- dobrý přístup na silnici,
- 20 hektarů (ha) rozložené plochy a
- až 200 m nábřeží se silou zatížení  $10 \text{ t.m}^{-2}$



Zakládání základů je prováděno buď zvedacími loděmi, které se také používají později pro instalaci turbíny nebo plovoucími loděmi těžkého zvedání s dynamickými polohovacími systémy. Všechny základny, ale především monopily instalované v písečných podmínkách, mohou trpět znečištěním. Vykládání kamenů snižuje riziko, ale stále se hledají nová řešení.

Kabely mohou být položeny a zakryty v jediném procesu za použití kabelového pluhu nebo ve dvou fázích, v nichž první loď položí kabel a druhá loď zakryje položený kabel pomocí dálkově ovládaného vozidla. Kabel může být přepravován jako celek a rozřezán na velikost v každém místě nebo předřezán na pevnině. Na každém místě je kladen kabel před jeho vytažením do základny turbínové věže přes J-trubku namontovanou na základové desce. Plavidla s dynamickým umístěním se používají pro rychlou instalaci, minimalizují riziko poškození kabelu a podporují vtahování kabelu. časova narocnost polozeni zakryti a vtazrni kabelu je 24hKaždý kabel vyžaduje 24 hodiny, aby byl položen, zakryt a vtáhnout do základny stožáru.

Montáž turbíny má tři kroky:

- montáž věže, plně sestavené s vnitřními prvky,
- montáž gondoly a rozbočovače a
- montáž každé lopatky samostatně.

Použité lodě jsou zvedací lodě navržené speciálně pro využití větrné energie na moři. Obvykle mají 800 tunový jeřáb nebo větší a některé z nich jsou také použity pro montáž základů. Instalace turbíny je velmi citlivá na silné větry. Maximální rychlost větru, kterou mohou instalace pokračovat, je v současné době přibližně  $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (u gondoly).



Obrázek 11 – Montáž<sup>15</sup>

### 3.1.6. Provoz, údržba a servis

Provoz, údržba a servis pokrývají všechny činnosti od dokončení instalačních prací až po zahájení vyřazování z provozu.

Mezi klíčové činnosti patří řízení smluv, řízení provozu, pobřežní zařízení, plánovaná údržba větrných turbín a neplánovaná údržba a offshore logistika.

Řízení provozu zahrnuje každodenní řízení pracovních postupů a využívání systémů k ukládání a analýze získaných dat a dalších monitorovacích podmínek a údajů o lokalitách, a to jak k účinnému reagování na selhání po jejich vzniku, tak pokud je to možné k identifikaci potenciálních poruch dříve, než k nim dojde.

---

<sup>15</sup> Montáž offshore turbíny [online]. Dostupné z: <https://www.windpowerengineering.com/business-news-projects/global-market-value-offshore-wind-installation-vessels-2-93-billion-2020-says-globaldata/>





Pro místa, která jsou méně než 50 km (asi dvě hodiny po tranzitu) z vhodného přístavu, má větrná farma operační bázi na přístavišti nebo v její blízkosti. U větrné farmy o výkonu 500 MW báze typicky podporuje provoz tří nebo více osobních přenosových plavidel a tým z asi 45 techniků, kteří jsou na moři. Tam je také onshore tým podpory z asi 15 lidí včetně managementu. Báze má obvykle kontrolní místnost, obchody a zdravotní a sociální zařízení.

Plánovaná údržba turbíny zahrnuje plánovanou návštěvu turbíny každých šest měsíců nebo jednou za rok. Během těchto návštěv technici provádějí plán údržby definovaný výrobcem turbíny. Mezi činnosti patří kontrola hladiny oleje a mastnoty, výměna filtrů a kontrola kalibrací přístrojů.

## 3.2. Technologie v budoucnosti

### 3.2.1. Rozvoj větrné farmy

Pracuje se na vývoji prognóz hybridních větrných zdrojů pomocí satelitů, jiných dálkových snímání a další sady historických naměřených dat, která doplňují měření. Statistické výpočty, pomocí kterých lze určit minulé situace s vysokou pravděpodobností (hindcast), modelují data ve vysokém rozlišení a ověřená měření v místech mimo potenciální sílu větrné farmy umožňují spolehlivější odhady produkce v rané fázi.

Takové inovace snižují náklady na vývoj větrných elektráren a financování, otevírají trh s projekty v hluboké vody, snižují dopad na životní prostředí tím, že se vyhýbají hromadění a snižují zdravotní a bezpečnostní rizika tím, že se vyhýbají offshore těžké vleky.

### 3.2.2. Turbína

Současně se vyvíjí několik významných inovací:

- zavádění přímých pohonů a středně rychlých pohonů,
- zavádění trvale proměnné převodovky a
- zavádění supravodivých generátorů.



Přímé a středně rychlé pohony mají potenciál zvýšit spolehlivost snížením počtu kritických součástí. Zmenšením potřeby na údržbu turbín se zvyšuje zdraví a bezpečnost.

Trvale proměnná převodovka zahrnuje hydraulické nebo mechanické zařízení, které poskytuje proměnný poměr vstupní k výstupní rychlosti mezi rotorem a synchronním generátorem. Tato inovace odstraňuje potřebu měniče výkonu, protože regulace otáček a generátoru je zajištěna variabilním převodovým zařízením.

Supravodivý generátor by nahradil tradiční měděné vinutí vodiči s nulovým elektrickým odporem, když by byl chlazen pod kritickou teplotou. Technický pokrok v posledních letech zvýšil kritickou teplotu drátu na více než 77 Kelvinů, takže chlazení lze dosáhnout tekutým dusíkem. Předpokládá se další inovace účinnosti chladicí soustavy a její izolace.

Dále byly vyvinuty dva nové typy turbín – downwind turbíny – turbíny fungující ve směru větru a dvoulopatkové turbíny.

Downwind větrné turbíny nevyžadují tolik tuhé lopatky jako turbíny fungující proti větru, kvůli sníženým problémům s věží, což snižuje náklady na výrobu větších rotorů. Takové turbíny se mohou také lépe hodit pro oblasti s tajfuny, kde je při použití konvenční turbíny větší pravděpodobnost škody kvůli silném větru.

