

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

MALÉ VĚTRNÉ TURBÍNY V MĚSTSKÉM PROSTŘEDÍ

SMALL WIND TURBINES IN URBAN ENVIROMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Ondráček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Linda

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	David Ondráček
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Energetika, procesy a životní prostředí
Vedoucí práce:	Ing. Jakub Linda
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Malé větrné turbíny v městském prostředí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Náplní práce bude rešeršní zpracování problematiky malých větrných turbín instalovaných v městském prostředí. Zpracování práce bude klást důraz na možné typy turbín, jejich charakteristiky, odlišnosti a efektivitu při proudění ve městě, které má své specifické vlastnosti. V rámci práce se také dohledají možné metody zvýšení efektivity těchto turbín. Práce se rovněž zaměří na zpracování zkušeností z dohledání konkrétních instalací. Důraz při vypracování bude také kladen na aktuální situaci poznatků v daném oboru. Na konci práce bude vzhledem ke konkrétnímu vybranému typu turbíny a místě instalace proveden předběžný výpočet její přínosů a vlastností ve srovnání s jinou technologií získávání energie z obnovitelných zdrojů.

Cíle bakalářské práce:

- (1) rešerše aktuálně dostupných malých větrných turbín a průzkum možností zvýšení jejich efektivity vzhledem k specifikacím proudění v zastavěném prostředí,
- (2) zpracování zkušeností a doporučení z konkrétních instalací malých větrných turbín v městském prostředí,
- (3) kalkulace přínosů zvoleného typu větrné turbíny pro konkrétní místo ve srovnání s jinou technologií získávání energie z obnovitelného zdroje.

Seznam doporučené literatury:

RYCHETNÍK, Václav, Jiří PAVELKA a Josef JANOUŠEK. Větrné motory a elektrárny. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01563-7.

LAXTON, Dali T. Innovations in the wind energy sector. Prague: CERGE-EI, 2019. Working paper series. ISBN 978-80-7343-454-0.

Větrné elektrárny v Jihomoravském kraji: sborník příspěvků z odborného semináře : 18. červen 2007, Brno. Brno: ZO ČSOP Veronica, 2007. ISBN 978-80-254-0148-4. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:ad6de420-2fd1-11e7-9efd-005056827e52>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce je zaměřena na problematiku použití menších větrných turbín v městském zastavěném prostředí. Začátek práce se věnuje základní teorii o větru, jeho vzniku a specifickém proudění vzduchu v zastavěném prostředí. Následně je v práci provedena rešerše aktuálně dostupných větrných turbín vhodných právě do městského zastavěného prostředí a s ohledem na specifické proudění vzduchu v tomto prostředí jsou navrženy možnosti na zvýšení efektivity těchto turbín. Další část práce rozebírá zkušenosti ze skutečných instalací. Závěrem práce jsou počítány energetické zisky generované vybranou turbínou a fotovoltaickými panely v dané lokalitě, zakončené porovnáním vhodnosti těchto dvou zdrojů obnovitelné energie.

Klíčová slova

Větrná turbína, městské prostředí, proudění vzduchu, energetické zisky

ABSTRACT

This thesis is focused on the problematics of smaller wind turbines usage in the urban environment. The beginning of the thesis deals with the basic theory of wind, its origin, and specifics of air flow in the urban environment. Furthermore, a search of currently available wind turbines suitable for the urban built environment is performed, and regarding the specific air flow in this environment, possibilities are proposed to increase the efficiency of these turbines. The next part of the thesis analyses the experience from real world applications. At the end of the thesis, the energy gains generated by the selected turbine and photovoltaic panels in given locality are calculated, ending with a comparison of the suitability of these two sources of renewable energy.

Key words

Wind turbine, urban environment, air flow, energy gains

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ONDRÁČEK, David. Malé větrné turbíny v městském prostředí. Brno, 2021. 48 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132001>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jakub Linda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Malé větrné turbíny v městském prostředí* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Jakubovi Lindovi, vedoucímu mé bakalářské práce, za velmi cenné rady a připomínky, které mi nejen pomáhaly při vypracování této práce, ale i vzbudily můj větší zájem o tuto problematiku. Dále bych chtěl poděkovat rodině a přátelům, kteří mi byli během studia vždy oporou.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Větrná energie.....	12
1.1 Vznik větru	12
1.2 Vlastnosti větru	12
1.2.1 Predikce rychlosti větru.....	13
1.3 Proudění vzduchu v městském prostředí	14
1.4 Výroba elektrické energie z větrné	15
1.4.1 Způsoby zapojení pro výrobu energie	16
Autonomní systém (Grid-off)	16
Systém spojený se sítí (Grid-on)	16
Hybridní systém	17
2 Větrné turbíny v městském prostředí.....	18
2.1 Odporové větrné turbíny	18
2.2 Vztlakové větrné turbíny	19
2.3 Turbíny s horizontální osou otáčení.....	20
2.3.1 Větrné turbíny Swift.....	20
2.3.2 Eklektické větrné turbíny	21
2.3.3 Větrné turbíny Fortis Montana.....	21
2.3.4 Větrné turbíny Scirocco	21
2.3.5 Větrné turbíny Tulipo.....	22
2.3.6 Větrné turbíny LoopWing	22
2.3.7 Větrné turbíny Windtronics.....	22
2.3.8 Větrné turbíny Archimedes	23
2.3.9 Větrné turbíny SpiralAirfoil.....	23
2.4 Turbíny s vertikální osou otáčení.....	23
2.4.1 Savoniusův typ větrných turbín.....	24
2.4.2 Větrné turbíny Darrieus.....	24
3 Zvýšení efektivity větrných turbín	25
3.1 Umístění větrných turbín	25
3.1.1 Volně stojící větrné turbíny.....	25
3.1.2 Umístění větrných turbín na střeše.....	26
3.2 Použití difuzoru.....	28
3.3 Plně integrované větrné turbíny	29
3.4 Vortex Bladeless	30
4 Zkušenosti z konkrétních instalací	31
4.1 Twelve West – Portland, Oregon.....	31
4.2 Metro Airport – Detroit, Michigan	32
4.3 Museum of Science – Boston, Massachusetts	32
4.4 Navy Yard – Brooklyn, New York	33
4.5 Pearson Court Square – Long Island City, New York.....	34
4.6 NASA Building 12 – Houston, Texas	34

4.7	Důležité poznatky vyplývající z kapitoly	35
5	Kalkulace energetických přínosů zvolené větrné turbíny a porovnání s FV panely	36
5.1	Větrná turbína Air 40	36
5.1.1	Brno-Žabovřesky	37
5.1.2	Lednice, Jihomoravská kraj	38
5.1.3	Dedina Mládeže, Nitranský kraj, Slovensko	39
5.2	Fotovoltaický panel Q.Peak DUO-G8+	39
5.3	Porovnání výsledků a důležité poznatky vyplývající z kapitoly	41
5.3.1	Spolupráce větrné turbíny s fotovoltaickým panelem	42
6	Závěr	43
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	44
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	48

ÚVOD

Lidstvo potřebuje ke spokojenému životu čím dál více energie, proto je nezbytné se zabírat tím, odkud budeme v budoucnu energii získávat. V minulosti se energie získávala převážně z fosilních paliv, jako jsou ropa, uhlí a zemní plyn. Spalování těchto paliv vede k vypouštění skleníkových plynů, které přispívají ke tvorbě skleníkového efektu a následně ke globálním změnám klimatu [1]. Taktéž nesmíme opomenout fakt, že fosilní paliva patří k neobnovitelným zdrojům energie, tudíž s nimi nemůžeme počítat navždy.

Můžeme se tedy domnívat, že budoucnost spočívá právě naopak ve využití obnovitelných zdrojů. Mezi obnovitelné zdroje energie řadíme větrnou energii, solární energii, energii vodních toků, geotermální energii a energii ze zpracování biomasy. Tato práce se zabývá právě energií z větru a jejím získáváním v městských oblastech, které mají specifické proudění vzduchu. Stavět větrné turbíny v městském prostředí je žádoucí, jelikož právě zde je potřeba velké množství energie. Výrobou energie v místě spotřeby odpadnou ztráty způsobené přenosem a podpoříme energetickou autonomnost a decentralizaci výroby energie. V neposlední řadě ušetříme prostor, či dokonce nemusíme zasahovat do krajiny, při porovnání s volně stojící velkou větrnou turbínou, jelikož využíváme již zastavěnou oblast. Energetický zisk malými větrnými turbínami ve městě bývá však zpravidla poměrně nízký, proto se bude tato práce zabývat jeho kalkulací a možnostmi případného zvýšení.

1 Větrná energie

Větrná energie a její využití k výrobě elektrické energie je v poslední době dost diskutovaným tématem, jelikož patří k obnovitelným zdrojům. Výrobou elektrické energie z větrné produkujeme mnohem méně emisí než při tradičním spalování fosilních paliv, které má navíc za následek tvorbu skleníkových plynů. Zvýšený obsah skleníkových plynů v atmosféře pak negativně ovlivňuje klimatické podmínky, jelikož způsobuje skleníkový efekt [1].

Energii větru, kterou můžeme označit jako „zelenou“, je lukrativní alternativní zdroj energie k tvorbě té elektrické. Avšak i větrná energie má své zápory. Jedním z hlavních negativ je fakt, že větrné elektrárny jsou většinou velmi velké a význačně narušují krajinu a její biologický chod [2]. Taktéž by se dalo říct, že zabírají místo jiným stavbám, či přírodní vegetaci.

Tento problém odpadá při instalaci větrných turbín v již zastavěných oblastech, jako jsou například ty městské [3]. Při instalaci větrné turbíny v městské oblasti můžeme využít již hotových konstrukcí, jako je například střecha domu.

1.1 Vznik větru

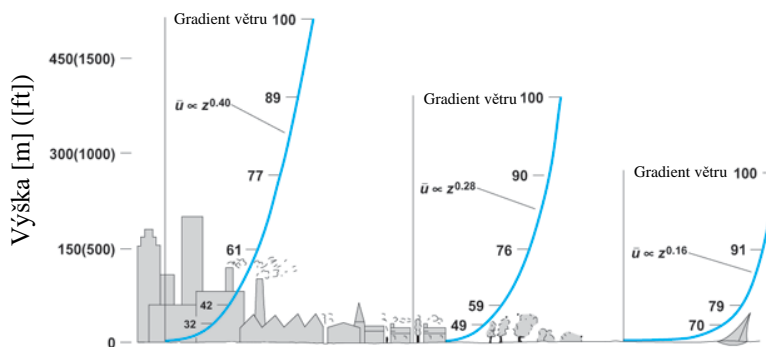
Větrná energie ve skutečnosti pochází ze slunce, stejně jako ostatní energie na zemi s výjimkou energie způsobující příliv a odliv, která má původ na Měsíci [2]. Fakt, že povrch Země je velmi nehomogenní a každé místo na Zemi má rozdílnou vzdálenost od Slunce a úhel dopadu slunečních paprsků, vede k tomu, že povrch Země je zahříván velmi nerovnoměrně. Toto nerovnoměrné zahřívání povrchu způsobuje rozdílnost atmosférického tlaku v různých místech. Právě rozdílnost hodnoty atmosférického tlaku na dvou různých místech má za následek samovolné proudění vzduchu z oblasti s vyšší hodnotou tlaku do oblasti s nižší hodnotou tlaku [4]. Toto proudění se označuje jako vítr. Další příčiny vzniku větru jsou rotace Země a rozdílné ohřívání vzduchu v různých nadmořských výškách.

1.2 Vlastnosti větru

Základní měřené vlastnosti větru jsou směr a rychlost. Pro problematiku výroby elektrické energie z větrné jsou obě zmíněné vlastnosti klíčové. Směr určujeme pomocí směrové růžice a rychlost měříme anemometrem. Hodnota rychlosti větru exponenciálně roste v závislosti na vzdálenosti od povrchu, proto je tato hodnota pro větrnou energetiku klíčová [4].

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^n \quad (1.1)$$

Kde h je výška umístění měřiče rychlosti větru [m], h_0 je požadovaná výška [m], v je průměrná rychlost větru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], v_0 je průměrná rychlost větru v požadované výšce h_0 [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] a n je exponent korekčního vztahu závisící na drsnosti povrchu [-].



Obrázek 1.1 Rychlostní profil větru [5]

Měrný výkon větru pak můžeme vyjádřit jako [2]:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (1.2)$$

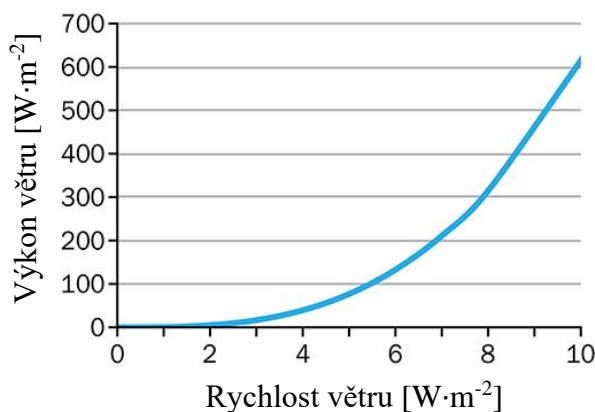
Kde P_v je měrný výkon [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], ρ je hustota vzduchu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] a v je rychlost větru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

Dle zákona zachování energie můžeme usuzovat, že určitě nelze z větru odebrat více energie, než kolik v něm je. Ve skutečnosti nelze odebrat, resp. transformovat, ani všechnu energii, jelikož by rychlost větru za turbínou musela být nulová a zastavil by se tedy i průtok [4].

Výkon odebraný proudícímu vzduchu rotorem turbíny P_s je dán vztahem [2]:

$$P_s = \frac{1}{2} S c_p \rho v^3 \quad (1.3)$$

Kde P je výkon [W], S je průtočná plocha [m^2], c_p je součinitel výkonu [-], který je závislý na míře snížení rychlosti protékajícího vzduchu a v je rychlost větru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]. Výkonový součinitel má teoretické maximum $c_{p \max} = 0,593$ [2].

