VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV

INSTITUTE OF BUILDING SERVICES

VYUŽITÍ ENERGIE VĚTRU NA PLOCHÝCH STŘECHÁCH BUDOV

WIND ENERGY USE ON FLAT ROOFS OF BUILDINGS

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE — Ing. Eliška Tůmová

AUTHOR

ŠKOLITEL — prof. Ing. Jiří Hirš, CSc.

SUPERVISOR

BRNO 2022

ABSTRAKT

Disertační práce je zaměřena na stanovení metody, jíž je možné určit potenciál využití energie větru na plochých střechách budov. V reakci na potřebu snížit produkci emisí CO_2 a zvýšení energetické soběstačnosti je vhodné v co největší míře užít alternativní systémy dodávek energie a její obnovitelné zdroje. Bylo provedeno dlouhodobé i krátkodobé měření parametrů větru pro ověření výsledných obrazů rychlosti proudění simulace. Na základě definovaných vstupních parametrů a vyhotovené simulace je stanovena výsledná hodnota potenciálu, a to možná produkce elektrické energie pro vybrané malé větrné elektrárny na střeše zvolené budovy za jeden rok. V práci jsou stanoveny jednotlivé kroky i ověření navržené metody.

ABSTRACT

The PhD thesis is focused on determination of the method by which it is possible to specify the wind energy use potential on building flat roofs. In response to the need to reduce the production of CO_2 emissions and increase energy self-sufficiency, it is necessary to use alternative energy supply systems and renewable resources as much as possible. Long-term and short-term wind parameters were measured to verify the of the resulting simulation velocity flow images. Based on the defined input parameters and the completed simulation, the resulting value of the potential is determined, namely the possible production of electricity for selected small wind power plants on the roof of the selected building during one year. In the thesis the individual steps of the method are stated and the verification of the established method is determined.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vítr, energie větru, obnovitelné zdroje, větrná elektrárna, simulace, měření, potenciál produkce elektrické energie

KEY WORDS

Wind, wind energy, renewable resources, wind power plant, simulation, measurement, potential of electrical energy production

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TŮMOVÁ, Eliška. *Využití energie větru na plochých střechách budov.* Brno, 2022. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/150740. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technických zařízení budov. Vedoucí práce Jiří Hirš.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že předložená disertační práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně, pod vedením prof. Ing. Jiřího Hirše, CSc.. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem ve své práci neporušila autorská práva (ve smyslu Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

V Brně dne ……

……..

Ing. Eliška Tůmová

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému školiteli, panu prof. Ing. Jiřímu Hiršovi, CSc., panu Ing. Janu Holešovskému, Ph.D., společnosti ENKI a panu Ing. Vladimíru Jirkovi, CSc., vědeckému centru AdMaS a jeho zaměstnancům za veškeré konzultace, zápůjčky vybavení a ochotu umožnit měření potřebná pro tuto disertační práci.

OBSAH

1 ÚVOD 10

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ V DANÉ OBLASTI 11

2.1 Předpoklady k užití obnovitelných zdrojů energie 11
2.1.1 Klimaticko-energetická koncepce EU 11
2.1.2 České předpisy 11
2.1.3 Stavba budov s téměř nulovou spotřebou energie 13
2.1.4 Vytváření chytrých měst a regionů 13
2.2 Proudění tekutin 14
2.2.1 Laminární proudění 14
2.2.2 Turbulentní proudění 15
2.2.3 Proudění větru 17
2.2.4 Princip vztlaku 19
2.3 Simulace proudění 20
2.3.1 Matematický základ modelů turbulence 20
2.3.2 Druhy modelů turbulence 21
2.3.3 Okrajové podmínky 22
2.4 Energie větru a její užití 25
2.4.1 Matematický model AV ČR 26
2.4.2 Druhy větrných elektráren 26
2.4.3 Výroba elektrické energie 29
2.4.4 Účinnost větrem poháněného stroje 31
2.5 Teorie chyb a nejistoty měření 33

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE 35

4 METODY ŘEŠENÍ 36

4.1 Návrh metody 36
4.2 Referenční budova 36
4.3 Experimentální část 38
4.3.1 Stanovení hodnot větru 38
4.3.2 Realizace referenčního měření 38
4.3.3 Srovnání výsledků dlouhodobého měření a hodnot z klimatického predikčního modelu 40
4.3.4 Realizace měření pro ověření simulace 42
4.3.5 Odchylky měření 44
4.4 Simulační část 44
4.4.1 Výběr simulačního softwaru 44
4.4.2 CFD model 45
4.4.3 Kvalita výpočetního modelu a sítě 46
4.4.4 Geometrický model 46
4.4.5 Parametry simulačního modelu 48