Dvoulopatkové turbíny nabízejí nižší náklady na energii tím, že snižují náklady na materiál bez proporcionálního snížení energie. Překážkou jejich využití na pevnině byla zvýšená hlučnost kvůli rychlejšími špičkovými rychlostmi, ale tento problém je méně relevantní offshore.

Tyto nové konfigurace turbín mají potenciál být komercializovány na počátku roku 2020.

### 3.2.3. Základy

Analýza průmyslu na počátku desetiletí předpovídala, že monopily nejsou konkurenceschopné ve srovnání s jacket konstrukcemi ve vodách hlubších než 25 metrů při použití turbíny o jmenovitém výkonu 5 MW nebo více. Od té doby však dochází k silným inovacím v oblasti projektování, výrobních procesů a montážních nástrojů, takže monopily



se nyní očekávají, že zůstanou nákladově konkurenceschopné u větších turbín ve hloubkách vody přesahujících 35 m.

Vzhledem k tomu, že jacket konstrukce se běžně používají pro projekty v hlubších vodách a s většími turbínami, existuje větší prostor pro radikálnější zlepšení konstrukcí. Například, je pravděpodobné, že trend bude směřovat k použití třínohých, nikoli čtyřnohých návrhů.

#### 3.2.4. Elektrické propojení

Vzhledem k tomu, že průmysl se pohybuje směrem k turbínám s vyššími výkonovými nároky, je nutnost začít používat kabely s vyšší kapacitou, aby se minimalizovala celková délka kabelu a počet potřebných rozvodů. Například je možné umístit pouze 40 MW (nebo pět turbín s výkonem 8 MW) na 33 kV měděný kabel o průřezu 630 mm<sup>2</sup>, přičemž je možné tuto hodnotu zvýšit na 80 MW (deset turbín o výkonu 8 MW) při použití kabelu který může vést napětí 66 kV stejné velikostí. Zavedení kabelů s vyšším provozním napětím znamená, že kapacita může být zvýšena a elektrické ztráty mohou být sníženy, což vede k nižším nákladům na energii.

#### 3.2.5. Montáž

Offshore turbínové výtahy jsou velmi citlivé na rychlost větru, což omezuje meteorologické okno pro instalace na moři. Inovace používají buď třmen nebo jeřábový hák pro stabilizaci lopatek během instalace. Technologie mají za cíl zvýšit maximální rychlost větru při zvedání větru od přibližně 11 m.s<sup>-1</sup> do přibližně 16 m.s<sup>-1</sup>. Zlepšení o více než 16 m.s<sup>-1</sup> jsou nepravděpodobné, protože by mohly být nebezpečné provozní podmínky paluby.

Několik offshore instalačních operací může být eliminováno montáží a předběžnými uvedením větrných turbín do přístavu a instalace kompletní integrované turbíny (včetně rotoru a věže) v jednom provozu na moři. V tomto případě je základna předem nainstalována.

#### 3.2.6. Provoz, údržba a servis

Vylepšení předpovědi počasí zvyšují efektivní využití personálu a plavidel a snižují ztrátu ztracené energie tím, že maximalizují účinnost. To vyžaduje pokroky v přesnosti a



podrobnosti prognóz. V současné době přesnost výrazně klesá u prognóz za pět dní dopředu pro plochu přibližně 100 km<sup>2</sup>. Aby bylo možné co nejúčinněji využívat zdroje a zejména těžká zařízení, jako jsou zvedací lodě, je třeba přiměřenou přesnost prodloužit na 21 dní. Vylepšení předpovědi a analýzy počasí může snížit náklady na energii tím, že umožní lepší plánování plánů údržby, což vede k menšímu prostoju, a tím k větší produkci energie a efektivnějšímu využití plavidel a personálu.



## 4. Ekonomické vyhodnocení

Vítr na moři je jednou z nejslibnějších a nejpříznivějších technologií produkujících energii na světě. Kritici však nadále upozorňují na vyšší náklady v porovnání s běžnějšími zdroji energie.

Ve srovnání s pobřežními větrnými projekty mají větrné elektrárny na moři výrazně vyšší delší dobu stavby. Plánování pro pobřežní větrné elektrárny je složitější a konstrukce ještě více, čímž se zvyšují celkové instalované náklady. Vzhledem k jejich offshore poloze mají také vyšší náklady na připojení k síti a výstavbu. Projektové náklady na pobřežní větrné projekty vzrostly v období kolem roku 2012 - 13, protože projekty byly umístěny dále od pobřeží a využívaly pokročilejší technologie.

Čtyři hlavní kategorie nákladů řídí celkové instalované náklady na projekt větrné elektrárny:

- Cena turbíny: Rotorové lopatky, převodovka, generátor, gondola, převodník, transformátor a věž.
- Stavební práce na přípravě pozemku a základy věží
- Připojení k síti: zahrnuje transformátory a rozvodny a připojení k místní distribuční nebo přenosové síti.
- Další náklady, jako jsou plánování a náklady na projekt, povolení atd.

Typ nákladu	Onshore (%)	Offshore (%)
Turbína	64-84	30-50
Připojení k síti	9-14	15-30
Konstrukce	4-10	15-25
Ostatní náklady	4-10	8-30