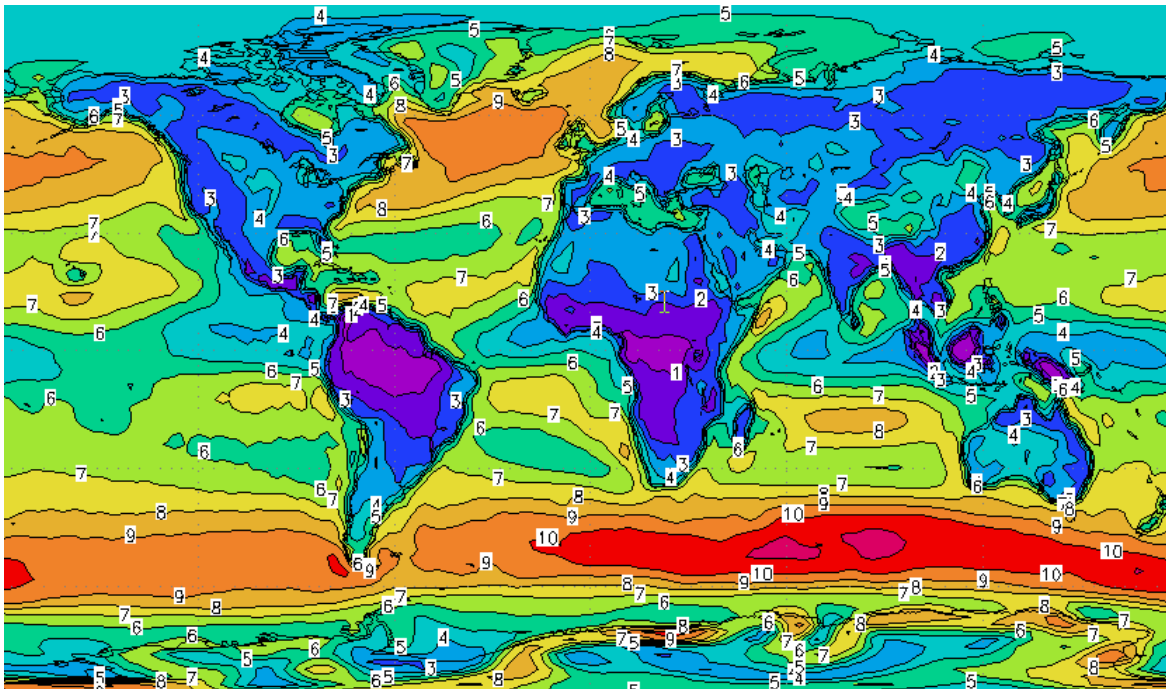


Obrázek 1.2 Měrný výkon větru v závislosti na rychlosti větru [6]

1.2.1 Predikce rychlosti větru

Jak již bylo zmíněno, klíčovou vlastností při získávání energie z větru je jeho rychlost. Průměrnou rychlost větru v určité výšce nám zobrazují tzv. větrné mapy. Viz obrázek 1.3. Mohou nám být velkou pomůckou při výběru vhodného místa k instalaci větrné turbíny. Tyto větrné mapy jsou vytvářeny pověřenými orgány, v České republice je to Ústav fyziky atmosféry Akademie věd ČR. Ze zdroje [7] můžeme zjistit průměrnou rychlost větru ve výškách 10, 50, 150 a 200 metrů nad povrchem, stejně jako průměrný měrný výkon větru. Global Wind Atlas (GWA) také může poskytnout zájemcům data pro konkrétní území o rozloze nejméně 9 km^2 . Přesnost neboli rozlišení této mapy dosahuje 250 m. Pro vytvoření větrných map využívá GWA data poskytované od European centre for Medium-Range Weather Forecasts, které udávají větrný charakter v nejvyšších vrstvách atmosféry [7]. Tyto data se následně použijí při výpočtovém modelování větru v nižších a následně nejnižších vrstvách atmosféry. Tomuto procesu, kdy se z tzv. mesoškal pomocí výpočtového modelu počítají tzv. mikroškály, říkáme generalizace [8].

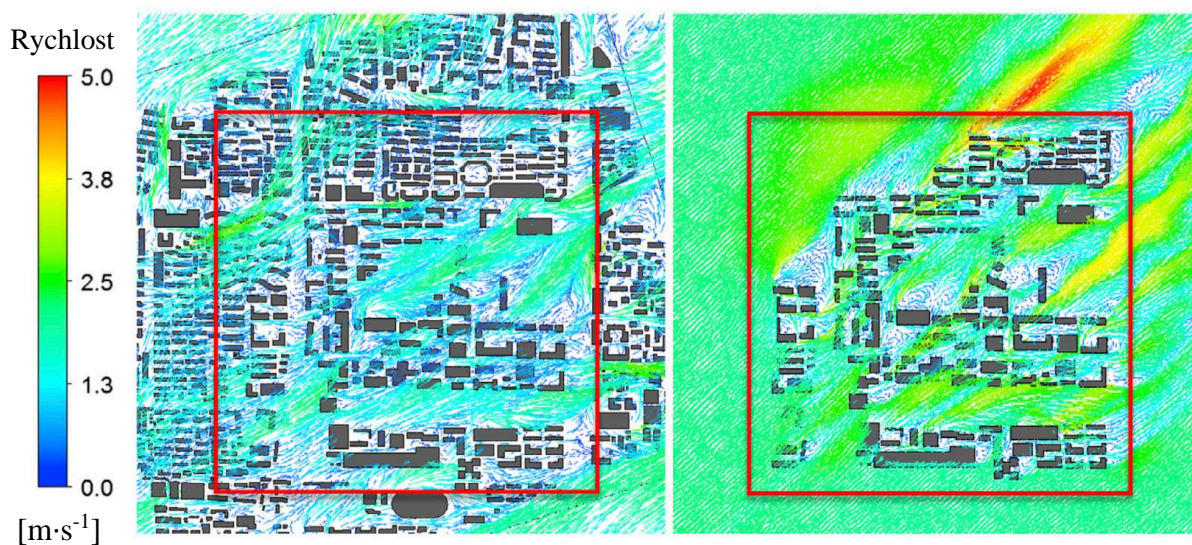
Pomocí těchto map můžeme již dělat první výpočty a úvahy ohledně větrného potenciálu na daném místě, nesmíme však opomenout i jiné důležité faktory, jako je například specifická povaha proudění vzduchu v již zastavěné oblasti. Větrné mapy totiž neberou ohled na budovy, či jiné objekty na povrchu a jejich rozpoložení, což je při predikci větru v městském prostředí klíčové. Touto problematikou se bude zabývat následující kapitola.



Obrázek 1.3 Větrná mapa ve výšce 10 m nad povrchem (roční průměr rychlostí [$m \cdot s^{-1}$]) [9]

1.3 Proudění vzduchu v městském prostředí

Jak již bylo zmíněno, proudění ve městském, zastavěném prostředí má svůj specifický charakter. Musíme tedy při zjišťování větrného potenciálu vzít do úvahy i vliv okolních objektů, například budov, které výrazně zvyšují členitost povrchu. Členitost povrchu má pak za následek zvýšení vzniku turbulencí, často měnící se směr větru a celkově zpomalení proudění, což negativně ovlivňuje chod větrné turbíny [8]. Větrný potenciál se v takovýchto případech určuje pomocí dalších výpočtových metod, které většinou zahrnují CFD simulace. CFD simulace obnáší matematicko-fyzikální numerické řešení proudění tekutin [10]. Princip CFD simulace vychází z fyzikálního popisu pohybu tekutiny, který je dán základními zákony o zachování hmoty, hybnosti a energie. Grafickou ukázkou CFD simulací můžeme pozorovat na obrázku 1.4.

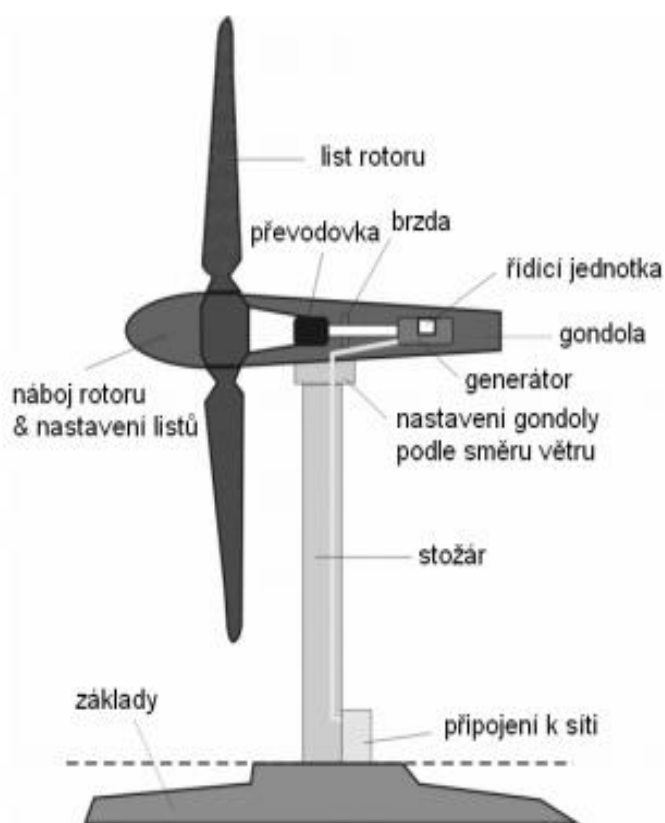


Obrázek 1.4 CFD simulace ovlivnění proudění vzduchu okolní zástavbou [10]

Příkladem je metoda popsána ve zdroji [11]. Tato metoda se zabývá odhadem rychlosti větru v členitém městském prostředí na základě míry změny rychlosti větru vůči původní rychlosti, která je před městskou zástavbou, a okrajových podmínek, jako je například průměrná výška budov. Vypočítaná data se porovnávají s experimentálními a s daty z CFD simulací a pomocí regresní analýzy se hledá vztah mezi morfologickými parametry města a rychlostí větru vůči původní, nezastavěné krajině. Podle zdroje [11] lze tuto metodu velmi dobře využít pro velmi členité oblasti. Pro méně členité oblasti nepřináší oproti lokálně predikovaným rychlostem větru výraznější zlepšení přesnosti, takže vzhledem k její složitosti není její použití v otevřeném prostranství moc výhodné. Naopak v zastavěném městském prostředí může být predikce větru velmi zásadní, protože kvůli členitosti městského prostředí vznikají velké rozdíly [8].

1.4 Výroba elektrické energie z větrné

Energie větru se zpracovává ve větrné turbíně. Standardní větrná turbína se skládá z pevné konstrukce statoru, které se též přezdívá věž, stožár, či tubus. Nahoře této konstrukce je pohyblivě uložen rotor s lopatkami, který se axiálně otáčí kolem své osy [4]. Schéma takové větrné turbíny je vyobrazeno na obrázku 1.5.



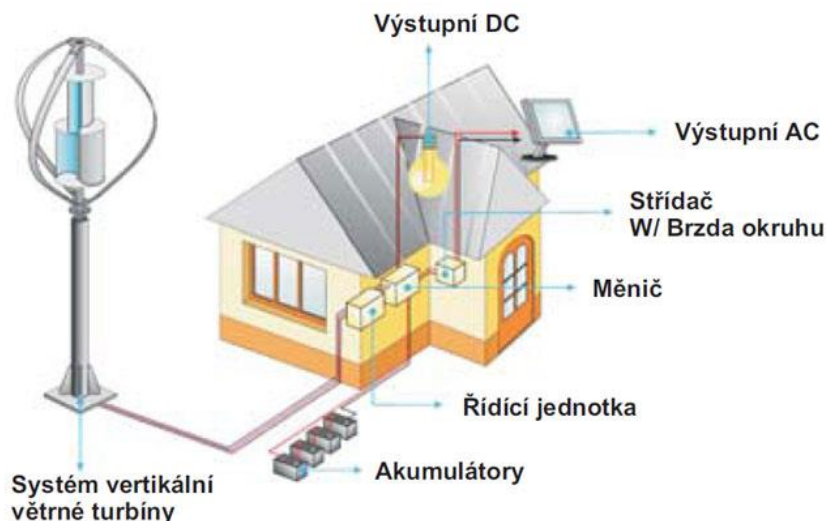
Obrázek 1.5 Schéma moderní větrné elektrárny pracující na vztlakovém principu [12]

Vítr předává svou kinetickou energii lopatkám turbíny, čímž se zpomaluje. Zároveň však roste kinetická energie, resp. rychlost lopatek turbíny, které roztáčejí generátor [4]. V generátoru se následně mění rotační mechanická energie rotoru na energii elektrickou. S vytvořenou elektrickou energií je pak dále zacházeno v rozvodné elektrické síti.

1.4.1 Způsoby zapojení pro výrobu energie

Autonomní systém (Grid-off)

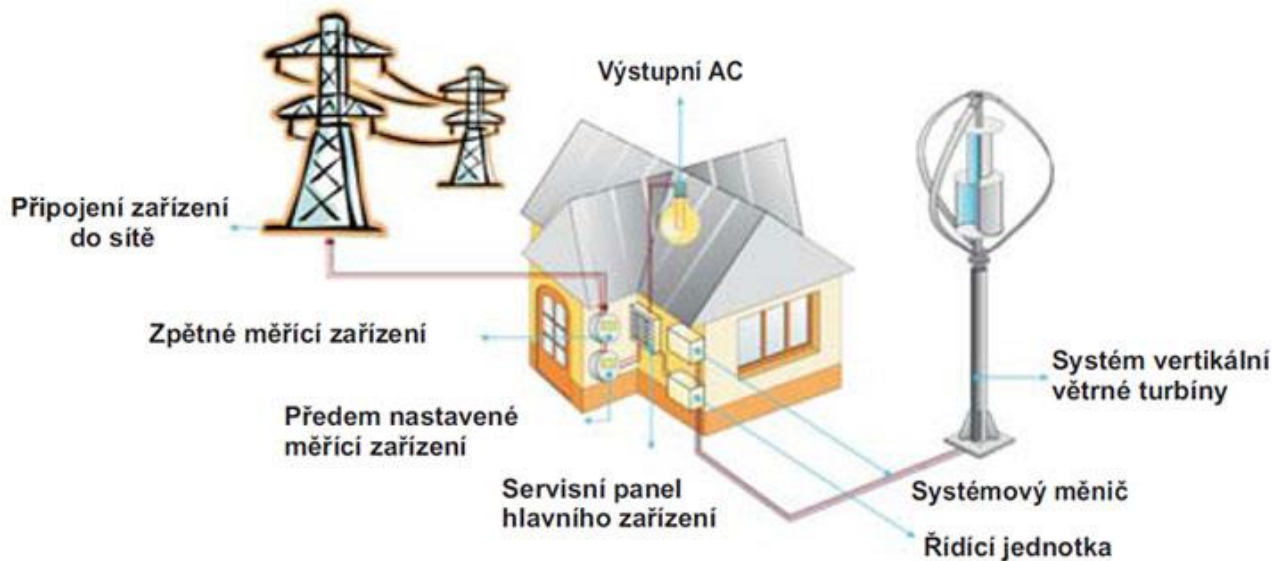
Autonomní, též přezdívaný ostrovní nebo grid-off, systém zapojení spočívá v tom, že není zapojen k distribuční elektrické síti [13]. Své uplatnění nachází především na místech, kde není možné vybudovat klasickou veřejnou přípojku k elektrické síti, nebo její zhotovení je příliš nákladné. Tento systém bývá většinou doplněn akumulátory, které uchovávají nespotřebovanou energii. Na obrázku 1.6 je znázorněno schéma zapojení tohoto systému.