4.4.6 Srovnání variant pro užití ke stanovení potenciálu 48
5 STANOVENÍ POTENCIÁLU PRO VYBRANÝ OBJEKT 50
5.1 Zjištění parametrů budovy a okolí 50
5.2 Zjištění rychlosti větru a směru větru 50
5.3 Vytvoření modelu budovy a prostoru 53
5.4 Tvorba sítě 54
5.5 CFD simulace 55
5.6 Volba typu větrné elektrárny a výšky stožáru 56
5.7 Počet větrných elektráren 57
5.8 Analýza změn rozložení větrných sil dle umístění překážky 57
5.9 Určení výsledného potenciálu 59
6 LIMITY POUŽITÍ MALÝCH VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN 61
7 ZÁVĚR 62
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 64
9 SEZNAM OBRÁZKŮ 68
10 SEZNAM TABULEK 70
11 SEZNAM PŘÍLOH 71
12 SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ 72

1 ÚVOD

Dopad lidské činnosti na klimatické podmínky na naší planetě, včetně průměrných teplot, stále vzrůstá. Lidstvo neustále používá fosilní paliva, těží dřevo v deštných pralesích nebo navyšuje chov hospodářských zvířat. Naším působením tak vzniká obrovské množství skleníkových plynů, jež zvyšují objem přirozeně se vyskytujících plynů tohoto typu v atmosféře a zesilují skleníkový efekt. Podle odborníků na otázky klimatu je příčinnou globálního oteplování pozorovaného od poloviny 20. století téměř s jistotou lidská činnost. [13] Současná průměrná globální teplota je o 0,85ºC vyšší než ke konci 19. století. Teplotní záznamy se vedou již od roku 1850, přičemž tři poslední měřená desetiletí teplota stabilně stoupá. [14]

S nutností reagovat na již probíhající globální oteplování souvisí požadavek na snížení emisí CO_2. Pro dosažení snížení emisí CO_2 je potřebné navýšit úspory energie, zabývat se maximální efektivitou produkce energie, využitím obnovitelných zdrojů energie i produkcí elektrické energie na místě její potřeby tak, aby se eliminovaly ztráty přenosem. Evropská unie i OSN se reagují svojí politikou a strategií na globální oteplování např. Kjótským protokolem. EU se daří závazky stanovené v Kjótském protokolu plnit, aniž by v EU došlo ke snížení spotřeby obyvatelstva. Je však nutné v uvozovkách přivřít oči nad emisemi způsobenými produkcí dovezených výrobků z rozvojových zemí, které Kjótský protokol neratifikovaly. [16]

Obnovitelné zdroje energie, které jsou stále dostupné i v zastavěných oblastech ve své základní podobě jsou energie ze slunce a větru. Sluneční záření se již dnes využívá, ale energie větru je oproti tomu v pozadí. Malé větrné elektrárny jsou však velmi zajímavé i vzhledem k jejich životnímu cyklu. Zatímco fotovoltaické panely jsou, co se týče ekologické likvidace problematické, malé větrné elektrárny lze díky druhu použitých materiálů plně recyklovat.

U obytných budov se pro topení, chlazení a osvětlení v technologicky vyspělých státech stále spotřebuje přibližně 40 % veškeré produkované energie [16], což je podíl na emisích, který vyžaduje velkou pozornost. Potřeba zapojit majitele obytných budov i jejich obyvatele do snahy snížit emise tak neklesá. Pokud lze označit současnou společnost za komerční až konzumní (práce není jen zdrojem obživy ale zdrojem majetku a bohatství), ale se zájmem o životní prostředí [17], je třeba nabídnout taková řešení, která budou dlouhodobě udržitelná a pro veřejnost snadno uchopitelná a ucelená.

Dizertační práce se zabývá stanovením metody pro určení potenciálu využití větrné energie na střechách budov s plochou střechou, jehož stanovení má za cíl přispět k možnosti ještě více využívat obnovitelný zdroj energie – vítr.

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ V DANÉ OBLASTI

2.1 PŘEDPOKLADY K UŽITÍ OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ ENERGIE

2.1.1 Klimaticko-energetická koncepce EU

Evropská komise stanovuje dlouhodobé cíle a strategie v oblasti ochrany klimatu. Na Kjótský protokol z roku 1997, který je mezinárodní smlouvou k Rámcové úmluvě OSN o klimatických změnách, navazoval tzv. balíček 20-20-20 z roku 2007, schválený v roce 2008. Kdy se jedná o soubor opatření, která si kladla za cíl do roku 2020 snížit emise skleníkových plynů o 20 % oproti úrovni z roku 1990, zvýšit podíl obnovitelných zdrojů energie v celkové spotřebě v EU na 20 % a zvýšit energetickou účinnost v Evropě o 20 %. [5] Konkrétní opatření směřovaná ke snížení spotřeby energie v budovách jsou specifikována ve směrnici 2010/31/EU o energetické náročnosti budov (přepracování) (přepracování Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2002/91/ES o energetické náročnosti budov – Energy Performance of Buildings Directive EPBD). V období 1990–2015 došlo na úrovni EU ke snížení emisí skleníkových plynů o 22 %. Stanovený cíl k roku 2020 tak již byl splněn. [7]

Na balíček 2020 navazuje klimaticko-energetický balíček 2030 a 2050. Dle posledních údajů je závazkem pro Evropské komise soubor návrhů pro rok 2030 s názvem Green Deal, které mají uzpůsobit vedení politiky v rámci EU v oblasti klimatu, energetiky, dopravy a zdanění tak, aby se mohly podílet na snižování čistých emisí skleníkových plynů o 55 % do roku 2030 oproti roku 1990. Komise navrhuje zvýšit plánovaný závazný podíl obnovitelné energie EU na 40 % k celku snížit a konečnou spotřebu energie a spotřebu primární energie o 36–39 %. [6] Což je více než bylo deklarováno, předchozí deklarovaný cíl byl o 27 % zvýšit podíl obnovitelných zdrojů energií oproti roku 1990. [5]

Dlouhodobé cíle Evropské komise do roku 2050 předpokládají postupnou dekarbonizaci evropské ekonomiky jako celku a pokles emisí skleníkových plynů o 80 %-95 %, v tomto cíli je Evropa prvním klimaticky neutrálním kontinentem.