Tabulka 3 - Náklady offshore větrného projektu<sup>16</sup>

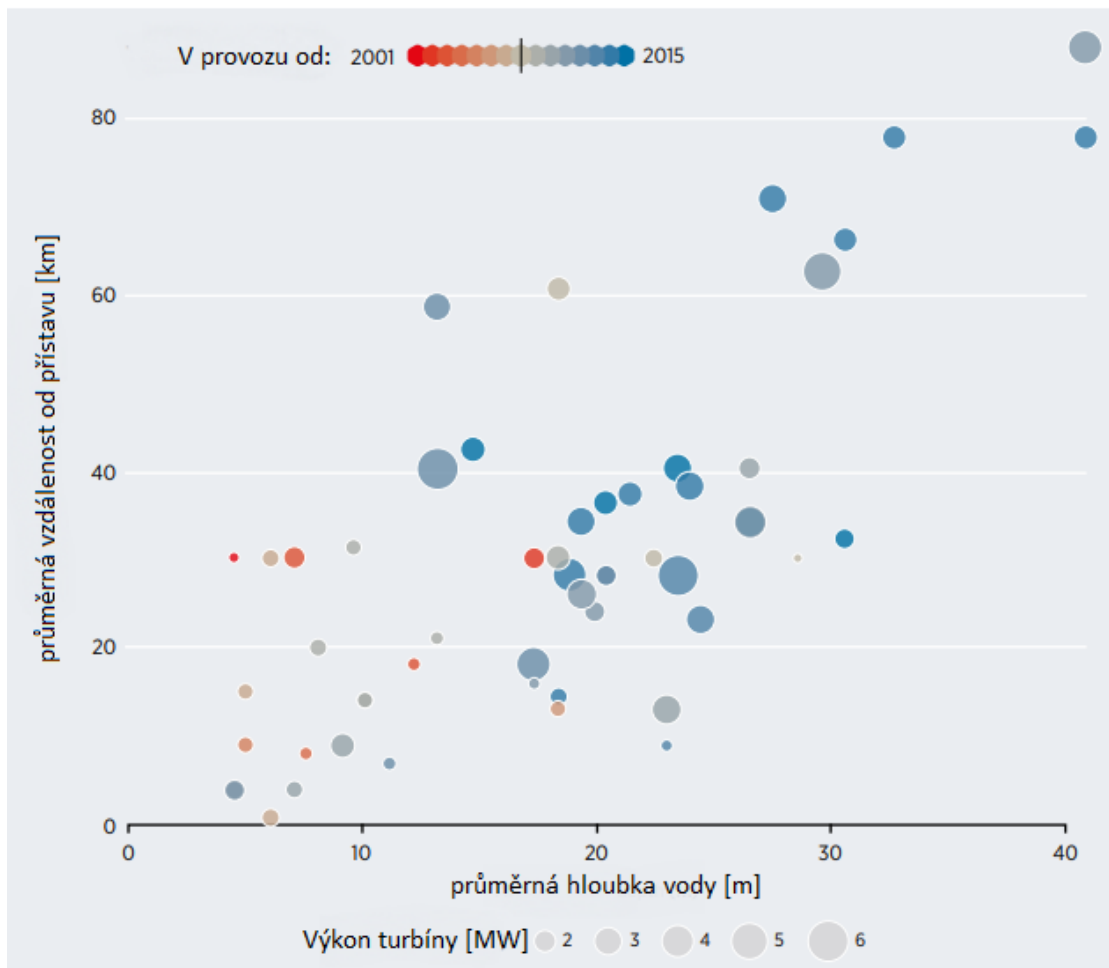
<sup>16</sup> IRENA. *Innovation Outlook: Offshore Wind* [online]. Dostupné z: <http://www.irena.org/publications/2016/Oct/Innovation-Outlook-Offshore-Wind>



Větrné turbíny pro offshore větrné projekty představují někde mezi 30 % a 50 % celkových instalovaných nákladů, zatímco u onshore větrných projektů mohou tyto náklady dosáhnout až 84 %. Základy jsou také významnou součástí celkových instalovaných nákladů. Konkrétní umístění offshore větrných projektů může také výrazně zvýšit náklady na stavbu, stejně jako připojení k síti kvůli nákladům na rozmístění podmorských kabelů a další práci z přístavu na instalaci. Zvýšené náklady na ochranu zařízení a instalaci v drsném mořském prostředí také zvyšují konečné náklady. Provozní náklady a náklady na údržbu jsou vyšší pro větrné elektrárny na moři než pro onshore větrné elektrárny z důvodu složitosti obsluhy větrných turbín na moři a náročnějšího prostředí na moři. Přesto v průměru offshore větrné projekty sklízí více energie než onshore větrné projekty, zejména v Evropě, kvůli dostupnosti lepších větrných zdrojů, méně turbulencí a stálých větrů.

Vzhledem k tomu, že průmysl po roce 2000 vyzpěl, projekty se přesunuly do hlubší vody a dál od pobřeží. Od roku 2009 je většina projektů umístěna ve hloubce vody větší než 15 metrů a ve vzdálenosti 20 - 80 km od nejbližšího přístavu. Průměrný výkon offshore větrných elektráren v Evropě v roce 2016 činil 380 MW, zatímco průměrná hloubka vody dokončených nebo částečně dokončených větrných elektráren činí 29 metrů, průměrná vzdálenost k nejbližšímu přístavu 44 km. Vývojáři také začali používat větší turbíny s většími rotory. Ty byly speciálně navrženy výrobcem pro offshore trh a drsné mořské prostředí, ve kterém pracují. Důvodem tohoto trendu, který směřuje k větším turbínám a delším čepelím určeným pro offshore operace bylo zvýšení kapacitních faktorů, jelikož vývojáři přistupovali k větším kvalitním větrným zdrojům dále od pobřeží.

Větší turbíny mohou také pomoci snížit náklady na instalaci a amortizovat náklady na vývoj projektu na větších větrných elektrárnách pro stejnou fyzickou oblast. Snížení nákladů bylo umožněno, protože průmysl stále více standardizoval nové větrné elektrárny a industrializoval výrobní proces. Instalační metody a lodní konstrukce na moři se také staly sofistikovanějšími a efektivnějšími, což snižuje čas a tím i náklady na instalaci.



Obrázek 12 - Hloubka vody a vzdálenost od přístavu v závislosti na roku stavby<sup>17</sup>

Od roku 2001-2010 byla většina větrných turbín pro offshore projekty v rozsahu 2-3,6 MW. Po roce 2011 došlo v důsledku technologických zlepšení k výraznému zvýšení rozsahu na 3,6-6,15 MW. Projekty se po roce 2011 také zvětšily, což vývojářům umožnilo prospěchovat z úspor z rozsahu a kompenzovat některé nárůsty nákladů souvisejících s lokalizací projektů v hlubších vodách. Průměrná velikost evropské pobřežní větrné elektrárny byla v roce 2011 mírně pod 200 MW, zatímco v roce 2016 se zvýšila na 380 MW, což představuje 90% nárůst za celé období. Tento trend vedl k větším úsporám z rozsahu, konkurenceschopnějším dodavatelským řetězcům a výhodám v oblasti provozu a údržby.