Obrázek 1.6 Schéma zapojení grid-off systému [14]

Systém spojený se sítí (Grid-on)

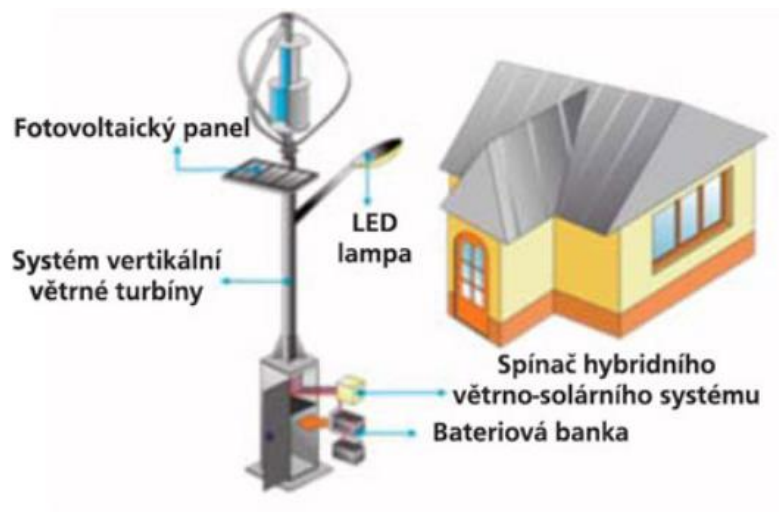
Tento typ systémů se naopak využívá v místech, kde není problém s připojením k distribuční elektrické síti. K provozu není potřeba žádný akumulátor, jelikož přebytek energie je posílán do distribuční sítě. Při nedostatku energie je naopak z distribuční sítě čerpána [13]. Pro provoz větrné turbíny v tomto zapojení je potřeba střídač, který mění stejnosměrný proud generovaný turbínou na střídavý. Schéma zapojení toho systému se vyobrazeno na obrázku 1.7



Obrázek 1.7 Schéma zapojení grid-on systému [14]

Hybridní systém

Jedná se o systém, který kromě větrné turbíny zahrnuje i zapojení jiného zdroje elektrické energie [13]. Častá a velice výhodná je například kombinace využití větrné a sluneční energie. Většinou je totiž vítr silný právě když moc nesvítí slunce a naopak. Systém může být doplněn ještě například kogenerační jednotkou nebo akumulátory. Obrázek 1.8 ukazuje schématický příklad hybridního systému.



Obrázek 1.8 Příklad hybridního systému [14]

2 Větrné turbíny v městském prostředí

Jednotlivé větrné turbíny se od sebe odlišují svým provedením, které se navrhuje v závislosti na požadovaných vlastnostech a umístění. Turbína může mít různý počet lopatek v rotoru, tvar profilu lopatek, či orientaci nebo princip funkce samotného rotoru. Stejně tak velikost může být velmi rozdílná. Největší větrná turbína má dokonce v průměru přes lopatky 220 m. Její rotor Haliade-X pohání generátor o výkonu 13 MW. Tuto turbínu můžeme najít v nizozemském Rotterdamu a pro její provoz je vymezen prostor pokrývající plochu 38 000 m² [15].

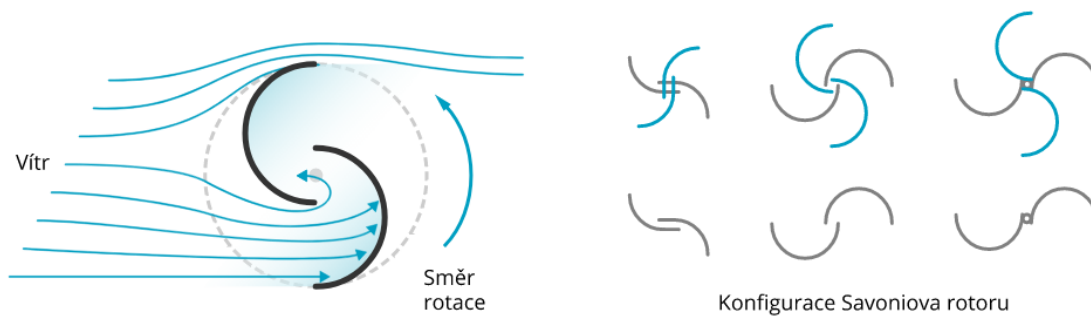


Obrázek 2.1 Velká (Haliade-X) [16] a malá (Waterlily) turbína [17]

Nejen právě z důvodu potřeby velkého prostoru pro správný chod turbíny se však vyrábějí i turbíny menších rozměrů, s menším výkonem a menšími pořizovacími náklady. V dnešní době můžeme na trhu nalézt i docela kompaktní turbíny určené pro běžné uživatele a jejich soukromé využití. Příkladem může být velmi malá větrno-vodní turbína s názvem Waterlily, která slouží primárně k dobíjení mobilního telefonu či jiného přenosného zařízení s akumulátorem na cestách [17]. Právě menšími větrnými turbínami, které se dají využít v zastavěném městském prostředí, se bude tato práce dále zabývat. Větrných turbín, které mají využití v městském prostředí, existuje celá řada druhů, avšak primárně je můžeme rozdělit do dvou kategorií. Toto základní dělení spočívá v principu jejich funkce.

2.1 Odporové větrné turbíny

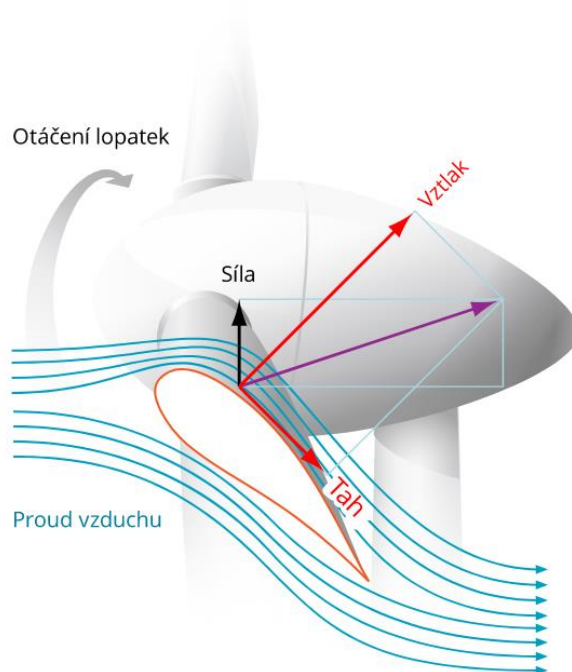
Tento typ větrných turbín je technologicky i služebně starší. Jejich účinnost, oproti druhé kategorii, vztlakovým turbínám, je menší [18]. Princip funkce je takový, že lopatky rotoru, díky svému tvaru, kladou co možná největší aerodynamický odpor větru. Odporová síla větru pak následně roztáčí rotor turbíny [4]. Princip činnosti odporové turbíny je znázorněn na obrázku 2.2.



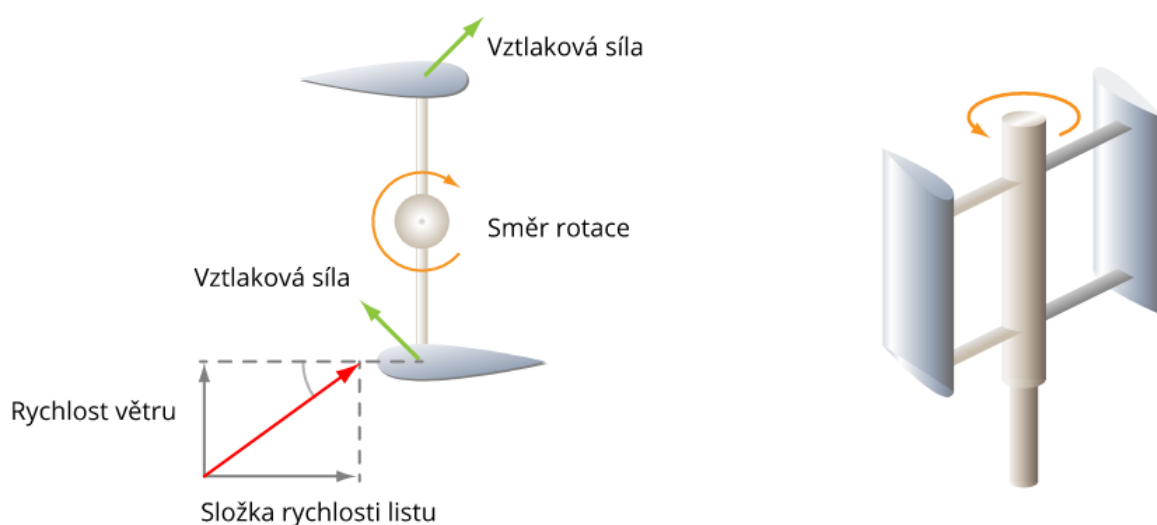
Obrázek 2.2 Princip činnosti (Savoniovy) odporové turbíny [19]

2.2 Vztlakové větrné turbíny

Vztlakové turbíny pracují na principu podobném křídílům letadla. Tvar lopatky, která je obtékána vzduchem, vytváří na stranách lopatky nesymetrické tlakové pole, které vyústí do vztlakové síly. Jejich tvar způsobuje vztlak na lopatky a tím vzniká rotace rotoru a generuje se elektrický proud [4]. Díky využívání tohoto odlišného principu fungování dokážou vztlakové větrné turbíny dosáhnout větší efektivity než odporové [18]. Na obrázku 2.3 je zobrazen princip činnosti vztlakové turbíny.



Obrázek 2.3 Princip činnosti vztlakové turbíny s horizontální osou rotace [19]



Obrázek 2.4 Princip vztlakové (Darrieovy) turbíny [19]

Dále můžeme také rozdělit turbíny dle orientace osy otáčení rotoru. Rozlišujeme tedy větrné turbíny s horizontální osou otáčení označované jako HAWT (Horizontal axis wind turbines) a s vertikální, které označujeme jako VAWT (Vertical axis wind turbines) [20]. Právě toto dělení turbín bude následně v práci využito k představení několika turbín používaných v městském prostředí. Z důvodu existence velkého množství typů od jednotlivých výrobců větrných turbín se tato práce nebude zabývat detailnějším popisem fungování těchto turbín, ale bude se snažit spíše porovnat jednotlivé typy a podtrhnout jejich výhody a nevýhody.

2.3 Turbíny s horizontální osou otáčení

Větší zastoupení mezi turbínami mají turbíny s horizontální osou otáčení. Tento fakt je způsoben tím, že tento typ větrných turbín využívá většinou vztakový princip, který je účinnější než ten odporový a účinnost se tedy blíží teoretickému maximu [18]. Avšak vlivem povahy proudění vzduchu v městském prostředí, která je popsána v předešlé kapitole, míra efektivity klesá. Kvůli vysoké citlivosti těchto turbín se zvláště negativně projevují rychlé změny směru větru, které mají negativní dopad na plynulý chod lopatek [8]. Změny směru větru též způsobují nesprávný úhel náběhu, a tedy na lopatku nepůsobí vždy ideálně velká síla. Rychlé změny směru větru též způsobují prodlevu při natáčení turbíny do směru proudu vzduchu. Další velké omezení u těchto turbín ve městě je, že nemůžeme nad určitou hodnotu dále zvětšovat délku lopatek. Toto omezení je kvůli potenciálnímu nebezpečí větší větrné turbíny pro ptactvo a pro leteckou dopravu. Musíme vzít ale též do úvahy fakt, že turbíny přenáší silový nápor větru do místa svého úchyty [20]. Při velkých rozměrech turbíny by mohl vznikat již nadkritický nápor větru a následky by mohly být ničivé. Také estetický vliv může hrát pro někoho velice významnou roli při volbě turbíny.

2.3.1 Větrné turbíny Swift

Tyto větrné turbíny se vyznačují svým malým rozměrem a stylem lopatkování. Mají úzké lopatky, které jsou obklopené prstencem. Prstenec má za úkol snížit okrajové ztráty lopatek. Též výrazně snižuje vibrace a hluk pod úroveň 35 dB. Hlavní účel návrhu těchto turbín je právě co nejvíce redukovat hluk, a právě proto jsou instalovány především v městských oblastech, kde je tichý chod turbíny velice žádoucí. Tyto turbíny bývají navrženy na poměrně vysokou obvodovou rychlost rotoru [20].



Obrázek 2.5 Větrné turbíny Swift [21]

2.3.2 Eklektické větrné turbíny

Návrh eklektické turbíny se naopak zaměřuje na nízkou obvodovou rychlost rotoru a trvalý chod. Jejich konstrukce lopatek je při návrhu optimalizována pro rychlost větru 11 m/s. Díky poměrně malým rozměrům a hmotnosti jsou vhodné do městského prostředí [20], jelikož se dají snadno připevnit na většinu budov. Maximální výkon takových turbín se pohybuje okolo 600 W [22].



Obrázek 2.6 Eklektická větrná turbína D400 [22]

2.3.3 Větrné turbíny Fortis Montana

Větrné turbíny Fortis Montana jsou navrženy pro opravdu tichý chod. Jejich hlasitost jen o 1 až 3 dB převyšuje hlasitost okolního hluku. Při nízké rychlosti otáčení nejdou tyto turbíny vůbec slyšet do 50 m [20]. Využití turbíny Fortis Montana nacházejí především v domácnostech, kde pomáhají šetřit finance za elektřinu. Specifické jsou tvarem svých lopatek, které jsou prizmatické (nekroucené) [23]. To vzhledem k menší náročnosti na výrobu snižuje jejich cenu, a naopak zvyšuje variabilitu při různých rychlostech větru.



Obrázek 2.7 Větrná turbína Fortis Montana [23]

2.3.4 Větrné turbíny Scirocco

Tyto větrné turbíny jsou navrženy tak, aby zahrnovaly funkce, které mají mnohem větší turbíny. Mezi tyto funkce patří například natáčecí lopatky rotoru, které jsou většinou pouze dvě [20]. Větrné turbíny Scirocco mají vynikající optimalizaci poměru cena/výkon při nižších rychlostech větru [24].



Obrázek 2.8 Větrná turbína Scirocco [24]

2.3.5 Větrné turbíny Tulipo

Lopatky turbín Tulipo jsou pevně připevněny k rotoru a mají poměrně jednoduchou konstrukci, díky čemu vyžadují minimální údržbu. Lopatky se otáčejí již při relativně nízké rychlosti větru a nevydávají téměř žádný hluk ani vibrace. I při nízkých rychlostech větru dosahují vysoké hodnoty účinnosti [20].



Obrázek 2.9 Větrná turbína Tulipo [25]

2.3.6 Větrné turbíny LoopWing

Výjimečnost těchto turbín spočívá v konstrukci jejich lopatek. Lopatky jsou totiž vyrobeny z lehkého pružného materiálu a jsou zahnuty tak, že je uchycen k rotoru i jejich konec. Turbína tak má mnohem menší hmotnost i vibrace. Díky svým speciálním lopatkám může turbína fungovat již od rychlosti větru 1,6 m/s. Větrné turbíny jsou produkovány stejnojmennou japonskou firmou od roku 2006 [26].