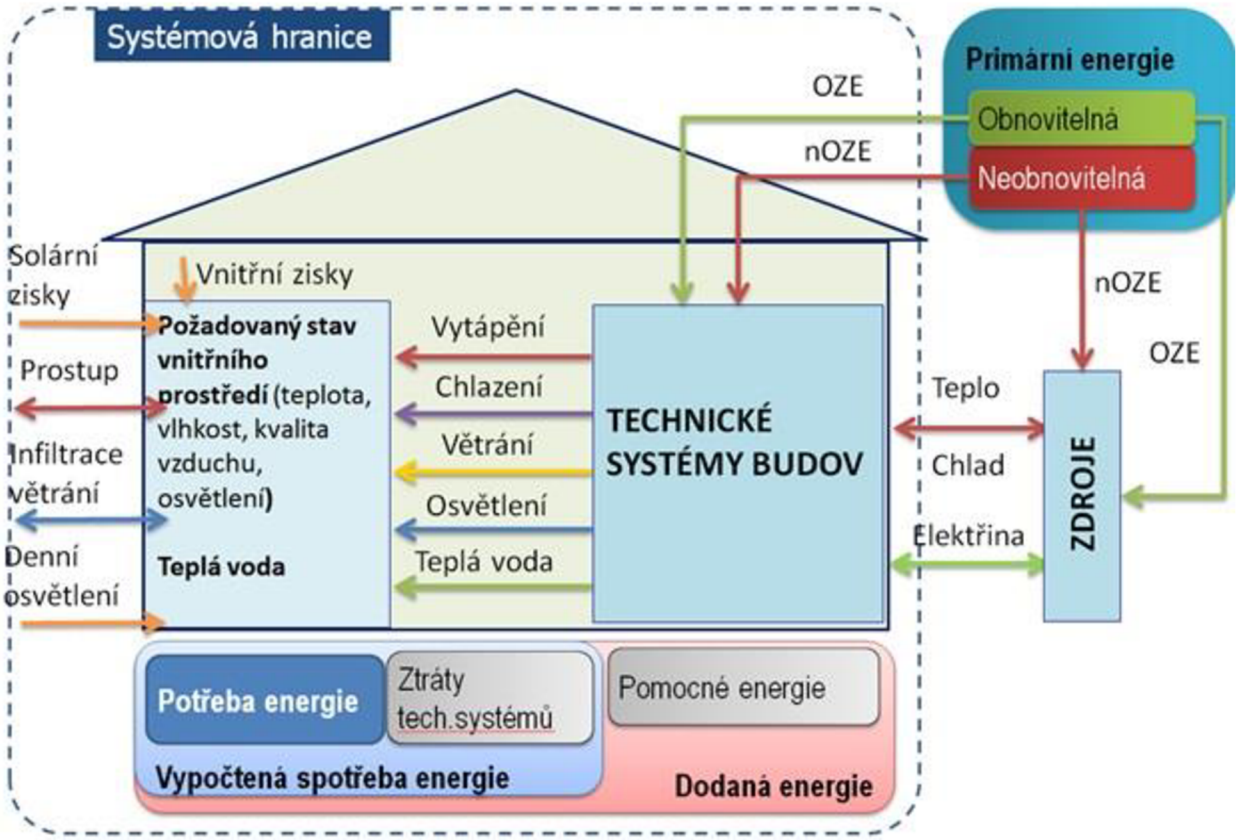
2.1.2 České předpisy

Na evropské předpisy navazuje v České republice zákon č. 406/2000 Sb. - o hospodaření energií na něj vyhláška č. 78/2013 Sb. o energetické náročnosti budov se změnami č. 230/2015 Sb.. Dle zákona musí všechny nově stavěné budovy od 1.1.2020 být budovami s téměř nulovou spotřebou energie (z anglického znění nearly zero energy houses známé pod zkratkou NZEB). Pro budovy ve veřejném sektoru (vlastněné orgánem veřejné moci) je tato povinnost stanovena již od 1.1.2018. Jedná se zejména o posouzení technické, ekonomické a ekologické proveditelnosti alternativních systémů dodávek energie. U alternativních systémů dodávek energie se posuzuje možnost instalace, připojitelnost k budově a zda je prostá doba návratnosti kratší než doba životnosti. Provádění tohoto požadavku řeší vyhláška 78/2013 Sb. [8], hodnotou požadavku ukazatele energetické náročnosti a to snížením hodnoty neobnovitelné primární energie stanovené pro referenční budovu v procentech, což nese v příloze vyhlášky označení $\Delta_{ep,R}$.