<sup>17</sup> Hloubka vody a vzdálenost od přístavu v závislosti na roku stavby [online]. Dostupné z: <http://www.irena.org/publications/2016/Oct/Innovation-Outlook-Offshore-Wind>



Jedním z nejdůležitějších faktorů konkurenceschopnosti technologie je LCOE – Levelized Cost of Energy - sdružená cena energie. Jedná se o ekonomické posouzení průměrných celkových nákladů na budování a provozování aktiva generujícího energii po celou dobu jeho životnosti děleno celkovou energetickou produkcí aktiva během této životnosti.

Na základě LCOE výpočtů byla cena za kW elektřiny vyrobené větrnými turbínami na moři v roce 2016 ve výši 3758 €. Celkové instalované náklady na offshore větrné projekty vzrostly v období 2000 - 2010, kdy došlo k posunu směrem k hlubším vodám a místům vzdálenějším od přístavů. Předpokládá se, že turbínový rotor a gondola představují 38 % celkových instalovaných nákladů, výstavba a instalace 19 %, podpůrná struktura a základy 18 %, připojení k síti / přenos 13 %, turbínová věž 6 % a vývoj projektu a větrné elektrárny 6 %.<sup>18</sup> Tento podíl se však může lišit a je ovlivněn hloubkou vody, podmínkami na mořském dně, zatížením turbíny, hmotností rotoru a gondoly a rychlostí rotoru.

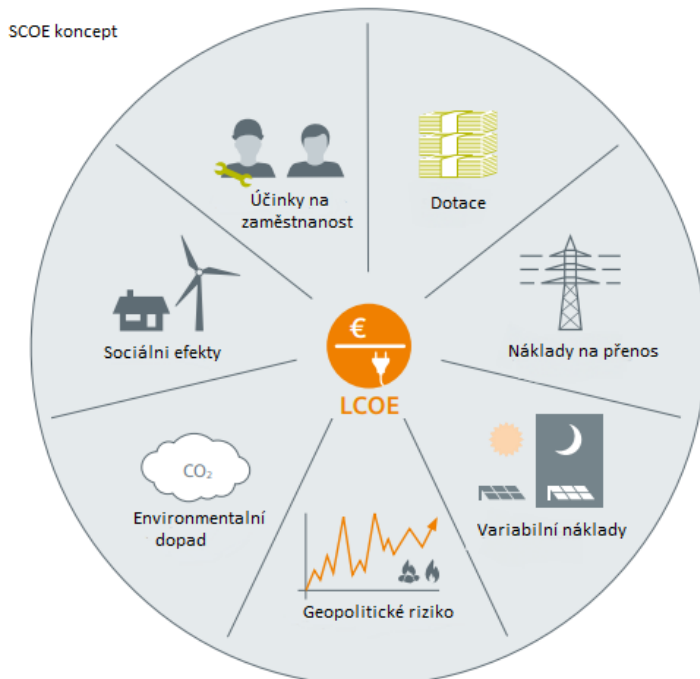
Je však standardní srovnání založené na LCOE správným měřítkem, pokud jde o rozhodování o správném mixu zdrojů energie? LCOE představuje pouze systémové náklady z hlediska předpokládané životnosti elektrárny. Vypočítává se jako poměr celoživotního součtu diskontovaných kapitálových a provozních nákladů, včetně paliva, vyděleného celoživotním součtem diskontované produkce elektřiny.

$$LCOE = \frac{\text{Celkové náklady během životnosti}}{\text{Elektřina vyrobená po celou dobu životnosti}} \quad [€ \cdot MWh^{-1}; €; MWh^{-1}] \quad (2)$$

---

<sup>18</sup> IRENA. *Innovation Outlook: Offshore Wind* [online]. Dostupné z: <http://www.irena.org/publications/2016/Oct/Innovation-Outlook-Offshore-Wind>





Obrázek 13 - SCOE koncept<sup>19</sup>

Výpočet LCOE nezahrnuje celkové skutečné ekonomické náklady jednotlivých primárních zdrojů energie. Nicméně, abychom dospěli k lepšímu odhadu toho, které generační technologie těží naší společnosti nejvíce, je třeba zvážit mnoho dalších dodatečných faktorů. To je důvod, proč společnost Siemens vytvořila nový model výpočtu. Představuje skutečný poměr nákladů a přínosů jako makroekonomické měřítko – Society's Cost of Electricity (SCOE).

- Dotace - Subsidies

Když se hovoří o obnovitelných zdrojích energie, často se jedná o výzvu, aby se vyrostly a stály nezávislé na dotacích. Nicméně je často přehlíženo, že konvenční technologie také dostávají značné úrovně dotací, i když nejsou zahrnuty do výpočtu LCOE.

- Náklady na přenos - Transmission costs

Vzhledem k tomu, že se podíl obnovitelných zdrojů v energetickém mixu zvyšuje, sítě často potřebují být posíleny jak na úrovni přenosu, tak na úrovni distribuce, protože obnovitelné zdroje buď nejsou centrálně umístěny (fotovoltaika, biomasa, větrné elektrárny), nebo jsou vzdálené a instalovány na moři (offshore vítr). V případě offshore větru náklady na optimalizaci sítě činí přibližně 2,0 € / MWh, v případě onshore větru předpokládáme 2,0 € / MWh a pro fotovoltaiku 6,6 € / MWh.

<sup>19</sup> SCOE koncept [online]. Dostupné z: <https://www.energy.siemens.com/br/pool/hq/power-generation/renewables/wind-power/SCOE/Infoblatt-what-is-the-real-cost-of-offshore.pdf>



- Variabilní náklady - Variability costs

Vzhledem k tomu, že v průmyslovém měřítku nejsou k dispozici rozsáhlé skladovací technologie, musí být variabilita větrných elektráren kompenzována pomocí regulovaných konvenčních elektráren. To přináší dodatečné náklady na obnovitelné zdroje energie v řádu 13-15 € / MWh.