Obrázek 2.10 Větrná turbína LoopWing [27]

2.3.7 Větrné turbíny Windtronics

Větrné turbíny Windtronics využívají bezpřevodovou technologii „Blade tip power systém“. Jejich výkon je až 1,5 kW [28]. Vývoj těchto turbín probíhá v USA a jejich výroba v Kanadě. Vynikají především velmi nízkou rozběhovou rychlostí větru. Lopatky se začínají točit již při rychlosti větru 0,2 m/s a točí se s minimální hlučností. Hlasitost zvuku se většinou pohybuje okolo 35 dB [28].



Obrázek 2.11 Větrná turbína Windtronics [28]

2.3.8 Větrné turbíny Archimedes

Princip těchto turbín vychází z konstrukce tradičního Archimedova šroubu. Velká výhoda a výjimečnost těchto turbín spočívá v tom, že turbína může pracovat i pod vodou a sloužit tak jako vodní turbína [29]. Turbína při své činnosti vydává velmi malé množství zvuku [30].



Obrázek 2.12 Větrná turbína Archimedes [30]

2.3.9 Větrné turbíny SpiralAirfoil

Větrné turbíny SpiralAirfoil od ostatních turbín vynikají již na první pohled. Konstrukce jejich lopatek je vyrobená z odolného plastu a tvarově připomíná systém spirál. Jelikož mezi lopatkami nejsou žádné mezery, nepředstavují tyto turbíny nebezpečí pro ptactvo. Vzhledem k velké ploše lopatek dosahují turbíny SpiralAirfoil i poměrně vysoké účinnosti [31]. Při funkci těchto turbín je na točící se spirály velmi zajímavý až fascinující pohled.



Obrázek 2.13 Větrná turbína SpiralAirFoil [32]

2.4 Turbíny s vertikální osou otáčení

Největší výhoda turbín s vertikální osou otáčení je, že mohou k otáčení využít jakýkoliv směr větru a nečelí tudíž prodlevám při natačení turbíny do směru větru. Díky této vlastnosti se stávají velice výhodnými pro městské prostředí [8]. Další velkou výhodou je pozice generátoru a převodovky, které, narozdíl od turbín s horizontální osou rotace, mohou být umístěny na úrovni země [20]. Právě jejich dostupná poloha velice usnadňuje jejich instalaci a údržbu a stabilitu celého zařízení. Pořizovací náklady jsou poměrně nízké. Svými vlastnostmi se mohou zdát vhodnějšími do městského prostředí než turbíny s horizontální osou rotace, avšak v porovnání generují méně energie [18], jelikož princip jejich funkce je většinou odporový, kde je nižší i teoretická účinnost. Existují dva hlavní typy těchto turbín používaných v městských oblastech.

2.4.1 Savoniusův typ větrných turbín

Savoniovy větrné turbíny mohou mít horizontální i vertikální osu rotace. Většinou se však vyrábí s vertikální osou rotace. Tyto turbíny využívají k tvorbě rotace hřídele odporové síly [19]. U těchto turbín rozlišujeme speciální dva druhy, které mají podobnou konstrukci, avšak trochu jiné vlastnosti [20]. Oba typy vynikají svým moderním a inovativním designem. Energy ball (energetická koule), jak se přezdívá prvnímu typu, má rotor složený ze šesti půlkruhových lopatek tvořící sférickou konstrukci. Windwall (větrná zeď) je název druhého typu. Má svou osu rotace připevněnou tak, že dokáže využít vítr pouze z jednoho směru. Proto je vhodný pouze na místa, kde výrazně převládá vítr z jednoho směru [20].



Obrázek 2.14 Savoniova větrná turbína [33]

2.4.2 Větrné turbíny Darrieus

Větrné turbíny Darrieus se skládají z řady zakřivených lopatek, které jsou pevně připevněny na rotující hřídeli. Lopatky jsou navrženy tak, aby využívaly k roztáčení rotoru vztlakové síly [19]. Pro chod těchto turbín je zapotřebí poměrně vysoká rychlost větru [20]. Též rozběhová rychlost větru musí být z pravidla vysoká. Existuje několik různých podtypů Darrieových turbín, jako jsou například turbíny Gorlov a turbíny Giromill. Liší se od sebe v první řadě tvarem lopatek. Větrné turbíny Gorlov mají spirálové zpracování lopatkové konstrukce. Jsou navrženy k samovolnému chodu i při nižších rychlostech v porovnání s klasickými turbínami Darrieus. Při návrhu je též kladen důraz na malou úroveň hluku, vibrací a cyklického namáhání. Větrné turbíny Giromill mají zase rovný tvar lopatek a jsou navrženy k co největší efektivitě při turbulentním proudění větru [20].



Obrázek 2.15 Větrná turbína Darrieus [34]

3 Zvýšení efektivity větrných turbín

Dosáhnout zvýšení efektivity větrných turbín se dá několika způsoby. Značná část možností, jako je speciální tvar turbíny, případně lopatek, začíná již ve fázi návrhu. Efektivitu lze též zvýšit vývojem generátoru a elektroinstalace. Většinu těchto možností zvýšení efektivity předchází dlouhá léta pečlivého výzkumu a testování. Často také výzkum probíhá pod záštitou nějaké soukromé firmy a spadá na něj obchodní tajemství. Výsledky se následně promítají do nových produktů dané firmy. Tato práce se nebude blíže zabírat zvýšením efektivity při samotném vývoji větrných turbín, nýbrž bude pohlížet na větrné turbíny jako na již funkční celky.

3.1 Umístění větrných turbín

K dosažení co největší efektivity výroby elektrické energie z větrné je důležité nejen vybrat vhodnou turbínu pro danou lokalitu vzhledem na její vlastnosti, ale i místo k jejímu umístění. Možnosti instalací větrných turbín se mohou rozdělit na tři kategorie [35]. První možnost instalace turbíny je nechat ji stát samotnou. Další možností je využít k instalaci již postavené konstrukce, například budovy. Poslední možností pro instalaci větrných turbín je integrovat větrnou turbínu již do návrhu samotné budovy. Pozorování a poznatky k jednotlivým možnostem umístění větrných turbín budou popsány v následujících podkapitolách.



Obrázek 3.1 Možnosti instalací větrných turbín [36]

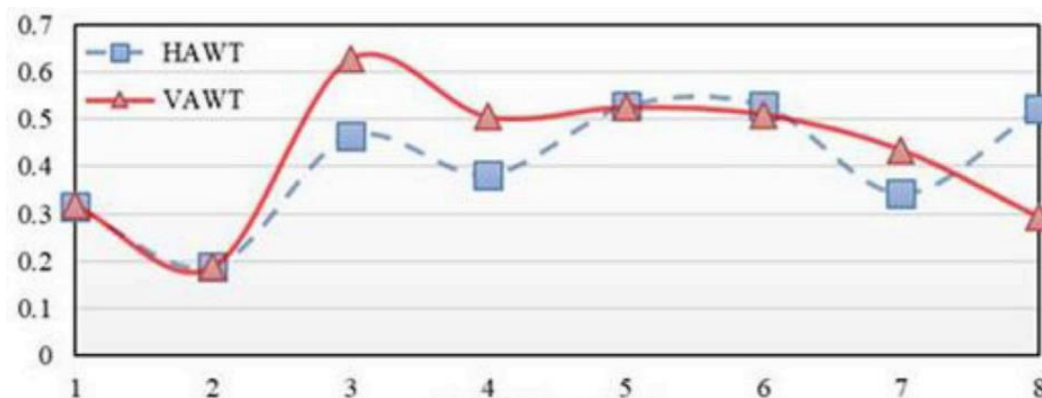
3.1.1 Volně stojící větrné turbíny

Umístění větrné turbíny na stožáru, který je upevněn k zemi, je nejstarší způsob instalace větrných turbín. Výhoda této možnosti instalace spočívá v její jednoduchosti, avšak ve městském prostředí, které bylo popsáno v předchozí kapitole, není její použití moc vhodné. Při této instalaci je zapotřebí turbínu umístit na dlouhý stožár, aby vůbec turbína zachytila nějakou energii z větru. Stožár je dále vhodné umístit na vyvýšené místo, které má ve svém okolí co nejméně vysokých budov, či jiných objektů, které by výrazně zpomalovaly vítr. V porovnání s dalšími dvěma možnostmi instalace větrných turbín je tento způsob instalace v městském prostředí nejméně výhodný a v dnešní době už spíše historický.

Studie [37] se věnovala měření a následnému porovnání dvou různých větrných turbín. Obě měly výkon 20 kW. Jedna měla horizontální osu otáčení rotoru a druhá vertikální. Měření probíhalo jak při slabém větru, tak při silném větru, kdy byla mnohem větší míra turbulencí. Mohly se tak projevit slabé i silné stránky každé z technologií. Z naměřených dat se pomocí výpočtu stanovily průměrné výkonové koeficienty pro každou z turbín v daném měsíci. Výsledky této studie jsou zaznačeny v tabulce níže.



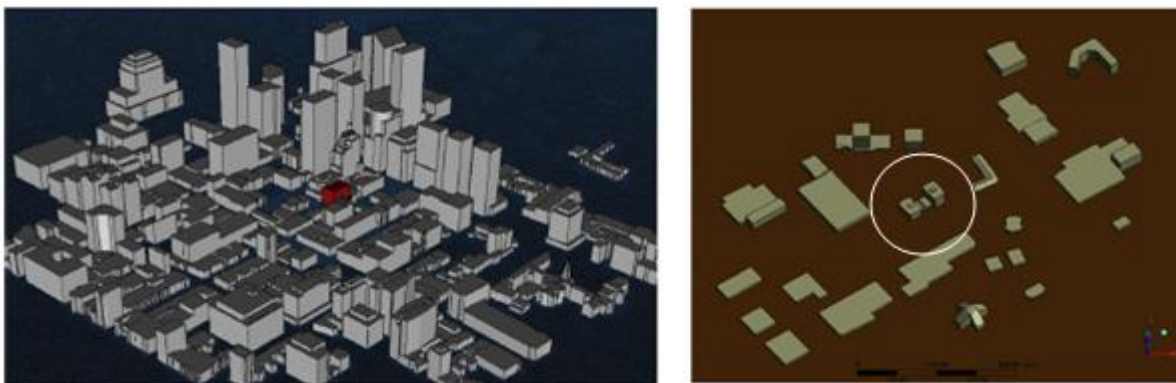
Obrázek 3.2 VAWT a HAWT u kterých bylo prováděno měření [37]



Obrázek 3.3 Průměrné výkonové koeficienty (v jednotlivých měsících) pro HAWT a VAWT na základě údajů ze studie [37]

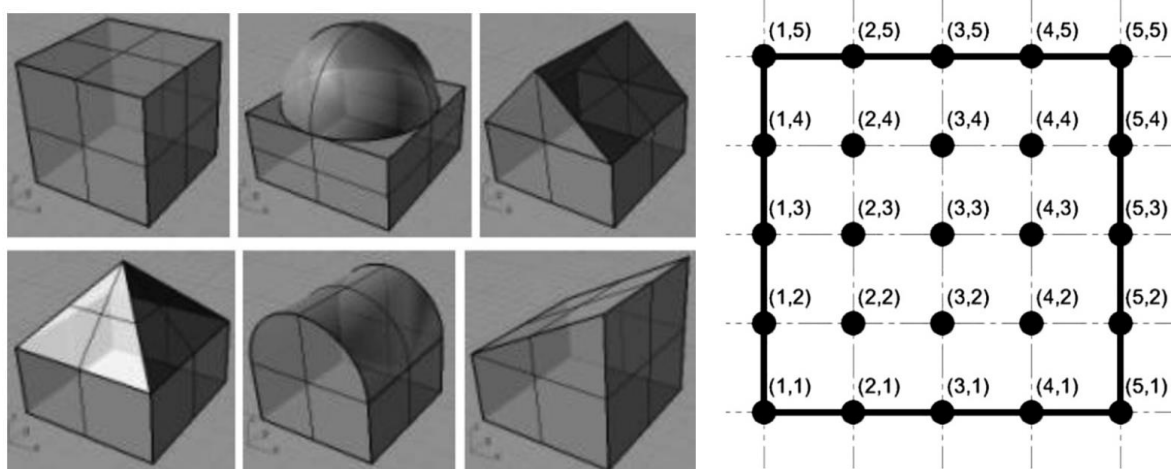
3.1.2 Umístění větrných turbín na střeše

Další, již zmiňovanou možností, je umístění větrných turbín na již postavené budovy. Zdroj [10] zkoumá energetický výtěžek z turbíny umístěné na střeše budovy použitím CFD simulace a reálně naměřených meteorologických dat. Charakter proudění je demonstrován na dvou typech městské zástavby. Modely, které byly použity, můžeme vidět na obrázku 3.4. V případě prvního modelu je zástavba hustší a budovy vyšší. Představuje centrum poměrně velkého města. Druhý model naopak představuje spíše vesnici, nebo předměstí. Zástavba není tak hustá a výška domů je menší.



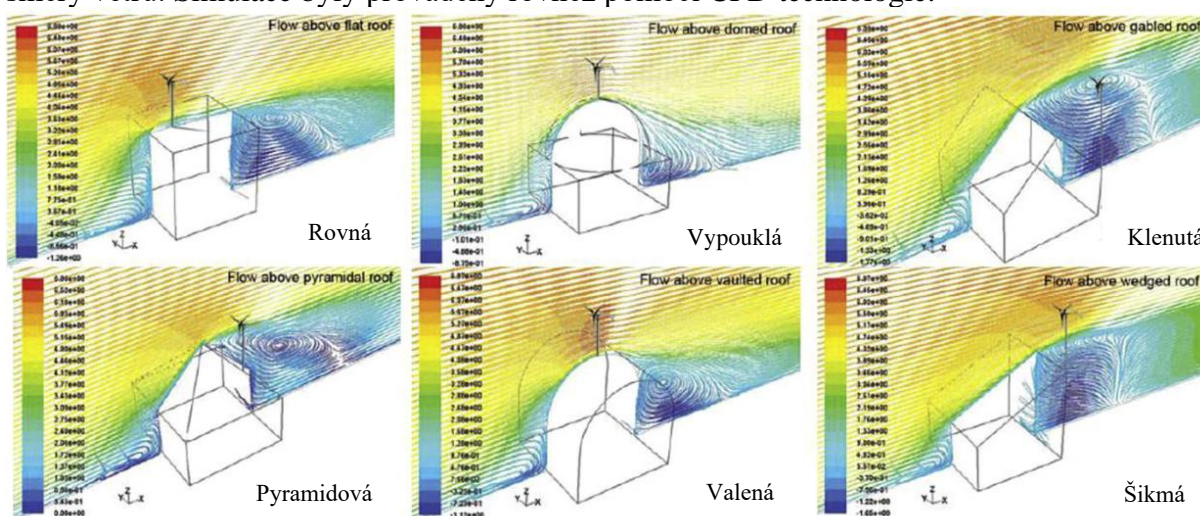
Obrázek 3.4 Modely více a méně husté městské zástavby použité v CFD simulaci [10]

Tato studie [38] zjistila, že pokud je turbína umístěná na návětrné straně budovy a v dostatečné výšce od střechy budovy, není proudění větru téměř vůbec ovlivněno budovou a rychlost větru zůstává téměř stejná jako nátoková rychlost před budovou. V takovémto případě je tudíž výkonový koeficient (výkon turbíny vůči výkonu větru vztáhnutému k nátokové rychlosti) rovný jmenovitému. Jak však také vyplývá z této studie [10], pokud je turbína umístěna na nevhodném místě nebo výšce, může výkonový koeficient turbíny klesnout až od 60 %. Tento rozdíl může vzniknout například při umístění turbíny na závětrnou místo návětrné strany. Zajímavé zjištění vzniká též porovnáním simulací umístění turbíny v modelu městské hustější zástavby a modelu se zástavbou řidší, spíše předměstského typu. Ze studie [38] vyplývá, že turbína umístěná na budově v méně zastavěné oblasti při stejných vstupních podmínkách má větší energetický zisk oproti umístění na budově v hustěji zastavěné oblasti, která je dokonce třikrát vyšší. Tento fakt potvrzuje tvrzení, že okolní budovy velmi ovlivňují proudění okolního vzduchu, zvláště když tyto budovy jsou vzhledem k směru větru před naší zkoumanou budovou.