Od 1.1.2022 pak budou pro nově stavěné domy a rekonstruované domy (s navýšenou vytápěnou plochou více než 2,5krát) platit požadavky dle vyhlášky 264/2020 Sb., o energetické náročnosti budov. Lze je nalézt pod pojmem NZEB II. Hodnocená budova pak musí požadovaných parametrů

dosáhnout zvýšením podílu systému využívajících OZE (obnovitelné zdroje energie) nebo vylepšením součinitele prostupu obálky budovy.

Referenční budovou tak, jak je stanoveno v [8], je: „výpočtově definovaná budova téhož druhu, stejného geometrického tvaru a velikosti včetně prosklených ploch a částí, stejné orientace ke světovým stranám, stínění okolní zástavbou a přírodními překážkami, stejného vnitřního uspořádání a se stejným typem typického užívání a klimatických údajů jako hodnocená budova, avšak s referenčními hodnotami vlastností budovy, jejich konstrukcí a technických systémů.“



Obr. 1 Znázornění výpočtu energetické náročnosti budov [3]

V případě systémů, které elektrickou energii produkují a mohou ji exportovat do sítě (jsou napojeny na rozvodnou síť), upravuje vyhláška míru započitatelnosti exportované energie do celkové energetické bilance budovy. V případě, že systémy nejsou napojeny na rozvodnou síť a nemají tak možnost exportu, započte se do celkové bilance primární energie pouze jejich využitá výroba energie v každém měsíci, nejvýše však do výše příslušné dílčí dodané energie hodnocené budovy, která se stanoví výpočtem.

Na zákon č. 406/2000 Sb. také navazuje vyhláška č. 441/2012 Sb., o minimální účinnosti užití energie při výrobě elektřiny a tepla, která stanovuje požadavky na technická zařízení (kotle, turbíny, motory apod.) při výstavbě nové či při rekonstrukci stávající výrobny elektřiny nebo tepla. Stejně tak uvádí požadavky na tato zařízení pro splnění nároku na podporu elektřiny vyrobené z obnovitelných či druhotných zdrojů energie, popř. na podporu tepla z obnovitelných zdrojů energie (OZE). Vyhláška dále stanovuje metodiku výpočtu účinnosti využití energie. Další důležité parametry pro technická zařízení v budově definuje i vyhláška č. 193/2007 Sb., kterou se stanoví

podrobnosti účinnosti užití energie při rozvodu tepelné energie a vnitřním rozvodu tepelné energie a chladu. Vhodné je zmínit i normu ČSN EN 15459 Energetická náročnost budov – Postupy pro ekonomické hodnocení energetických soustav v budovách.

2.1.3 Stavba budov s téměř nulovou spotřebou energie

Budovou s téměř nulovou spotřebou energie se potom rozumí „budova s velmi nízkou energetickou náročností, jejíž spotřeba energie je ve značném rozsahu pokryta z obnovitelných zdrojů“. [9] Zkráceně jsou budovy s téměř nulovou spotřebou energie nazývány jako nulové domy. [8] Definice budovy s téměř nulovou spotřebou energie (nZEB) se v jednotlivých členských zemích Evropské unie velmi odlišuje. V hodnotách primární energie užité v tomto typu budovy se v 10 zemích, kde jsou hodnoty známy, pohybují hodnoty mezi čísly 20 až 200 kWh/m2 rok. [11] Budovy s téměř nulovou spotřebou energie mají spotřebu tepla na vytápění 0-5 kWh/m2 za rok. [12][11]

Výpočet energetického hodnocení budovy je opět založen na srovnání s referenční budovou, která je definována výše. Budova s téměř nulovou spotřebou energie musí splnit požadavek na snížení hodnoty neobnovitelné primární energie, a to pro rodinné domy o 25 %, pro bytové domy o 20 % a u ostatních budov o 10 %. Zároveň je zpřísněn požadavek na průměrný součinitel prostupu tepla obálkou budovy. Platí, že požadavek pro nZEB je nastaven na úroveň 0,7*Uem,R, tedy 0,7*Uem referenční budovy. V návaznosti na výše uvedené, musí průkaz energetické náročnosti budov (PENB), pro nové a větší (zákonem definované jako 25% zvýšení energeticky vztažné plochy) změny dokončených budov obsahovat nejen hodnocení ukazatelů EN ale i posouzení technické, ekonomické a ekologické proveditelnosti alternativních systémů dodávek energie.

Alternativními systémy dodávek energie se mimo jiné myslí místní systém dodávky energie využívající obnovitelné zdroje energie (OZE). Všechna opatření musí být souladu se zachováním kvality interního mikroklimatu.