- Geopolitické riziko - Geopolitical risk impact

Větrná energie je nevyčerpatelný zdroj obnovitelné energie k dispozici zdarma. Je ideální pro snížení závislosti na dovozu ropy a zemního plynu a rizika budoucího růstu cen paliva. Abychom odhadli geopolitické náklady konvenčních energetických zdrojů, použili jsme cenu, která je nutná k zaplacení za zajištění ceny fosilních paliv po dobu pouze dvou let. Ve Velké Británii je nákladový efekt uhlí 1,7 € / MWh; pro plyn je 5,4 € / MWh.

Jedná se o konzervativní odhad při pohledu na obvyklou životnost fosilních elektráren více než 30 let.

- Environmentální dopad - Environmental impact

Emisní povolenky jsou zahrnuty do LCOE, avšak při ceně CO<sub>2</sub>, která je značně nižší než 10 EUR / tun, tato úroveň nepředstavuje přiměřené odhalení okamžitých a dlouhodobých negativních dopadů emisí skleníkových plynů. Předpokládaná cena je 81 EUR.t<sub>co2</sub>, jelikož se jedná o celoživotní hodnotu CO<sub>2</sub> pro zahájení provozu elektrárny v roce 2025, danou cenou uhlíku. V případě uhelných elektráren to například přináší dodatečné náklady na poškození skleníkových plynů ve výši 45 €.MWh.

- Sociální efekty - Social effects

Sociální dopady jsou dopady na hodnotu nemovitostí v blízkosti elektráren. Jedná se poměrně mírně pro všechny technologie a činí například 5 € / MWh pro onshore větrné elektrárny.

- Účinky na zaměstnanost - Employment effects

Větrná energie na moři má větší potenciál vytvořit místní zaměstnanost a pozitivní dopad na HDP než všechny ostatní zdroje energie. Podle nejnovější zprávy o strategii průmyslových větrných elektráren vydaných britskou vládou a průmyslem může pobřežní odvětví vytvořit



do roku 2020 30 000 pracovních míst a do roku 2020 přispěje více než 8 miliardami eur do ekonomiky samotného Spojeného království.<sup>20</sup> Hodnota ekonomického dopadu se pohybuje od 21 € / MWh pro plyn až 71 € / MWh pro větrné elektrárny. To jsou hrubé účinky; účtujeme pouze kladný rozdíl na nejnižší hodnotu (tj. proti 21 EUR / MWh).

Použití nástroje SCOE (Societal Cost of Energy - společenské náklady na energii) nám umožňuje poprvé porovnat různé technologie na základě skutečných faktorů a výhod sociálního dopadu. Náklady na větrnou energii obecně, zvláště na offshore větrné turbíny, se značně snižují od jednoduššího výpočtu, který představuje LCOE.

Na základě SCOE by měl být vítr na moři hlavním pilířem dodávek energie zítřka. Vytváří čistou a klimaticky přívětivou elektřinu, vytváří pracovní místa a snižuje rizika na několika úrovních. Práce související s instalací a dlouhodobou údržbou větrných turbín mohou být lokalizovány. Budou vytvořeny další pracovní pozice pro větrné elektrárny na moři v montážních a nalodovacích přístavech turbíny. Tyto pracovní místa přinesou významný hospodářský dopad regionům s dodatečnou místní spotřebou zboží a služeb.

---

<sup>20</sup> Offshore Wind Industrial Strategy Summary: Business and Government Action [online]. Dostupné z: [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/226457/bis-13-1092ES-offshore-wind-industrial-strategy-summary.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/226457/bis-13-1092ES-offshore-wind-industrial-strategy-summary.pdf)



## 5. Ekologické vyhodnocení

### 5.1. Vizuální dopad

Offshore větrné elektrárny mají obvykle větší turbíny než onshore větrné farmy. Vizuální dopad je ale menší díky vzdálenosti od pobřeží. Avšak jejich dopad není zanedbatelný, protože mořské prostory mají jedinečný vzhled a žádné rušení tohoto vzhledu není žádoucí. Dopady offshore větrných elektráren mohou ovlivnit tři složky moře:

- mořské oblasti,
- pobřeží,
- pozemky.

Prvky, které ovlivňují vizuální dopad větrných elektráren na moři, jsou:

- umístění a velikost oblasti větrné elektrárny,
- velikost, materiál a barva větrné turbíny,
- uspořádání a vzdálenost mezi větrnými turbínami a přidruženými konstrukcemi,
- poloha, rozměry a tvar pomocných pozemních (rozvodny, nadzemní vedení) a mořských zařízení (rozvodny a anemometrické stožáry),
- značení a osvětlení,
- lodě pro přepravu a údržbu,
- navrhovaný přístup na silnice a přístup k požadavkům na pobřeží.

Stejně jako pro větrné elektrárny na pozemku, existují fotografické a video nástroje používané k předpovědi potenciálních dopadů offshore větrných elektráren na životní prostředí. Potenciální viditelnost větrných elektráren na moři závisí na topografii, vegetaci a strukturách postavených v dané krajině. Dopad zakřivení země a světelné podmínky jsou



relevantní pro viditelnost větrných elektráren na moři. Deštivé a zamračené dny způsobují špatnou viditelnost.



Obrázek 14 - Offshore větrná farma<sup>21</sup>

Skutečný dopad na vizuální identitu oblasti závisí na několika parametrech, jako je poloha, velikost a počet turbín, povětrnostní podmínky a osvětlení turbíny. Vzdálenost mezi divákem a větrnou farmou má největší vliv na vizuální vnímání, ale také významnou roli hrají změny ve světle a počasí.

## 5.2. Hluk

Větrné elektrárny na moři jsou daleko od lidské populace, takže lidé nejsou ovlivňováni hlukem generovaným větrnými turbínami. Ovšem mořské živočichy mohou být vystaveny vlivu hluku při stavbě a práci větrných turbín. Každý efekt hluku bude záviset na citlivosti jednotlivých druhů a jejich schopnosti přizpůsobit se. Měření hluku větrnými elektrárnami na moři by mělo zahrnovat následující:

- parametry větrné turbíny, jmenovitý výkon, průměr rotoru atd.;
- typ nadace, materiál atd.;

<sup>21</sup> Offshore větrná farma [online]. Dostupné z: <https://www.energy.siemens.com/br/pool/hq/power-generation/renewables/wind-power/SCOE/Infoblatt-what-is-the-real-cost-of-offshore.pdf>



- doba výstavby;
- hloubku moře v místě větrné elektrárny.