Obrázek 3.5 Zkoumané tvary střech a pozice pro umístění turbíny (návětrná strana vlevo) [8]

K dalším zajímavým závěrům došel též zdroj [8], který se zabýval umístěním větrných turbín na střeše budov. Zkoumal především jaký tvar střechy je pro umístění větrné turbíny nejvýhodnější a v jaké části střechy je nejvýhodnější větrnou turbínu umístit, aby byl energetický zisk maximální. Do úvahy byly vzaty různé modely geometrie městské výstavby i směry větru. Simulace byly prováděny rovněž pomocí CFD technologie.



Obrázek 3.6 Vizualizace proudění vzduchu pro zkoumané tvary střech [8]

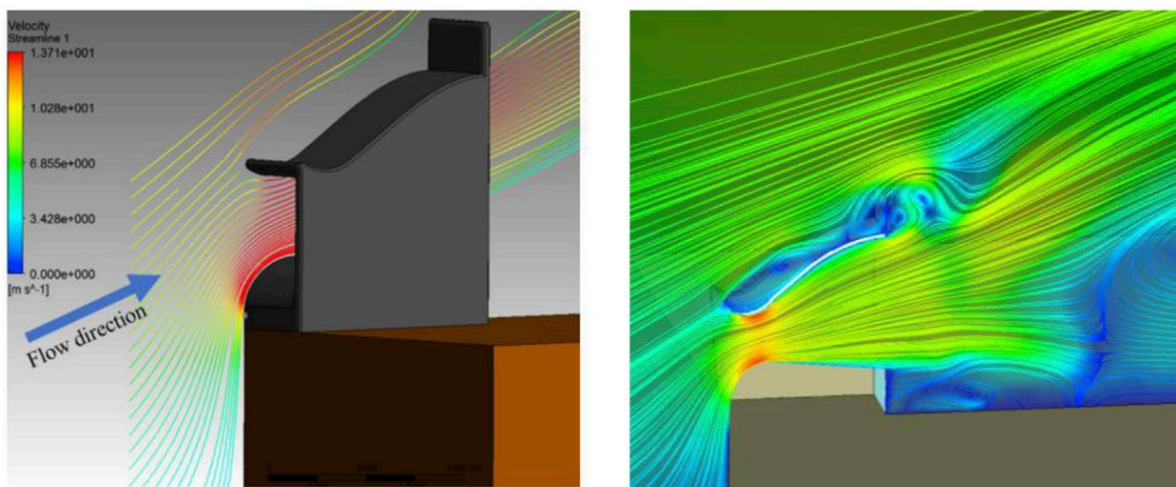
Následující tabulka uvádí ideální pozici a výšku pro umístění větrné turbíny pro několik typů běžně se vyskytujících střech. Pozice byly vyhodnoceny jako ideální vzhledem k nejvyšší rychlosti větru. Na tomto místě dosáhla rychlost svého maxima, hodnota v tomto místě byla dokonce větší než rychlost před budovou. Zvýšení rychlosti bylo pozorováno u každého typu střechy, dokonce i u budov, které jsou nižší než okolní budovy [10]. Dalším důležitým poznatkem je, že míra turbulencí roste jen do výšky cca $1,3H$ a poté opět klesá. Větrná turbína by tedy měla být umístěna alespoň nad touto výškou. Ze závěru studie [8] tedy vyplývá, že vhodným umístěním turbíny můžeme zvýšit její energetický výtěžek až o 25 %, a to právě díky již zmíněnému zrychlení proudu v oblasti nad střechou.

Tabulka 3.1 Výsledky studie zabývající se umístěním turbíny [8]

Typ střechy	Ideální pozice na střeše (viz obrázek 3.5)	Ideální výška k umístění turbíny (výška budovy H)
Rovná	2,3	1,45H
Vypouklá	3,3	1,30H
Klenutá	5,1	1,60H
Pyramidová	4,2	1,35H
Valená	3,3	1,30H
Šikmá	5,1	1,45H

3.2 Použití difuzoru

Vzhledem k turbulentní povaze proudění větru v městském prostředí bývá použití větrných turbín často problematické, někdy až neefektivní. Tento fakt vytváří snahu turbíny neustále zlepšovat a optimalizovat. Mezi zkoumané možnosti zvýšení efektivity větrných turbín patří použití difuzoru. Difuzor lze popsat jako specificky tvarovaný kryt kolem turbíny. Difuzor díky své speciální geometrii, která využívá Venturiho efektu [39], usměrňuje tok a pomáhá zvýšit rychlost větru a tím i výkon turbíny. Studie [40] uvádí, že i použití jednoduchého difuzoru kuželového tvaru dokáže zvýšit výkonový koeficient až o 60 % v porovnání se stejnou, samovolně stojící větrnou turbínou bez difuzoru. Výsledky vychází z pečlivě provedených CFD simulací, avšak kvůli nedostatku naměřených dat z reálných instalací nelze tato hodnota s jistotou potvrdit [40]. Určitou míru zlepšení však můžeme očekávat.



Obrázek 3.7 Vizualizace proudění vzduchu v difuzoru [40]

3.3 Plně integrované větrné turbíny

Nejmodernějším způsobem instalace větrných turbín je zakomponovat větrnou turbínu již do samotného návrhu budovy hned ze začátku. Tento způsob instalace větrných turbín má několik výhod. Jelikož se konstrukce budovy navrhuje zároveň s větrnou turbínou, bývá mnohem lépe uzpůsobena na provoz turbíny. Mohou se tedy použít výrazně větší turbíny, které vyprodukují více energie [41]. Tvar budovy v takovýchto případech navíc většinou funguje jako konfuzor, čímž se zvyšuje množství prouděného vzduchu protékajícího turbínou. S rostoucím množstvím vzduchu se zvyšuje i efektivita turbíny, tj. účinnost i výkon. Další nemenší výhoda spočívá ve vzhledu. Integrované větrné turbíny vypadají výrazně lépe, protože bývají součástí designu celé budovy. Tato výhoda může být velice důležitá pro lidi, kterým montování větrných turbín na starší konstrukce připadá vzhledově příliš rušivé, či dokonce invazivní. Příkladem plně integrovaných větrných turbín v budovách jsou obchodní centrum v Bahrajnu, Strata Tower v Anglii, či Pearl River Tower v Číně. Tyto budovy můžeme pozorovat na obrázku 3.8.

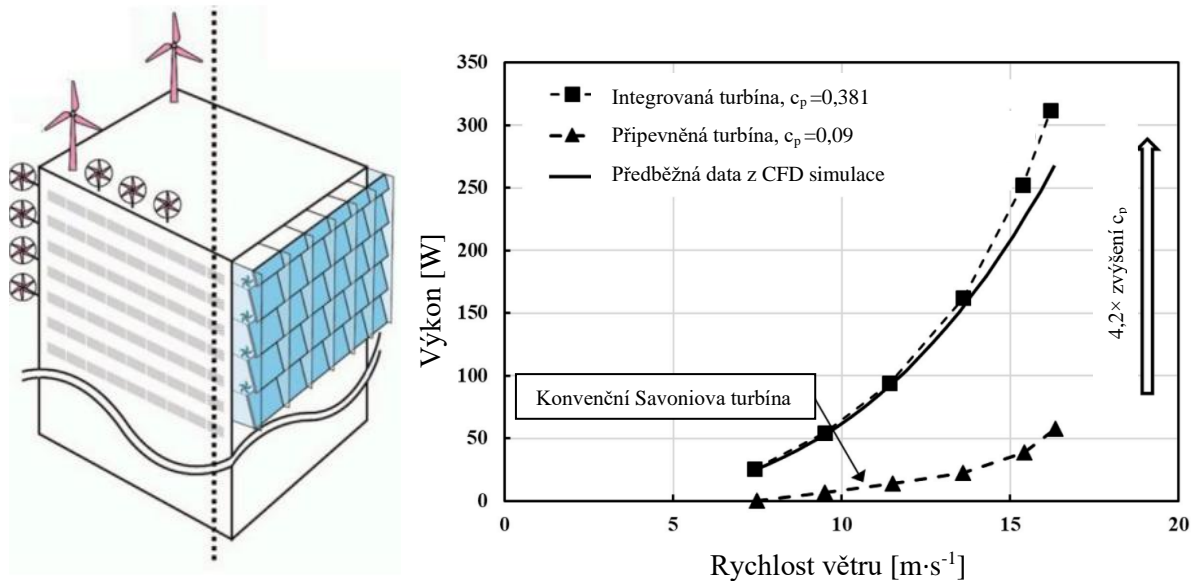


Obrázek 3.8 (zleva) Obchodní centrum v Bahrajnu, Strata Tower v Anglii, Pearl River Tower v Číně [35]



Obrázek 3.9 Vizualizace proudění vzduchu skrze Pearl River Tower a větrná turbína umístěná v jednom z průduchů [41]

Porovnání možného dosaženého výkonu plně integrovanými větrnými turbínami oproti běžným připevněným turbínám nám udává zdroj [35].



Obrázek 3.10 Znáornění připevněných a integrovaných větrných turbín a porovnání výkonových křivek [35]

3.4 Vortex Bladeless

Další možností zvýšení efektivity větrných turbín, resp. využitím nové technologie, se zabývá koncept Vortex Bladeless, který je založen na fenoménu aeroelastické rezonance [42]. Koncept ve skutečnosti není turbína, protože nemá žádné části, které by se točily, ale svou povahou se jí velice podobá. Konstrukce se skládá z pevného obalu, který je pohyblivě uložen na podstavci. Speciálně vyvinutý alternátor využívá vibrací při rezonanci a generuje elektrický proud [43]. Výrobce uvádí, že tato „neturbína“ by měla mít v porovnání s klasickou větrnou turbínou levnější provoz. Její další velká výhoda je absence převodovky a brzd, tudíž součástí, které by se mohly například vlivem příliš vysoké rychlosti poškodit. Neruší tolik tok větru, a proto při výstavbě více turbín na jednom místě vyžaduje značně menší rozestupy. Celková výška by měla být 2,75 m a výkon se odhaduje na 100 W [42]. Celý projekt je však ještě ve vývoji.



Obrázek 3.11 Vizualizace Vortex Bladeless v krajině [43]

4 Zkušenosti z konkrétních instalací

Následující kapitola se bude zabývat projekty instalací větrných turbín v městské oblasti, hodnocením jejich úspěšnosti, a především zkušeností z jejich realizace. Jelikož počáteční cíle jednotlivých projektů jsou různorodé, bude dárán důraz především na splnění, či nesplnění těchto cílů a očekávání. Vzhledem k tomu, že komerční prodej větrných turbín je poměrně novou záležitostí, není moc zkušeností, které by se daly relativně zhodnotit. Zkušenosti pochází ze zdroje [36].

4.1 Twelve West – Portland, Oregon

- V případě tohoto projektu byly instalovány čtyři turbíny Skystream 3.7 v roce 2009 v Portlandu. Instalace proběhla na 23patrovou budovu, využívanou pro kancelářské i bytové prostory, v nadmořské výšce 82 m. Cenová náročnost projektu byla 240000 \$.
- Cíle toho projektu se soustředily primárně na zviditelnění budovy a tím zároveň i zvýšení zájmu a povědomí o obnovitelné energii. Roční produkce energie byla odhadována na 9000 kWh, skutečně vyprodukované energie za rok však bylo značně méně, a to 5500 kWh. Projekt je i přes to považován za úspěšný, jelikož hlavní cíle byly naplněny. Návratnost investice projektu se dle dosavadních měření odhaduje na 40 roků.
- V diskusi ohledně zhodnocení výsledků a zkušeností klade projekt manager důraz na pečlivou přípravu před projektem. Z jeho rad a zkušeností vyplývá, že důležité je snad co nejdetailněji změřit rychlost větru v místě budoucí instalace. Také upozorňuje na fakt, že velká část firem vyrábějící větrné turbíny jsou nepříliš dlouho fungující start-up společnosti. Je tedy značná pravděpodobnost, že firma zkrachuje, nebo z jiného důvodu přestane existovat, a tudíž je pak jakýkoliv servis těchto turbín velmi problematický.



Obrázek 4.1 Twelve West [44]

4.2 Metro Airport – Detroit, Michigan

- Předmětem tohoto projektu byla instalace šesti turbín s vertikální osou otáčení Windspire 1.2. Instalovány byly v roce 2010 v prostoru letiště města Detroit. Peněžně projekt vyšel na 75000 \$.
- Projekt byl zaměřen na otestování nové technologie výroby elektrické energie. V případě úspěšnosti projektu se plánovalo postavit na letišti více turbín. Projekt však nedopadl podle představ a je považován za neúspěšný. Předpokládaná roční produkce elektrické energie měla být 2000 kWh. Skutečnou roční produkci není možné určit, protože nebyla nikdy sledována. Projekt se od počátku své existence potýkal s problémy. Turbíny měly postupně několik poruch a vzhledem k bankrotu společnosti vyrábějící turbíny bylo velmi obtížné shánět náhradní díly. Momentálně fungují pouze tři turbíny a zbylé tři se využívají na náhradní díly. I přes neúspěch tohoto projektu vzbuzují turbíny zájem okolí.
- Zkušenosti vyplývající z tohoto projektu jsou obdobné jako v případě předchozího projektu (Twelve West). Bryan Wagoner, který byl v té době zodpovědný za projekt, uvádí, že pečlivý a rozsáhlejší výzkum před samotnou instalací by mohl velmi prospět. Též podtrhuje důležitost zkušeností a tradice firmy, především kvůli krachu té, která měla projekt na starost.