2.1.4 Vytváření chytrých měst a regionů

Chytrá města a regiony je koncept, který navazuje na současný trend směřující k lepšímu využití zdrojů a menší tvorbu emisí. Vnáší do organizace města a regionů princip trvale udržitelného rozvoje, který se opírá o využití moderních technologií s cílem zlepšit kvalitu života a zefektivnit správu věcí veřejných a zlepšit kvalitu života obyvatel. Nejširší uplatnění nalézá v oblasti energetiky a dále pak v oblasti dopravy, kde je o něm nejvíce slyšet. Inteligentní města kombinují různé technologie ke snížení negativních dopadů na životní prostředí. Na úspory energie navazuje i Státní energetická koncepce z roku 2015 [8]. Kde je uvedeno, že: „…snižování konečné spotřeby energie může být dosaženo pomocí koncepčních a integrovaných řešení kombinujících podporu z oblasti energetiky a informačních a komunikačních technologií (např. Smart Cities)“.

Jedním z celků, který navazuje na místní Agendu 21 (v ČR se opírá se usnesení vlády č.30/2012), je v konceptu smart cities prvek organizační, který obsahuje zpracování získaných (naměřených) dat a jejich následná aplikace v rozhodovacích procesech města. V oblasti energetiky se jedná zejména o monitoring, resp. vyhodnocování spotřeby energie a emisí CO_2 a jiných znečišťujících a zdravotně rizikových látek, řízení spotřeby energie formou pokročilého energetického řízení, facility managementu a optimalizace spotřeby a dodávky energie (využití smart grids – chytrých sítí).

2.2 PROUDĚNÍ TEKUTIN

Základem pro řešení přenosu hybnosti při proudění je rovnice kontinuity tedy $\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}$ a rovnice zachování hybnosti Navier-Stokesova. Pokud je proudění stlačitelné nebo zahrnuje přenos tepla, řeší se dále i rovnice zachování energie.

2.2.1 Laminární proudění

Laminární proudění je prouděním viskózní kapaliny, při kterém jsou proudnice rovnoběžné a neprotínají se. Částice kapaliny se pohybují vizuálně vedle sebe ve vrstvách (lamina, latinsky destička), které se vzájemně nepromíchávají. U reálných kapalin lze při malých rychlostech použít laminární proudění jako aproximaci jejich proudění. V technické praxi se vyskytuje tam, kde jsou menší průtočné kanály, větší viskozita kapaliny a menší rychlosti proudění. Laminární proudění je podstatně jednodušší než turbulentní a není doprovázeno zvukovými efekty. Lze ho řešit pomocí platnosti rovnováhy sil při proudění skutečné tekutiny

$$F_s = F_0 + F_p + F_t \qquad (1),$$

kde rovnováha sil je vyjádřena Navier-Stokesovými rovnicemi:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v}.grad\mathbf{v} = \boldsymbol{a}_0 - \frac{1}{\rho} gradp + \frac{\eta}{\rho}\Delta\mathbf{v} \qquad (2),$$

které integrujeme. Rovnice (2) je Navier-Stokesova rovnice ve tvaru vektorového zápisu pro nestlačitelnou tekutinu (newtonskou tekutinu, tj. izotropní tekutinu s nenulovou konstantní viskozitou) v pravoúhlém souřadném systému. Při řešení proudového pole se zpravidla určuje rozložení rychlostí a tlaků. Vedle pohybové rovnice (2) se uplatní i rovnice spojitosti. V systému diferenciálních Navier-Stokesových rovnic a rovnice spojitosti jsou čtyři neznámé veličiny, tj. složky rychlosti v_x, v_y, v_z a tlak p. Pro řešení těchto rovnic musí být známé vnější zrychlení a_0, hustota tekutiny ρ a okrajové podmínky. Tučně vyznačenými v zapsaném vztahu jsou vektory. Analytivké řešení je dostupné pouze pro jednoduché případy laminárního proudění, které zanedbává nelineární konvektivní člen (např. Poiseuillovo proudění v kruhovém potrubí). Složitější případy proudění je nutné řešit numerickými metodami, např. metodou konečných objemů (metodou sítí). Po zanedbání členu zohledňující viskozitu kapaliny $\frac{\eta}{\rho}\Delta\mathbf{v}$, dostaneme Eulerovu rovnici hydrodynamiky (3).

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v}.grad\mathbf{v} = \boldsymbol{a}_0 - \frac{1}{\rho} gradp \qquad (3),$$

Při řešení třecích sil laminárního proudění se užívá Newtonův vztah pro tečné napětí vnitřního tření:

$$\tau = \eta \frac{du_x}{dy} \qquad (4),$$

který odpovídá skutečnosti, a proto se dosahuje dobrá shoda s experimentálními výsledky. [4] Kde τ je tečné napětí, které je přímo úměrné gradientu rychlosti, η je dynamická viskozita (jednotkou

je N · m^{-2} · s = Pa · s). a $\frac{du_x}{dy}$ je gradientem rychlosti ve směru kolmém na rychlost. Pokud dynamická viskozita nezávisí na gradientu rychlosti, je taková tekutina nazývána newtonskou).