### 5.2.1. Hluk v průběhu výstavby

Hluk v průběhu stavby pochází ze strojů, nástrojů, výbuchů a jiných příčin. Podle některých výzkumů, nejvyšší hladina hluku se dosáhne při konstrukci základu a může dosahovat až 300 dB. Taková vysoká hladina hluku může způsobit trvalé nebo dočasné poškození zvířat které jsou v blízkosti stavby. Neexistuje však dostatek vědeckých znalostí k určení maximálních přípustných prahových hodnot pro určité účinky. Proto je zapotřebí úzké spolupráce mezi fyziky, biologi a inženýry, aby byly získány příslušné informace a byl standardizován postupech měření vlivu hluku offshore větrných elektráren.

Měření prováděná ve větrné elektrárně North Hoyle ve Velké Británii ukázala, že:

- Maximální hluk způsobený použitím nástrojů v hloubce 5 metrů byl 260 dB a ve hloubce 10 metrů 262 dB;
- Nedošlo k žádnému zvláštnímu šíření hluku v určitém směru;
- Dopad na chování mořských savců a ryb byl také cítit několik kilometrů od turbíny.

Hluk má jistě vliv na chování mořských živočichů, což vede k tomu, že zvířata se vyhýbají stavebnímu prostoru.

Možné účinky na mořský život závisí na citlivosti druhů zvířat přítomných v oblasti výstavby a tento dopad je v konečné fázi výstavby nižší, když se sníží hluk.

Opatření ke zmírnění nepříznivých účinků:

- přizpůsobení fáze výstavby tak, aby se hlučnost postupně zvyšovala;
- použití tzv. zvukové závěsy kolem stožáru, aby se hluk snížil o 10-20 dB;



- použití plastového materiálu, kde je to možné, aby se dosáhla zvuková izolace, čímž se sníží emise hluku o 5 až 25 dB;
- použití akustických přístrojů, které vydávají zvuky, které udržují savce dostatečně daleko od místa stavby;

### 5.2.2. Hluk během práce

Ve stadiu práce jsou zvukové signály generované v generátoru přenášeny stěnou stožáru, což vede k šíření zvuku pod vodou. Měření vzdušného hluku emitovaného z větrných turbín a transformátorů málo přispívá k hladině hluku pod vodou. Úroveň podvodního hluku z větrné turbíny není vyšší než úroveň okolního hluku v oblasti nad 1kHz, ale je v oblasti nad 1kHz vyšší. Hluk může ovlivnit faunu, ryby a mořské savce poblíž větrné turbíny.

Hluk z jednotlivých turbín s maximálním jmenovitým výkonem 1,5MW byl měřen v Utgrudenu ve Švédsku při vzdálenosti 110 metrů. Při mírných rychlostech větru 12 m/s byl naměřený hluk v rozmezí 90-115 dB.

Hluk při práci může mít důsledky pro mořský život, jako například:

- vyhýbání oblasti;
- panika;
- hlasitější komunikace.

Výkazy o dopadu hluku na ryby ukázaly řadu účinků, od změn v chování až po významné fyziologické vlivy. Změny v chování mohou způsobit změny v oblasti, kde se ryby krmí nebo migrují. Studie vlivu hluku na bezobratlé a planktonické organismy mají obecný závěr, že vliv je velmi malý, pokud organismus není v blízkosti velmi silného zdroje hluku. Pomocí měření z jedné turbíny od 1500 kW, které provádělo německé spolkové ministerstvo životního prostředí, bylo zjištěno, že emise hluku během provozu zařízení nepoškozují sluchové systémy mořských živočichů.



### 5.3. Elektromagnetické pole a mořské organismy

Elektrická energie vyráběná větrnými turbínami na moři je přenášena kabely na dlouhé vzdálenosti. Generovaný proud vytváří magnetické pole. Studie mnoha účinků statických magnetických polí byly prováděny na různých typech a za různých experimentálních podmínek.

Elektromagnetické pole může interagovat s mořskými organismy a způsobit určité změny. U většiny druhů jsou však pozorovány pouze malé rozdíly v chování.

Magnetické pole může ovlivňovat měkkýši, kraby, ryby a mořské savce pomocí magnetického pole Země pro orientaci. Citlivé druhy mohou být přitahovány nebo odmítány elektrickými poli vytvářenými ponořenými kabely. Zvláštní pozornost je potřeba věnovat chovu a výživě mořských organismů.

Experimentální analýzy několika mořských organismů vystavených statickými magnetickými poli o hodnotě 3,7 MT během několika týdnů neprokázala žádný rozdíl v přežití mezi zkoumanými druhy ve srovnání s jinými druhy. Podobně, organismy, které žily pod vlivem statického magnetického pole po dobu tří měsíců během reprodukční doby, neprokázaly významné změny v chování. Závěrem je, že statické magnetické pole nemají žádný zvláštní vliv na orientaci, pohyb nebo fyziologii mořských druhů.

### 5.4. Vliv na mořský svět

#### 5.4.1. Vliv na bentos

Bentos zahrnuje rostlinné a živočišné organismy, které žijí na dně moře, jezera nebo hluboké řeky. Tato biocenóza je velmi složitá a skládá se z velkého počtu rostlin, zvířat a bakterií. Výstavbou základu turbíny se vytváří nový umělý základ, který pomáhá vytvářet nová stanoviště pro organismy. Nové struktury mohou přitahovat určité typy bentosu. Nejvíce ohrožené druhy nejsou pohyblivé (skořápky, houby) nebo málo pohyblivé druhy (hlemýžď, hvězda). V nové oblasti se také mohou objevit malé druhy ryb. Stavba offshore větrných





elektráren může změnit vztahy v bentosu, změnit existující biologickou rozmanitost v určité oblasti a vytvořit nový místní ekosystém.