Obrázek 4.2 Detroit Metro Airport [36]

4.3 Museum of Science – Boston, Massachusetts

- Pod záštitou tohoto projektu bylo instalováno celkem devět turbín (Windspire 1.2, Skystream 3.7, Swift, Proven 6 a pět turbín AeroVironment AVX1000). Realizace projektu proběhla v roce 2009. Turbíny byly umístěny na střeše budovy vědeckého muzea v Bostonu. Cenová náročnost byla okolo 350000 \$.
- Cílem projektu byla instalace několika různých, komerčně dostupných turbín na jednom místě, aby mohla být nezávisle testována jejich funkčnost v městském prostředí. Zároveň měly turbíny sloužit jako exponáty muzea a budit zájem okolní veřejnosti o důležitosti obnovitelné energie. Roční produkce energie se předpokládala 20500 kWh. Skutečná výše roční produkce energie byla velmi proměnlivá, její průměrná hodnota však dosahovala jen 4230 kWh. Projekt byl však od začátku zamýšlen jako testovací, tudíž i tak je hodnocen velmi pozitivně. Návratnost investice se kvůli povaze projektu nekalkulovala.

- Z projektu nelze jednoznačně určit, která turbína dosáhla nejlepších výsledků, jelikož všechny turbíny se během průběhu projektu potýkaly s různými technickými problémy. Hodnotné zkušenosti a data z měření byly sdíleny s odborníky po celém světě k dalšímu studiu větrné energetiky.



Obrázek 4.3 Boston Museum of Science [45]

4.4 Navy Yard – Brooklyn, New York

- Projekt zahrnoval instalaci šesti turbín AeroVironment AVX1000 na střechu budovy námořních sil v Brooklynu v roce 2008. Celková cena projektu se vyšplhala na 39000 \$.
- Cíle projektu byly propagace větrné energie a ušetřit peníze za energii v takové výši, aby se časem pokryly náklady na instalaci. Skutečná produkce energie byla však během sledovaného období přibližně 50x nižší než předpokládaná, tudíž se cíl pokrýt náklady na instalaci nesetkal s úspěchem. Turbíny byly dokonce po nějakém čase demontovány, protože náklady na údržbu byly velice vysoké.
- Projekt skončil jako neúspěšný, jelikož vítr dosahoval minimální potřebné rychlosti větru pouze pár minut denně. Při instalaci byla též dána přednost místu s lepší viditelností turbín namísto místa, kde byl nejsilnější vítr.



Obrázek 4.4 Brooklyn Navy Yard [46]

4.5 Pearson Court Square – Long Island City, New York

- V projekt realizovaném ve Městě Long Island City byly instalovány 3 turbíny VisionAIR5 na střechu obytné budovy. Instalace byla dokončena roku 2015 a finančně vyšla přibližně na 185000 \$ včetně instalace podpůrné ocelové konstrukce.
- Za hlavní cíl bylo považováno prosazování udržitelných postupů výroby energie. Předpokládaná produkce se kalkulovala na 6000 kWh. Aktuální produkce nebyla zaznamenána, jelikož v době vyhodnocování byl projekt ještě v poměrně rané fázi. Návratnost investice nebylo tudíž též možné stanovit.
- Projekt měl prodlevu mezi instalací a samotným uvedením do provozu kvůli táhlému schvalovacímu procesu s místní společností poskytující elektrickou energii. Po této zkušenosti projekt manager radí řešit podobné náležitosti s dostatečně velkým předstihem. Podotýká také, že bylo náročné najít na instalaci firmu, která by měla s podobným projektem zkušenosti.



Obrázek 4.5 Pearson Court Square [47]

4.6 NASA Building 12 – Houston, Texas

- V případě tohoto projektu byly instalovány 4 turbíny Eddy GT od firmy Urban Green Energy. Instalace se realizovala na střechě budovy 12 ve vesmírném středisku NASA v roce 2014. Cena turbín vyjma elektrické instalace byla okolo 100000 \$.
- Mezi cíle patřilo především poskytnout vysoce viditelný vzdělávací a demonstrační prvek, který využívá novou formu výroby obnovitelné energie a zvýšit tím povědomí o této problematice. Další cíle pak byly produkovat energii v místě spotřeby a splnit normy týkající se výroby energie z obnovitelných zdrojů ve federálních budovách. Předpokládaná produkce energie se odhadovala na 1250 kWh za rok. Skutečná hodnota roční vygenerované energie nebyla v době zhodnocení projektu k dispozici, jelikož projekt nebyl v provozu potřebně dlouho,

avšak během jednoho měsíce měření se produkce ani zdaleka nepřiblížila poměrné hodnotě z té odhadované.

- Developeri projektu hodnotí projekt jako neúspěšný převážně kvůli výběru nevhodné lokality s nízkými rychlostmi větru. Návratnost investice považují též za nedosažitelnou. Vývojáři projektu míní, že aby byl projekt úspěšný, měl by předcházet pečlivý průzkum s reálnými měřeními přímo z místa instalace. Poukázali též na to, že výběr místa pro instalaci turbín byl velmi omezený kvůli velkému množství historických budov, které se právě ve vesmírném středisku nacházejí.



Obrázek 4.6 Turbíny na střeše NASA Building 12 [36]

4.7 Důležité poznatky vyplývající z kapitoly

V kapitole byly popisovány zkušenosti z několika projektů, které řešily instalaci větrných turbín v městském zastavěném prostředí. Přestože míra energetických přínosů byla zpravidla vždy nižší než očekávaná, hodnotí většina developerů projekt jako pozitivní. V řadě projektů bylo cílem také instalací větrných turbín zvýšit atraktivitu dané lokality a rozšířit veřejné povědomí o využití obnovitelných zdrojů ke generování elektrické energie. Tyto cíle byly v podstatě vždy splněny. Často se však turbíny potýkaly s technickými problémy, které byly občas zveličeny nezkušeností nebo dokonce krachem společnosti, která měla projekt na starosti. Servis se tudíž stával náročným.

5 Kalkulace energetických přínosů zvolené větrné turbíny a porovnání s FV panely

Následující kapitola se bude zabírat výpočtem energetických přínosů vybrané turbíny a následně fotovoltaických panelů ve zvoleném městském prostředí. K výpočtu byla vybrána nejdříve větrná turbína a podle její ceny byl vybrán určitý počet fotovoltaických panelů ve stejné cenové hodnotě. Jelikož se tato práce nebude blíže zabírat elektrickým zapojením a v cenové hodnotě je porovnávána pouze samotná větrná turbína a cenově adekvátní počet fotovoltaických panelů, může se cena funkčního celku ve výsledku lišit. Cílem práce je však porovnat získávání energie ze dvou obnovitelných zdrojů a zjistit, jak by fungovaly v daném prostředí při daných podmínkách. Pro demonstraci výpočtu byla zvolena brněnská městská část Žabovřesky, protože nejvíce vyhovuje specifikaci zastavěného městského prostředí. Výpočet však byl proveden pro více okolních lokalit reprezentujících městské prostředí.

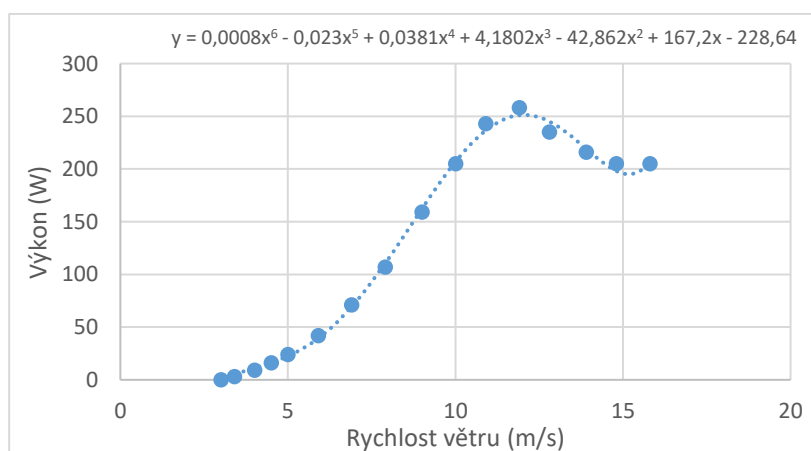
5.1 Větrná turbína Air 40

K provedení výpočtů byla zvolena větrná turbína Air 40 od Americké firmy Primus Windpower. Firma se pohybuje na trhu s větrnými turbínami již přes 25 let a má na svědomí přes 150000 instalací [48]. Jelikož firmy vyrábějící větrné turbíny jsou často start-up společnosti, které nemají dlouhého trvání jejich existence a následný servis je velice obtížný a finančně náročný, jak je popsáno v předešlé kapitole, byla tradice firmy jedno z klíčových kritérií pro výběr větrné turbíny k výpočtu. V následující tabulce jsou uvedeny technické parametry a v následujícím grafu výkonová křivka dané větrné turbíny udávané výrobcem [48].

Tabulka 5.1 Technické parametry větrné turbíny Air 40 [49]

Větrná turbína - Air 40 Primus Windpower

Výstupní výkon	Cca. 40 kWh/měsíc při 5,5 m/s
Maximální výkon	160 W
Typ rotoru	3 lopatky s horizontální osou rotace
Průměr rotoru	1,17 m
Hmotnost	5,9 kg
Minimální rychlost větru	3,1 m/s
Cena	1400 \$



Obrázek 5.1 Větrná turbína Air 40 [49] a graf výkonové křivky udávaný výrobcem [48]

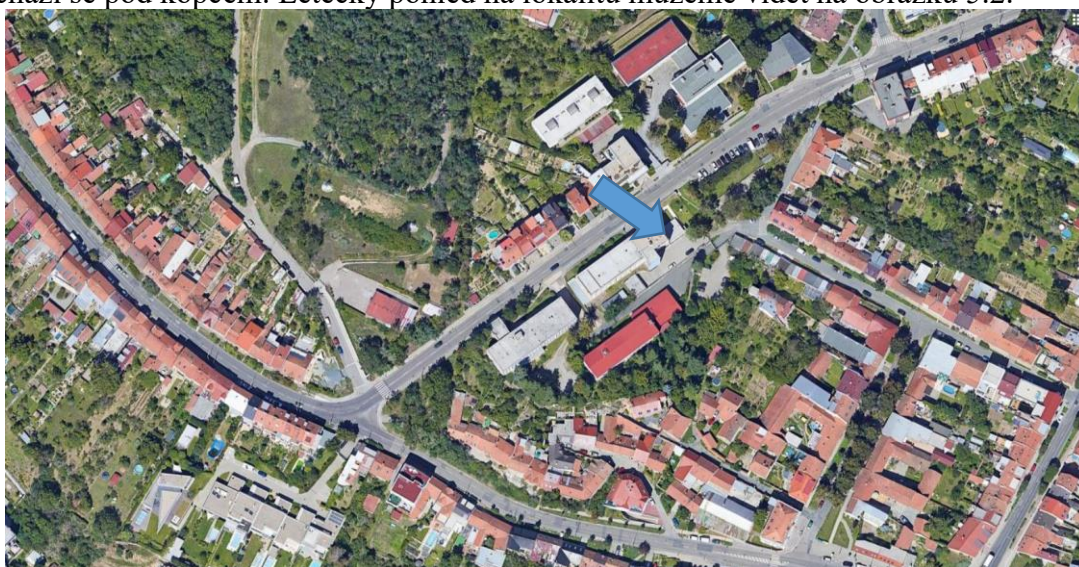
Z grafu výkonové křivky udávané výrobcem byla proložením bodů polynomem 6. stupně získána rovnice vyjadřující výkon turbíny v závislosti na rychlosti větru. Jedná se pouze o aproximaci, avšak na potřeby použití této práce je přesnost dostačující. K přesnějším výpočtům by bylo nutné znát přímý předpis funkce výkonové křivky. Funkce má následující tvar:

$$y = 0,0008x^6 - 0,023x^5 + 0,0381x^4 + 4,1802x^3 - 42,862x^2 + 167,2x - 228,64 \quad (5.1)$$

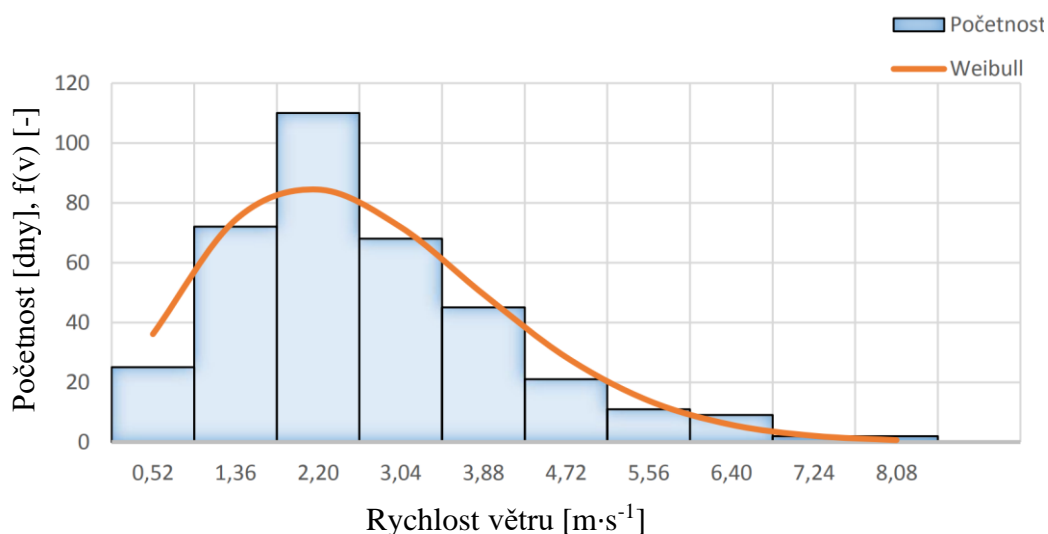
Dále byla k výpočtu zapotřebí Weibullova funkce, která vyjadřuje četnost rychlostí větru v dané oblasti z naměřených hodnot. Pro výpočet byla vybrána Weibullova funkce pro městskou část Brno-Žabovřesky vycházející z [50].

5.1.1 Brno-Žabovřesky

První zkoumaná oblast byla městská část Brno-Žabovřesky. Oblast je poměrně hustě zastavěná a nachází se pod kopcem. Letecký pohled na lokalitu můžeme vidět na obrázku 5.2.