Podíl dynamické viskozity η a hustoty kapaliny ρ se nazývá kinematická viskozita υ

$$\upsilon = \frac{\eta}{\rho} \tag{5},$$

Vynásobíme-li rovnici (2) vektorem dráhy $d\mathbf{s} = \mathbf{i}dx + \mathbf{j}dy + \mathbf{k}dz$ a když předpokládáme že $a_0 = gradU$, rovnice (2) má tvar:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} d\mathbf{s} + \mathbf{v}.grad\mathbf{v}.d\mathbf{s} = \boldsymbol{a}_0 d\mathbf{s} - \frac{1}{\rho} gradp.d\mathbf{s} + \upsilon\Delta\mathbf{v}.ds \tag{6}.$$

Integrací Navier-Stokesovy rovnice ve tvaru (6), pro ustálené proudění, kdy $\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = 0$, obdržíme Bernoulliho rovnici pro určitý časový okamžik a skutečnou tekutinu:

$$\frac{\mathrm{v}^2}{2} + g \cdot H + \frac{p}{\rho} + \int_1^2 \upsilon\Delta\mathbf{v}\, ds = konst. \tag{7}.$$

Bernoulliho rovnice (7) vyjadřuje zákon zachování energie vždy mezi dvěma body na proudnici. Jednotlivými složkami rovnice jsou kinetická měrná energie $\frac{v^2}{2}$, polohová měrná energie $g \cdot H$ (někdy v rovnici také označována jako U), tlaková měrná energie $\frac{p}{\rho}$ a poslední složkou je změna urychlující měrné energie mezi místy 1 a 2 (jinak také ztrátová energie spotřebovaná na překonání odporů v úseku). Pokud poslední složka odpadne a dostaneme rovnici ve tvaru pro dokonalou tekutinu.

Pro stačitelný plyn a adiabatické proudění dokonalého plynu bude mít Bernoulliho rovnice po integraci a úpravě tvar:

$$\frac{\mathrm{v}^2}{2} + \frac{\kappa}{\kappa - 1}\frac{p}{\rho} = konst. \tag{8},$$

kde κ je Poissonova konstanta:

$$\kappa = \frac{C_P}{C_V} \tag{9}$$

a C_V je teplená kapacita při stálém objemu a C_P je tepelná kapacita při stálém tlaku.

2.2.2 Turbulentní proudění

Turbulentním prouděním se myslí proudění viskózní tekutiny, u kterého se proudnice oproti laminárnímu proudění promíchávají. Částice tekutiny se neposouvají lineárně, kromě posunutí konají i vlastní složitý pohyb, který vede ke vzniku vírů. Všechny hydrodynamické veličiny, popisující turbulentní proudění (rychlost, tlak, hustota teplota apod.), mají nahodilý charakter a obvykle normální rozložení. Při tomto typu proudění dochází k disipaci kinetické energie tekutiny viskózním smykovým třením na teplo.

Zda nastane v trubici případ laminárního nebo turbulentního proudění, lze stanovit prostřednictvím Reynoldsova čísla:

$$Re = \frac{\bar{v}R}{\nu} = \frac{\rho \cdot R \cdot v}{\eta} \tag{10}$$

kde $\bar{v}$ je označení pro střední rychlost proudění v trubici, R je poloměr trubice, v je kinematická viskozita, ρ je hustota kapaliny a η je viskozita kapaliny. Čím je Reynoldsovo číslo větší, tím je větší pravděpodobnost vzniku turbulentního proudění. K přechodu mezi laminárním a turbulentním prouděním dochází při kritické hodnotě Reynoldsova čísla Re_k. Pro turbulentní proudění platí vztah:

$$Re > Re_k \tag{11}$$

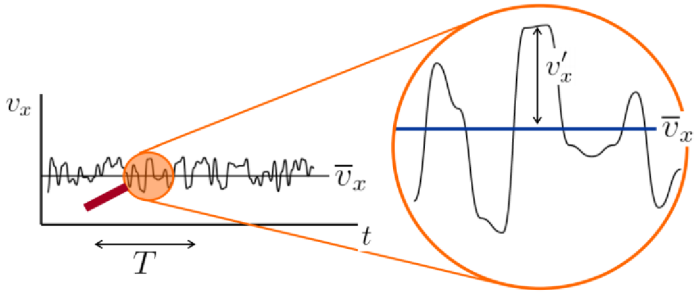
a kritické hodnoty Reynoldsova čísla se pohybují v intervalu:

$$Re_k \in < 1000, 20000 > \tag{12}.$$

Charakteristikami turbulentního proudění jsou zejména:

Fluktuace hydrodynamických veličin

Kdy všechny hydrodynamické veličiny popisující turbulentní proudění mají nahodilý charakter, obvykle s normálním rozložením. Pro charakteristiku rychlosti proudění v pro danou osu souřadného systému se také uvádí hodnota fluktuace, což je odchylka rychlosti proudění od střední hodnoty rychlosti proudění.