Studie ukázaly, že nový tvar tvrdého dna (základy větrné turbíny) má vliv na zvýšení celkové biologické rozmanitosti v oblasti a přináší určitý pokrok bentosu. Tvrdé dno poskytuje stanoviště pro větší a mobilnější druhy. Instalace ocelových konstrukcí v mořských vodách také zvyšuje rozmanitost a ovlivňuje vývoj bentosu. Konstrukční fáze dočasně ovlivňuje zvýšení zákalu vody. Během tohoto období dojde k negativnímu vlivu na vegetaci kvůli sníženému příjmu světla. Tento dopad je však přechodný a nevede k trvalé ztrátě stanovišť.

#### 5.4.2. Vliv na ryby

Potenciální účinky offshore zařízení lze rozdělit na:

- zavádění nových umělých stanovišť;
- hluk;
- elektromagnetické pole

Konstrukční fáze poškozuje mnoho druhů ryb. Pohyby pod vodou, hluk a zvýšený zákal vody spojené s dobou výstavby však zmizí po stavbě větrné elektrárny. Bohatství ryb se bude zvyšovat kolem základny turbíny, jakmile skončí stavební fáze.

Nové umělé stanoviště vytvořené výstavbou větrných elektráren mají malý dopad na ryby. Rozmanitost druhů je přibližná uvnitř i vně oblasti větrných turbín. Pozitivní vliv offshore větrných farem na moři je jistě zákaz rybolovu v oblasti větrné elektrárny.

Nízká hlučnost slyší mnoho druhů ryb. Frekvence, intenzita a trvání hluku určují stupeň rušení. Studie ukázaly, že některé druhy ryb mohou identifikovat větrné farmy ve vzdálenosti 0,4 až 25 km. Detekční vzdálenost závisí na velikosti a počtu větrných turbín, organech sluchu a hloubce vody. Ryby produkují různé komunikační zvuky, které mohou být rušeny hlukem turbíny. Neexistují žádné významné ukazatele, které by naznačovaly poškození sluchu u ryb, a to i na vzdálenost několika metrů. Hluk ovlivňuje hlavně komunikační a orientační signály, ale nepoškozuje sluchové orgány.



Nakonec jsou účinky hluku a vibrací větrné farmy na ryby zanedbatelné. Dosud provedené studie však nejsou konečné. Offshore trh se rozšiřuje a se zvyšující se kapacitou lze očekávat ještě přesnější analýzy dopadu offshore větrných farem na ryby a jiné mořské organismy. Údržba větrných elektráren vyžaduje prakticky každodenní činnost na lodích, které se pohybují kolem větrných turbín, a výsledný hluk je větší než hluk generovaný prací větrné turbíny.

### 5.4.3. Vliv na mořské ptáky

Analýza dopadu offshore větrných elektráren na mořské ptáky je velmi složitá. Pro kvalitní analýzu je třeba shromáždit informace o reakcích zamezení, energetických důsledcích modifikace stanovišť a demografické citlivosti klíčových druhů.

Srážky mají velký vliv na populaci ptáků. Srážky u různých druhů ptáků se pohybují od 0,01 do 1,2 ptáků na turbínu. Výzkum ukázal, že srážky s rotory jsou vzácnými událostmi pro většinu offshore větrných elektráren. V podmínkách špatné viditelnosti by se velké množství ptáků z pevniny mohlo srazit s loděmi na moři, protože je přitahuje jejich osvětlení. Jedním z nejužitečnějších opatření ke zmenšení srážek je nahrazení nepřetržitého světla přerušovaným světlem.

Účinky offshore větrných elektráren na ptáky jsou větší než účinky onshore větrných elektráren. Důvod by se měl hledat ve výšce stožáru větrné turbíny, která je větší než u onshore turbín. Kromě toho jsou offshore větrné elektrárny větší a mořské druhy ptáků jsou také větší než pozemní a jsou také citlivější.

Dlouhodobý výzkum některých větrných farem na moři však ukázal na populaci ptáků téměř zanedbatelný vliv. Většina ptáků se úspěšně vyhnula větrným farmám. Asi 80 % hejna ptáků se vyhnulo létání u turbíny. Změny směrů letu byly pozorovány při vzdálenosti 0,5 km od větrné turbíny v noci a při 1,5 km za den.

V posledních letech byly vyvinuty určité metodiky pro posouzení rizika kolize. Nové nálezy mají velký význam pro správné posouzení a předvídání budoucích dopadů navrhovaných větrných elektráren. Nejmodernější technologie jsou radary a infračervené kamery. Nové



technologie a nové analýzy jsou samozřejmě také potřebné k dosažení účinných opatření ke snížení úmrtnosti mořských ptáků

## 5.5 Kolizí lodí

Srážky lodí s turbínami jsou jedním z možných rizik souvisejících s offshore větrnými farmami. Kolize se stožárem větrné turbíny by mohla způsobit poškození nebo zničení lodi. Potenciální environmentální rizika zahrnují uniky ropy nebo chemických látek z lodí do moře.

Vyhodnocení několika kolizních scénářů mezi třemi různými typy základů s různými typy lodí bylo provedeno na několika místech Severního moře a Baltského moře. Výsledky ukázaly, že riziko kolize může být sníženo, ale nikdy ho nelze zcela vyhnout.

Existuje několik bezpečnostních přístupů ke snížení potenciálního rizika:

- navigační a řídicí systémy, jako jsou radary a lodě optimalizované pro přežití kolizí;
- zákaz plavby v oblasti větrné elektrárny pro určité typy lodí;
- zavedení systému řízení provozu;
- dozor větrné elektrárny;
- dostupnost nouzového plavidla;
- školení posádky.

## 5.6. Radary a rádiové signály

Větrné turbíny mohou ovlivnit civilní i vojenskou leteckou dopravu, kvůli dopadu na radary, které spravují provoz letadel. Radar je systém pro detekci přítomnosti nebo polohy a pohybu objektů vysíláním rádiových vln, které se odrážejí na přijímači. Rádiová vlna přenášená



radarem může být přerušena objektem a část energie je vrácena do rádiového přijímače umístěného vedle vysílače.