Obrázek 5.2 Letecký pohled na lokalitu prováděného měření [51]



Obrázek 5.3 Histogram absolutních četností rychlostí větru a křivka Weibullovy funkce [50]

Relativní distribuční Weibullova funkce má následující tvar [50]:

$$f(v) = \frac{1,936}{3,044} \left(\frac{v}{3,044} \right)^{1,936-1} \cdot \exp \left(- \left(\frac{v}{3,044} \right)^{1,936} \right) \quad [-] \quad (5.2)$$

Vynásobením výše uvedené relativní distribuční Weibullové funkce počtem měření (365) a délkou střidy (0,84), která vychází rovněž z naměřených údajů, získáme Absolutní Weibullovu funkci, s kterou již můžeme následně počítat [50]. Pro výpočet bylo uvažováno, že uváděný vítr vane uvedenou rychlostí jen polovinu dne (12 h), jelikož celodenní výskyt větru o změřené rychlosti je značně nepravděpodobný. Konečný vztah pro výpočet energetického zisku za uplynulý rok je potom následující.

$$E = \int_0^{8,08} (0,0008v^6 - 0,023v^5 + 0,0381v^4 + 4,1802v^3 - 42,862v^2 + 167,2v - 228,64) \cdot \left(\frac{1,936}{3,044} \left(\frac{v}{3,044} \right)^{1,936-1} \cdot \exp \left(- \left(\frac{v}{3,044} \right)^{1,936} \right) \right) \cdot (365 \cdot 0,84) \cdot (12 \cdot 60 \cdot 60) dv \quad [J] \quad (5.3)$$

$$E = 3,784438874080957 \cdot 10^8 \quad [J]$$

$$E_{rok\ celk} = \frac{3,784438874080957 \cdot 10^8}{1000 \cdot 60 \cdot 60} \quad [kWh]$$

$$E_{rok\ celk} = 105,1233021 \quad [kWh]$$

$$E_{rok\ celk} \cong 105,1 \quad [kWh]$$

Celková roční produkce energie větrnou turbínou Air 40 pro lokalitu Brno-Žabovřesky vyšla 105,1 kWh.

5.1.2 Lednice, Jihomoravská kraj

Další lokalita, pro kterou byl proveden výpočet, je okrajová část obce Lednice. Zástavba zde není tak hustá jako v případě předešlé lokality, avšak povrch této lokality je též poměrně členitý.



Obrázek 5.4 Letecký pohled na lokalitu prováděného měření [51]

Relativní distribuční Weibullova funkce [52]:

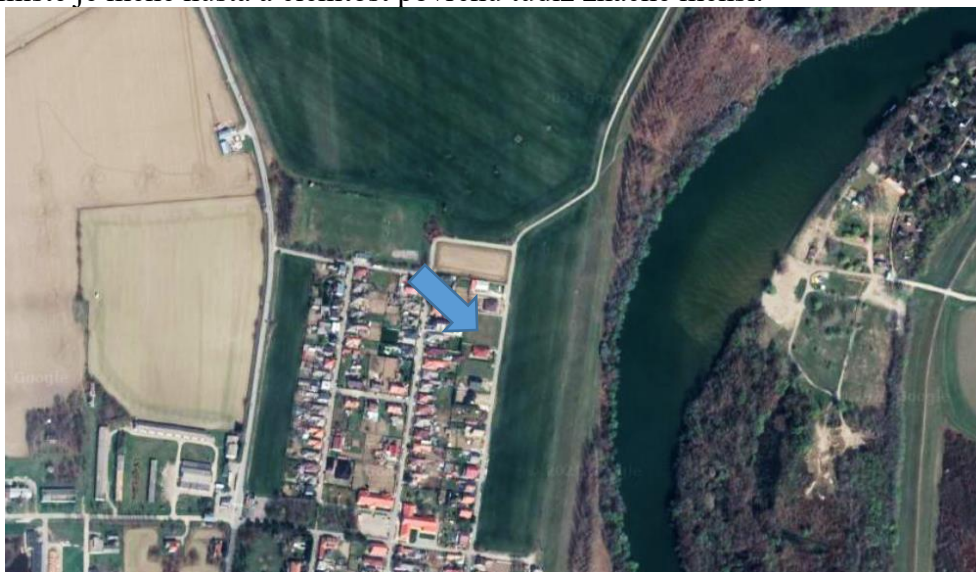
$$f(v) = \frac{2,137}{3,357} \left(\frac{v}{3,357} \right)^{2,137-1} \cdot \exp \left(- \left(\frac{v}{3,357} \right)^{2,137} \right) \quad [-] \quad (5.4)$$

$$E_{rok\ celk} \cong 69,6 \text{ [kWh]}$$

Celková roční produkce energie větrnou turbínou Air 40 pro lokalitu Lednice v Jihomoravském kraji vyšla 69,6 kWh.

5.1.3 Dedina Mládeže, Nitrianský kraj, Slovensko

Poslední lokalitou pro výpočet byla menší vesnice Dedina mládeže na Slovensku. Zástavba v tomto místě je méně hustá a členitost povrchu tudíž značně menší.



Obrázek 5.5 Letecký pohled na lokalitu prováděného měření [51]

Relativní distribuční Weibullova funkce [53]:

$$f(v) = \frac{1,82}{3,51} \left(\frac{v}{3,51} \right)^{1,82-1} \cdot \exp \left(- \left(\frac{v}{3,51} \right)^{1,81} \right) \quad [-] \quad (5.5)$$

$$E_{rok\ celk} \cong 218,1 \text{ [kWh]}$$

Celková roční produkce energie větrnou turbínou Air 40 pro lokalitu slovenské vesnice Dedina Mládeže vyšla 218,1 kWh.

5.2 Fotovoltaický panel Q.Peak DUO-G8+

Pro výpočet energetických přínosů fotovoltaickými panely bylo zvoleno celkem 6 monokrystalických panelů Q.Peak DUO-G8+ od firmy Q CELLS sídlící v Německu [54]. Při výběru panelů byl kladen důraz na snadnou dostupnost a vysokou účinnost. Také bylo klíčové, aby zvolené větrné turbíně cenově odpovídal konečný počet fotovoltaických panelů. Technické údaje vybraného fotovoltaického panelu jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 5.2 Technické parametry fotovoltaického panelu Q.peak DUO-8G+ [54]

Fotovoltaický panel - Q.Peak DUO-G8+	
Plocha 1 panelu	1,7922 m ²
Účinnost panelu	19,5 %
Cena za 1 panel	230 \$
Počet panelů (za 1400 \$)	6
Plocha celkem	10,7532 m ²

Pro výpočet množství dopadající energie na panely byl použit vzorec [55] a patřičné výpočtové tabulky [56] odpovídající zeměpisné poloze naší zkoumané lokality. Orientace solárních panelů byla zvolena na jih při náklonu 45°, protože tato orientace pro naši zeměpisnou šířku je, co se týče energetických zisků v průběhu roku, nejvýhodnější.

Tabulka 5.3 Souhrn vlastností k výpočtu pro naši lokalitu (Brno) [56]

Brno; Jih 45°	Q _{S den teor} [kW·h·m ⁻²]	Q _{D den} [kW·h·m ⁻²]	$\bar{\tau}$ [-]	Počet dní [-]	Q _{S den} [kW·h·m ⁻²]	Q _{S měsíc} [kW·h·m ⁻²]
Leden	3,40	0,48	0,18	31	1,0056	31,1730
Únor	4,96	0,69	0,31	28	2,0137	56,3836
Březen	6,70	0,97	0,38	31	3,1474	97,5694
Duben	8,06	1,22	0,39	30	3,8876	116,6280
Květen	9,42	1,40	0,48	31	5,2496	162,7376
Červen	9,64	1,45	0,53	30	5,7907	173,7210
Červenec	9,42	1,40	0,56	31	5,8912	182,6272
Srpen	8,06	1,22	0,53	31	4,8452	150,2012
Září	6,70	0,97	0,50	30	3,8350	115,0500
Říjen	4,96	0,69	0,37	31	2,2699	70,3669
Listopad	3,40	0,48	0,23	30	1,1516	34,5480
Prosinec	2,70	0,40	0,12	31	0,6760	20,9560

Nejdříve se z údajů tabulky za pomoci vzorce vypočítá množství dopadající energie za jeden den v měsíci. Optické ztráty vlivem nekolmého úhlu dopadu slunečního záření během roku na fotovoltaické moduly nejsou v rovnici zohledněny [57], jelikož výrobce uvádí zohlednění těchto ztrát v účinnosti daného panelu [54].

Vzorový výpočet pro leden [55]:

$$Q_{S \text{ den}} = (\bar{\tau} \cdot Q_{S \text{ den teor}} + (1 - \bar{\tau}) \cdot Q_{D \text{ den}}) \text{ [kWh/m}^2\text{]} \quad (5.6)$$

$$Q_{S \text{ den}} = (0,18 \cdot 3,40 + (1 - 0,18) \cdot 0,48) \text{ [kWh/m}^2\text{]}$$

$$Q_{S \text{ den}} = 1,0056 \text{ [kWh/m}^2\text{]}$$

Hodnota dopadající energie za den pro určitý měsíc se vynásobí počtem dní v tomto měsíci a tím se získá množství dopadající energie za celý měsíc.

$$Q_{S \text{ měsíc}} = Q_{S \text{ den}} \cdot (\text{počet dní}) \text{ [kWh/m}^2\text{]} \quad (5.7)$$

$$Q_{S \text{ měsíc}} = 1,0056 \cdot 31 \text{ [kWh/m}^2\text{]}$$

$$Q_{S \text{ měsíc}} = 31,17 \text{ [kWh/m}^2\text{]}$$

Energetické příspěvky z jednotlivých měsíců se následně sečtou, čímž vyjde hodnota dopadající energie na fotovoltaické panely za celý rok.

$$Q_{S \text{ rok}} = \sum Q_{S \text{ měsíc}} \quad (5.8)$$

$$Q_{S \text{ rok}} = (31,17 + 56,38 + 97,57 + 116,63 + 162,74 + 173,72 + 182,63 + 150,20 + 115,05 + 70,37 + 34,55 + 20,96) \text{ [kWh/m}^2\text{]}$$

$$Q_{S \text{ rok}} = 1211,96 \text{ [kWh/m}^2\text{]}$$

Po vynásobení této hodnoty plochou a účinnostním činitelem fotovoltaických panelů vychází již konečná hodnota celkové energie, kterou fotovoltaické panely dodají do systému za rok.

$$E_{\text{rok celk}} = Q_{S \text{ rok}} \cdot (\text{plocha}) \cdot (\text{účinnost}) \text{ [kWh]} \quad (5.9)$$

$$E_{\text{rok celk}} = 1211,96 \cdot 10,75 \cdot 0,195 \text{ [kWh]}$$

$$E_{\text{rok celk}} = 2541,3 \text{ [kWh]}$$

Celkový energetický zisk ze 6 solárních panelů Q.Peak DUO-G8+ za celý rok vyšel na 2541,3 kWh.

5.3 Porovnání výsledků a důležité poznatky vyplývající z kapitoly

V kapitole byly vypočítány energetické přínosy pro větrnou turbínu Air 40 a 6 fotovoltaických panelů Q.Peak DUO-G8+. Výpočet energetických zisků vyprodukovaných turbínou byl počítán pro 3 lokality. První zkoumanou lokalitou byla městská část Brno-Žabovřesky s poměrně hustou zástavbou, kde roční energetický výnos vyšel 105,1 kWh. V případě druhé lokality se jednalo o okraj obce Lednice se středně hustou zástavbou, kde roční energetický výnos vyšel 69,6 kWh. Poslední zkoumanou lokalitou byla odlehlejší vesnice Dedina Mládeže, kde je zástavba méně hustá a roční energetický výnos zde vyšel 218,1 kWh. Následně byl proveden výpočet energetických přínosů panelů pro odpovídající polohu jedné z lokalit. Vybrána byla brněnská lokalita. Celkový roční energetický přínos byl vykalkulován na 2541,3 kWh.

Porovnání výsledných hodnot energetických zisků zvolené turbíny a fotovoltaických panelů vychází s velkou rezervou ve prospěch fotovoltaických panelů. Skutečné hodnoty se však mohou značně lišit od těch vypočítaných, protože skutečnou produkci může negativně ovlivňovat mnoho faktorů, které nebyly započteny. Velké omezení může být například dáno velkou plochou panelů, či v nemožnosti instalace fotovoltaických panelů do ideální orientace, na jih, se sklonem 45°. Místo, kde jsou fotovoltaické panely nainstalovány, může být též během určité části dne stíněno jiným, vyšším objektem. Dále může být účinnost fotovoltaických systémů snížena ztrátami různého charakteru, například ztrátami v elektrickém vedení. Může být také snížena průhlednost panelů vlivem napadaného prachu, či degradací krycího materiálu. V každém případě však můžeme použití fotovoltaických panelů ve většině oblasti České republiky považovat za výhodnější, a to převážně kvůli absenci větru s větší rychlostí. Pro

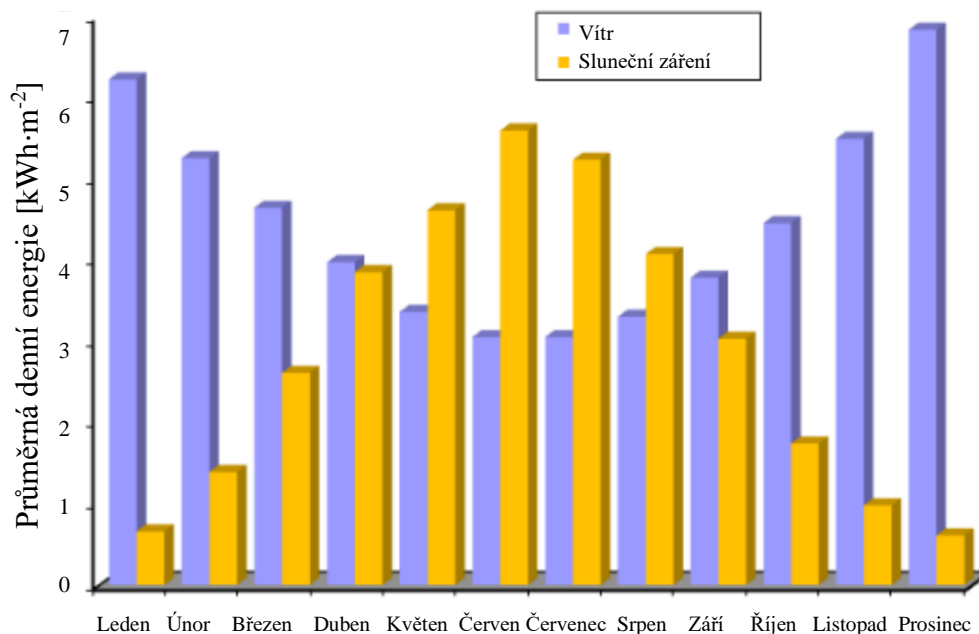
přímořské nebo vysoce položené oblasti by výsledek pravděpodobně nebyl tak jednoznačný. Použití větrné turbíny však má i přes menší energetický zisk své uplatnění. Větrné turbíny mohou být velice kompaktní a jejich použití může být velmi vhodné například při cestování, nebo na horských chatách.