Větrné turbíny jsou vertikální konstrukce, které mohou potenciálně ovlivnit určité elektromagnetické přenosy. Mobilní konstrukce, jako jsou mobilní lopatky, mohou způsobit větší narušení radarů než nepohyblivé části. Účinky jsou závislé na typu radaru, specifika větrné elektrárny a rozmístění větrných turbín. Instalace větrné turbíny má negativní dopad na leteckou dopravu. Systémy řízené radarem jsou řízení letového provozu, vojenská vzdušná obrana a meteorologické radary.



## Závěr

Nepochybně je elektřina jednou ze základních potřeb člověka a jako taková vyžaduje výrobu bez ohledu na cenu a špatný dopad na životní prostředí. Nicméně s rozvojem nových technologií existuje možnost zvolit, jak a jakým způsobem uspokojovat stále rostoucí požadavky na výrobu elektřiny. Přestože se fosilní paliva v minulosti stály nepostradatelným zdrojem elektrické energie, dnešní situace se výrazně liší. Samozřejmě, že fosilní paliva nemohou být okamžitě vyřazena z palivového mixu, je dříve nebo později nutný postupný přechod od konvenčních zdrojů k obnovitelným zdrojům energie.

Větrná energie je určitě jedním z nejslibnějších obnovitelných zdrojů energie. Průmysl, který se zabývá větrem na moři je v současnosti jedním z nejrychleji se rozvíjejících průmyslových odvětví a můžeme si být téměř jisti, že offshore vítr se stane jedním z nejčastěji používaných zdrojů energie.

Vzhledem k tomu, že tato průmyslová odvětví jsou stále relativně nová, můžeme očekávat mnoho zlepšení během dalších let. V současné době je hlavním problémem dlouhá doba plánování a stavby větrné turbíny v moři, stejně jako větší investiční náklady, které se v nadcházejících letech pravděpodobně sníží.

Pokud jde o ekonomické hledisko, je pravda, že investiční výdaje jsou vyšší než u větrných turbín na pevnině, ale větrné elektrárny na moři umožňují lepší využívání větrné energie, protože v proudění vzduchu na moři nejsou žádné překážky, jako například budovy.

Offshore větrné turbíny nemají žádný významný nepříznivý vliv na životní prostředí, především protože pobřežní větrné elektrárny fungují izolovaně, takže hluk, který produkují, neovlivňuje nikoho. Pokud jde o organismy, které žijí v moři, průzkumy ukázaly, že se snadno přizpůsobují turbínám offshore větrných elektráren.



## Použitá literatura

- [1] MANWELL, James, McGOWAN, Jon a Anthony ROGERS. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application second edition. Washington, USA: John Wiley & Sons Ltd, 2009. ISBN 978-0-470-01500-1
- [2] HEMAMI, Ahmad. Wind Turbine Technology. New York, USA: Cengage Learning, 2010. ISBN 978-1-4354-8646-1
- [3] SHIELDS, Craig. Renewable Energy? Facts and Fantasies. USA: Clean Energy Press, 2010. ISBN: 0615388353
- [4] MASTERS, Gilbert. Renewable and Efficient Electric Power Systems. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2004. ISBN 0-471-28060-7
- [5] IRENA - International Renewable Energy Agency. Innovation Outlook: Off shore Wind. Abu Dhabi, 2016. ISBN 978-92-95111-36-3
- [6] BP Statistical Review of World Energy, 2017 [online]. Dostupné z: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>
- [7] První větrný rotor [online]. Dostupné z: <http://wiki.eanswers.net/hr/Vjetroelektrana>
- [8] První elektrárny [online]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/13452-vetrne-elektrarny-i-historie-do-roku-1975>
- [9] Celkový instalovaný výkon 2012-2016 [online]. Dostupné z: <http://www.wwindea.org/category/statistics/>
- [10] Anemometr [online]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Anemometer>
- [11] Největší offshore větrné farmy [online]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Offshore\\_wind\\_power](https://en.wikipedia.org/wiki/Offshore_wind_power)
- [12] Průkopníci offshore projektů. A Quantitative Comparison of Three Floating Wind Turbines [online]. Dostupné z: [https://www.sintef.no/globalassets/project/nowitech/wind\\_presentations/jonkman-j-nrel.pdf](https://www.sintef.no/globalassets/project/nowitech/wind_presentations/jonkman-j-nrel.pdf)
- [13] WINDEUROPE. Wind in power 2017 [online]. Dostupné z: <https://windeurope.org/about-wind/statistics/european/wind-in-power-2017/>
- [14] Příklad offshore větrné turbíny [online]. Dostupné z: <https://www.americangeosciences.org/critical-issues/faq/what-are-advantages-and-disadvantages-offshore-wind-farms>



- [15] Výroba lopatek offshore větrné turbíny [online]. Dostupné z: [https://www.siemens.co.uk/en/news\\_press/index/news\\_archive/2014/major-uk-offshore-wind-manufacturing-site-to-be-built-by-siemens.htm](https://www.siemens.co.uk/en/news_press/index/news_archive/2014/major-uk-offshore-wind-manufacturing-site-to-be-built-by-siemens.htm)
- [16] Typy základních fundamentů [online]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/15249-vetrne-elektrarny-viii-morske-offshore-vetrne-elektrarny>
- [17] Montáž offshore turbíny [online]. Dostupné z: <https://www.windpowerengineering.com/business-news-projects/global-market-value-offshore-wind-installation-vessels-2-93-billion-2020-says-globaldata/>
- [18] SCOE koncept [online]. Dostupné z: <https://www.energy.siemens.com/br/pool/hq/power-generation/renewables/wind-power/SCOE/Infoblatt-what-is-the-real-cost-of-offshore.pdf>
- [19] Offshore Wind Industrial Strategy Summary: Business and Government Action [online]. Dostupné z: [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/226457/bis-13-1092ES-offshore-wind-industrial-strategy-summary.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/226457/bis-13-1092ES-offshore-wind-industrial-strategy-summary.pdf)
- [20] Offshore větrná farma [online]. Dostupné z: <https://www.energy.siemens.com/br/pool/hq/power-generation/renewables/wind-power/SCOE/Infoblatt-what-is-the-real-cost-of-offshore.pdf>