Obrázek 5.6 Větrná turbína Air 40 generující elektrickou energii pro karavan a chatu [58]

5.3.1 Spolupráce větrné turbíny s fotovoltaickým panelem

Jako nejvýhodnější varianta se jeví spolupráce obou zdrojů obnovitelné energie, jelikož se vzájemně dobře doplňují. Zpravidla totiž fouká vítr převážně, když nesvíí moc slunce a naopak. Tudíž pokud chceme dosáhnout co možná největší energetické nezávislosti, je použití větrných turbín v zimním období více než vhodné. Vyvážení energetických zisků z větru a slunce můžeme pozorovat na následujícím grafu.



Obrázek 5.7 Měsíční průměry střední denní energie slunečního záření a větru [59]

6 Závěr

Práce se zabývala malými větrnými turbínami a jejich instalací v městském prostředí. Použití větrných turbín v zastavěném prostředí může být kvůli specifickému proudění vzduchu velmi obtížné, jak je popsáno na začátku práce. Městská zástavba svou členitostí zmenšuje rychlost větru a má za následek větší výskyt turbulentního proudění. Oba tyto faktory negativně ovlivňují správný chod turbín a snižují jejich výkon.

Následující část práce se věnovala základnímu popisu větrných turbín a jejich principu funkce. S ohledem na poznatky vyplývající z první kapitoly byly vybrány větrné turbíny, které jsou díky svým vlastnostem potenciálně vhodné nebo přímo navržené pro specifickou povahu městského prostředí. Dále byly navrženy postupy, jak zvýšit ve městě efektivitu těchto turbín a redukovat negativní vlivy proudění vzduchu. Nejmodernějším a nejspíše i nejefektivnějším řešením je zakomponování větrných turbín do výškové budovy již při návrhu projektu.

Další část této práce se zabírala zjišťováním zkušeností ze skutečných instalací větrných turbín. Turbíny většinou nesplnily předpoklad výše energetického výnosu a potýkaly se s technickými problémy, které byly většinou způsobeny nezkušeností firmy zajišťující projekt. Ze zkušeností popsaných v této kapitole též vyplývá, že detailnějším měřením rychlosti větru a celkově zkoumáním povahy proudění vzduchu v daném místě, by mohla být následná kalkulace energetických přínosů přesnější a projekty lépe koncipované.

V závěrečné fázi práce byly kalkulované přínosy vybranou turbínou a fotovoltaickými panely v určité oblasti, která svou povahou vyhovuje členité městské zástavbě. Vykalkulovaný energetický přínos větrnou turbínou byl několikanásobně nižší než fotovoltaickými panely. Jelikož je ale využití větrné energie poměrně novou technologií, která se neustále vyvíjí, můžeme v tomto ohledu do budoucna očekávat zlepšení. Velice dobrých výsledků dosahuje například kombinace větrných turbín s fotovoltaickými panely a do budoucna je možné předpokládat vývoj v tomto směru.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] NEMEŠOVÁ, Ivana a Jan PRETEL. *Skleníkový efekt a životní prostředí: podstata, rizika, možná řešení a mezinárodní souvislosti*. Praha: Ministerstvo životního prostředí ČR, 1998. ISBN 80-7212-046-8.
- [2] RYCHETNÍK, Václav, Jiří PAVELKA a Josef JANOUŠEK. *Větrné motory a elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01563-7.
- [3] LAXTON, Dali T. *Innovations in the wind energy sector*. Prague: CERGE-EI, 2019. Working paper series. ISBN 978-80-7343-454-0.
- [4] ŠKORPÍK, Jiří. Využití energie větru, *Transformační technologie*, 2006-10, [last updated 2020-10-23]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. [cit. 2021-2-06] Dostupné z <https://www.transformacni-technologie.cz/04.html>.
- [5] MASDI, Septian Khairul. *Computational Fluid Dynamic untuk Aliran Internal* [online]. 2012 [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: <https://septiankmasdi.wordpress.com/>.
- [6] CLARKE, Steve; ENG, P. *Electricity Generation Using Small Wind Turbines for Home or Farm Use*. *Vitattu*, 2018, 19.2020: 18-005.
- [7] Global Wind Atlas [online]. 2021 [cit. 2021-2-06]. Dostupné z: <https://globalwindatlas.info/>
- [8] ABOHELA, Islam; HAMZA, Neveen; DUDEK, Steven. *Effect of roof shape, wind direction, building height and urban configuration on the energy yield and positioning of roof mounted wind turbines*. *Renewable Energy*, 2013, 50: 1106-1118.
- [9] JACOBSEN, Heidi Serny. *WASP-the Wind Analysis and Application Program* [online]. 2020 [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: <https://www.wasp.dk/wind-atlas#world>
- [10] TOJA-SILVA, Francisco, et al. *A review of computational fluid dynamics (CFD) simulations of the wind flow around buildings for urban wind energy exploitation*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 180: 66-87.
- [11] ALLEN, D. J., et al. *A boundary layer scaling technique for estimating near-surface wind energy using numerical weather prediction and wind map data*. *Applied energy*, 2017, 208: 1246-1257.
- [12] BARTKO, J. *Vlivy větrných elektráren na kvalitu elektrické energie*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Malý.
- [13] BARTÁK, Martin. *Malé větrné elektrárny AERPLAST s.r.o.* [online]. [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: <http://www.vetrne-elektrarny.eu/>.
- [14] AVAS, Export Import spol. s r.o., ed. *Vertikální větrné turbíny* [online]. 2002-21 [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: <http://www.wind-systems.eu/vertikalni-vetrne-turbiny-hivawt.php>.
- [15] Redakce Proelektrotechniky.cz. *GE Haliade X: největší větrná turbína na světě* [online]. 2020 [cit. 2021-2-06]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/obnovitelne-zdroje/134.php>.
- [16] *Port of Rotterdam: Meanwhile at the Maasvlakte...* [online]. 2019 [cit. 2021-2-07]. Dostupné z: <https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/meanwhile-at-the-maasvlakte>.
- [17] *WaterLily Turbine* [online]. [cit. 2021-5-08]. Dostupné z: <https://www.waterlilyturbine.com/>.
- [18] *Větrná elektrárna – účinnost, jak funguje* [online]. 2020 [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: <https://www.frieco.org/vetrna-elektrarna-ucinnost-jak-funguje/>.
- [19] *Větrné elektrárny podrobně* [online]. [cit. 2021-4-18]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie/vetrne-elektrarny-podrobne>.

- [20] ISHUGAH, T. F., et al. Advances in wind energy resource exploitation in urban environment: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2014, 37: 613-626.
- [21] *Renewable Devices* [online]. [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <http://www.renewabledevices.com/>.
- [22] *Micro Wind Turbines: Eclectic Energy StealthGen/D400 400W Industrial Wind Generator* [online]. [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.renugen.co.uk/eclectic-energy-stealthgen-d400-400w-industrial-wind-generator/>
- [23] Small Wind Turbines - Montana. *Fortis wind energy* [online]. 2013-21 [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: <https://www.fortiswindenergy.com/montana/>.
- [24] *Scirocco E5.6-6: Best Wind Technology for Highest Performance* [online]. 2007 [cit. 2021-3-16]. Dostupné z: https://s1.solacity.com/docs/Scirocco%20V02d_Eng.pdf.
- [25] *Small Wind Turbines: Wind Energy Solutions WES5 TULIPO 2.5 KW Wind Turbine* [online]. [cit. 2021-3-16]. Dostupné z: <https://www.renugen.co.uk/wind-energy-solutions-wes5-tulipo-2-5-kw-wind-turbine-discontinued/>.
- [26] *Loopwing Wind Power Generator Set* [online]. 2006 [cit. 2021-3-18]. Dostupné z: <https://www.tamiya.com/english/products/75021loopwing/index.htm>.
- [27] *Pitsco Education-Loopwing Wind Power Generator Set* [online]. [cit. 2021-4-20]. Dostupné z: <https://www.pitsco.com/Shop/Sustainable-Energy/Loopwing-Wind-Power-Generator-Set>.
- [28] Energy ForEver s.r.o. *Větrné elektrárny: Windtronics* [online]. 2010 [cit. 2021-4-20]. Dostupné z: <http://www.energyforever.cz/cz/sluzby/vetrne-elektrarny/windtronics/>.
- [29] Re-inventing „the Windmill.” *Herox* [online]. [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://www.herox.com/blog/501-noiseless-wind-turbines-unveiledNoiseless>.
- [30] Wind Turbines Unveiled. *Herox* [online]. [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://www.herox.com/blog/501-noiseless-wind-turbines-unveiled>.
- [31] SpiralAirFoil Wind Turbine: The evolution of the wind turbine from prop to jet. *SpiralAirFoil* [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://spiralairfoil.weebly.com/>.
- [32] *SpiralAirFoil* [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://gust.com/companies/spiralairfoil>.
- [33] SpiralAirFoil: Vertical Axis Wind Turbine: All You Wanted to Know. *WindML* [online]. 2020 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://www.windml.org/vertical-axis-wind-turbine/>.
- [34] Darrieus Rotor. *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. 2014 [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Darrieus-Rotor_Ennabeuren-3256.jpg.
- [35] STATHOPOULOS, Ted, et al. Urban wind energy: Some views on potential and challenges. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 179: 146-157.
- [36] FIELDS, Jason, et al. *Deployment of wind turbines in the built environment: risks, lessons, and recommended practices*. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2016.
- [37] PAGNINI, Luisa C.; BURLANDO, Massimiliano; REPETTO, Maria Pia. Experimental power curve of small-size wind turbines in turbulent urban environment. *Applied Energy*, 2015, 154: 112-121.
- [38] JUAN, Y.-H., et al. Numerical assessments of wind power potential and installation arrangements in realistic highly urbanized areas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 135: 110165.

- [39] Venturi effect. *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. 2017 [cit. 2021-5-05]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Venturi_effect.
- [40] DILIMULATI, Aierken; STATHOPOULOS, Ted; PARASCHIVOIU, Marius. Wind turbine designs for urban applications: A case study of shrouded diffuser casing for turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 175: 179-192.
- [41] SARI, Dany Perwita; KUSUMANINGRUM, Wida Banar. A technical review of building integrated wind turbine system and a sample simulation model in central java, Indonesia. *Energy Procedia*, 2014, 47: 29-36.
- [42] Bladeless Wind Energy. *Vortex Bladeless* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://vortexbladeless.com/>.
- [43] Vortex Bladeless Wind Turbines. *Environment Buddy* [online]. 2020 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.environmentbuddy.com/energy/wind-energy/vortex-bladeless-wind-turbines/>.
- [44] Twelve West. *The American Institute of Architects* [online]. [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: <https://www.aiaopten.org/node/107>.
- [45] *Museum Of Science: Environmental Sustainability* [online]. [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: <https://www.mos.org/environmental-sustainability>.
- [46] A walk about Wallabout. *The Weekly Nabe* [online]. 2012 [cit. 2021-4-18]. Dostupné z: <http://theweeklynabe.com/2012/04/30/a-walk-about-wallabout-and-brooklyn-navy-yard/>.
- [47] Pearson Court Square. *SLCEArchitects* [online]. 2019 [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: <https://www.slcearch.com/project/pearson-court-square-pearson-street/>.
- [48] Wind Power Turbine Solutions. *PrimusWindpower* [online]. 2013 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.primuswindpower.com/>.
- [49] AIR 40 Off Grid Wind Turbine. *EcoPowerShop* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.ecopowershop.com/air-40-wind-turbine-12v-wind-generator>.
- [50] LINDA, Jakub. Větrné stroje pro obydlené oblasti. Brno, 2020. 147 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125724>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Škorpík.
- [51] Google Maps. *Google* [online]. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.google.cz/maps>
- [52] CHROMECC, T. Aerodynamický návrh větrné turbíny pro zvolenou lokalitu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 113 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.
- [53] ŽABKA, M. Aerodynamický návrh větrné turbíny pro zvolenou lokalitu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 99 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Škorpík, Ph.D..
- [54] Q.PEAK DUO-G8+: Maximum Performance & Outstanding Efficiency. *QCells* [online]. 2017 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: https://www.q-cells.com/en/main/products/solar_panels/G8/G8_series01.html.
- [55] ŠKORPÍK, Jiří. Sluneční záření jako zdroj energie, *Transformační technologie*, 2006-09, [last updated 2020-10-22]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. [cit. 2021-5-12] Dostupné z <https://www.transformacni-technologie.cz/02.html>.
- [56] CIHELKA, Jaromír. *Solární tepelná technika*. Praha: T. Malina, 1994. ISBN 80-900759-5-9.

- [57] MATUŠKA, Tomáš doc. Ing., Ph.D. *Fotovoltaika: Zjednodušený bilanční výpočet ročních přínosů fotovoltaických instalací* [online]. 2016 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/13878-zjednodusen-y-bilancni-vypocet-rocnich-prinosu-fotovoltaicky-ch-instalaci>.
- [58] Generador Eolico Primus Windpower Air-40 (USA). *Mercado Libre* [online]. [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: https://articulo.mercadolibre.com.uy/MLU-466847802-generador-eolico-primus-windpower-air-40-usa-_JM.
- [59] Popisná statistika. Mathonline [online]. Brno: Ústav Matematiky, 2005 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <http://mathonline.fime.vutbr.cz/Popisna-statistika/sc-1146-sr-1-a-139/default.aspx>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Význam	
CFD	Computational fluid dynamics (Výpočetní dynamika tekutin)	
GWA	Global wind atlas (Globální atlas větru)	
HAWT	Horizontal axis wind turbines (Turbíny s horizontální osou)	
VAWT	Vertical axis wind turbines (Turbíny s vertikální osou)	

Symbol	Veličina	Jednotka
c_p	Součinitel výkonu	[-]
$E_{rok\ celk}$	Roční energetický zisk	[kW·h]
h	Výška umístění měřiče rychlosti větru	[m]
h_0	Požadovaná výška	[m]
n	Exponent korekčního vztahu závisující na drsnosti povrchu	[-]
P_s	Výkon	[W]
P_v	Měrný výkon	[W·m ⁻²]
$Q_{D\ den}$	Energie difúzního záření	[kW·h·m ⁻²]
$Q_{S\ den}$	Energie dopadající na plochu za den	[kW·h·m ⁻²]
$Q_{S\ den\ teor}$	Teoreticky možná dopadající energie na plochu za den	[kW·h·m ⁻²]
$Q_{S\ měsíc}$	Energie dopadající na plochu za měsíc	[kW·h·m ⁻²]
$Q_{S\ rok}$	Energie dopadající na plochu za rok	[kW·h·m ⁻²]
S	Průtočná plocha	[m ²]
v	Rychlost větru	[m·s ⁻¹]
v_0	Rychlost větru v požadované výšce h_0	[m·s ⁻¹]
$\bar{\tau}$	Poměrná doba slunečního svitu	[-]
ρ	Hustota vzduchu	[kg·m ⁻³]