Obr. 2 Hodnota fluktuace v'_x a střední hodnota proudění $\bar{v}_x$

Pro okamžitou hodnotu rychlosti proudění v_i zapíšeme vztah:

$$v_i = \bar{v}_i + v'_i \; kde \; i = x, y, z \tag{13},$$

kde $\bar{v}_i$ představuje průměrnou hodnotu rychlosti proudění a v'_i okamžitou hodnotu fluktuace. Vyšetřují se časově vyhlazené charakteristiky, tedy statistický popis. V následujících vzorcích (14) a (15) je uveden výpočet pro střední hodnotu rychlosti proudění a střední hodnotu fluktuací.

$$\bar{v}_x = \frac{1}{T}\int_0^T v_x dt \tag{14}$$

$$\overline{v'_x}_x = \frac{1}{T}\int_0^T v'_x dt = 0 \tag{15}.$$

Jsou-li fluktuační rychlosti stejné ve všech směrech, tedy jsou-li nezávislé na volbě souřadného systému, jedná se o tzv. izotropní turbulence. Platí-li to ve všech bodech systému, jedná se o homogenní turbulenci. Pro turbulentní proudění je typická i fluktuace tlaku.

Intenzita (stupeň) turbulence

Intenzita turbulence je dána malými pohyby tekutiny způsobené turbulentními fluktuacemi. Lze je považovat za stochastické. Intenzitu (stupeň) turbulence I lze vypočítat následujícím vztahem:

$$I = \frac{1}{\bar{v}_x}\sqrt{\frac{1}{3}(\overline{v_x'^2} + \overline{v_y'^2} + \overline{v_z'^2})} \tag{16}$$

a pro izotropní turbulence platí:

$$I = \frac{1}{\bar{v}_x}\sqrt{\overline{v_x'^2}} \tag{17}.$$

Kinetická energie turbulentního proudění

Výpočet kinetické energie kapaliny pro jednotku objemu je dán vztahem

$$E = \frac{1}{2}\rho v^2 \tag{18},$$

přičemž měrná kinetická energie pro jednotku hmotnosti je vyjádřena jako

$$e = \frac{1}{2}v^2 \tag{19},$$

kde platí, že

$$v = \bar{v} + v' \rightarrow e = \bar{e} + e' \tag{20}.$$

Okamžitá fluktuační rychlost je pak vektorový součet složek x, y a z:

$$v' = v_x' + v_y' + v_z' \tag{21}.$$

Po roznásobení a časovém vyhlazení je pak možné vyjádřit kinetickou energii turbulentního proudění jako

$$e = \frac{1}{2}\overline{v^2} + \frac{1}{2}\overline{v'^2} \tag{22}$$

a kinetickou energii turbulentních fluktuací jako

$$e' = \frac{1}{2}\left(\overline{v_x'^2} + \overline{v_y'^2} + \overline{v_z'^2}\right) \tag{23}.$$

2.2.3 Proudění větru

Vítr je vektorem popisujícím pohyb zvolené částice vzduchu v určitém místě atmosféry v daném časovém okamžiku. [2] Nejčastěji se jím rozumí horizontální proudění vzduchu v zemské

atmosféře. Je vyvolaný rozdíly tlaku vzduchu, při kterém se uplatňuje třecí síla, a rotací Země. Určen je směrem, rychlostí a ochlazovacím účinkem. Na pravidelnost tohoto proudění silně působí nerovnoměrné zahřívání vzduchu slunečním zářením a tím i nestejnoměrným rozložením atmosférického tlaku, střídání teplot a tepelné rozdíly mezi mořem a pevninou, horami a údolími, zalesněnými a holými plochami a podobně. V proudění vzduchu pak nastávají časté výkyvy – turbulence. Mechanická turbulence, jejímž původem je tření, je nejvíce intenzivní u zemského povrchu. Pro její vznik pro její vznik postačuje proudění větru o rychlosti 7 až 10 $m.s^{-1}$.

Směr větru se udává dle směru, odkud vítr vane a to pomocí azimutu (0 až 360°) nebo v meteorologii dle světových stran (zpravidla s přesností na 22,5°, tj. s rozlišením na S, SSV, SV, VSV a V směr). Rychlost větru se klasifikuje buďto přesným určením jeho rychlosti v km/h nebo ve stupních, které se určují odhadem podle Beaufortovy stupnice. Rychlost větru se v čase výrazně mění, a proto se obvykle udává průměrná rychlost větru a nárazová rychlost větru.

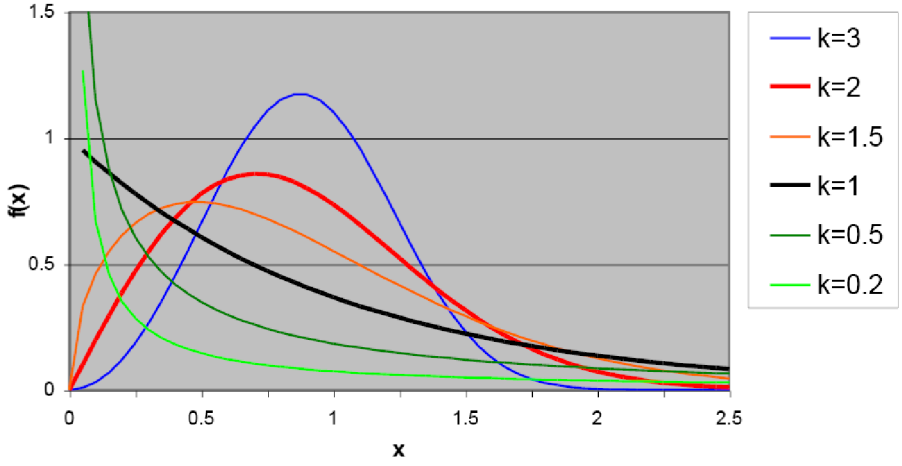
Empirické rozdělení naměřených hodnot rychlosti větru je pro účely výpočtů někdy vhodné nahradit jednodušším teoretickým rozdělením. Za rozdělení, které nejlépe reprezentuje četnosti rychlostí větru, se považuje dvouparametrické Weibullovo rozdělení nebo jeho speciální případ rozdělení Rayleighovo [45]. Hustotu pravděpodobnosti Weibullova rozdělení můžeme vyjádřit rovnicí:

$$f(x;k;A) = \frac{kx^{k-1}}{A^k} e^{-\left(\frac{x}{A}\right)^k}, x > 0 \qquad (24),$$

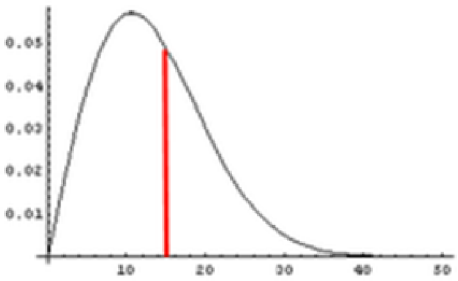
a jeho distribuční funkci rovnicí:

$$F(x;k;A) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{A}\right)^k} \qquad (25),$$

kde *A* a *k* jsou parametry rozdělení. *A* je parametr, který určuje, jakých hodnot funkce hustoty Weibullova rozdělení nabývá a k určuje tvar rozdělení. Při užití pro rozdělení proudění větru nabývá *A* hodnoty rychlosti větru v m/s (nejedná se o průměrnou rychlost, A je obvykle menší). Pro k=1 se rozdělení stává exponenciální, pokud je k=2, stává se dvouparametrické Weibullovo rozdělení rozdělením Rayleighovým, jednoparametrickým.



Obr. 3 Tvar funkce hustoty Weibullova rozdělení pro jednotlivá k, při A = 1. 66[45]



Obr. 4 Rozložení hustot rychlostí větru pro střední hodnotu rychlosti 15 m/s [45]

Weibullovo rozdělení je sice dvouparametrické, ale při znalosti průměrné rychlosti větru stačí k jeho úplnému určení pouze jeden dodatečný parametr. Vhodnější a dobře názorný je v tomto ohledu parametr tvaru rozdělení *k*, který v principu definuje extremitu daného rozdělení: při nižších hodnotách k jsou rychlosti větru více rozptýlené, při vyšších hodnotách *k* jsou větrné podmínky místa vyrovnanější, viz Obr. 3.

Rozložení hustoty rychlostí větru ve vybrané lokalitě je popsatelné Rayleighovým rozdělením, jako speciálním případem Weibullova rozdělení:

$$f(v) = \frac{k}{\eta}\left(\frac{v}{\eta}\right)^{k-1} exp\left[-\left(\frac{v}{\eta}\right)^{k}\right] \quad (26),$$

kde v je náhodně proměnná rychlost větru, $k=2$ je tvarový parametr rozložení a η odpovídá střední hodnotě rychlosti větru. [45]

$$\eta \approx \frac{\tilde{v}}{0{,}886} \quad (27)$$

Je zřejmé, že maximum hustoty výskytu rychlostí bude vždy ležet vlevo od hustoty výskytu střední rychlosti větru. Pro reálné použití má smysl pracovat s pravděpodobností výskytu rozsahu rychlostí větru v intervalu (v_1, v_2), kterou lze určit jako:

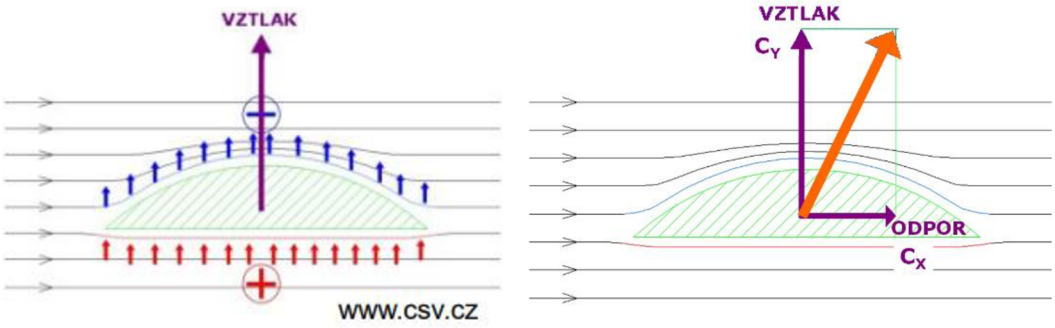
$$P_{(v_1,v_2)} = \int_{v_1}^{v_2} f(v)\, dv \quad (28).$$

Pak lze odvodit rozdělení četnosti proudění pro jednotlivé intervaly rychlosti jako

$$f(v_2) - f(v_1) \quad (29),$$

2.2.4 Princip vztlaku

Pro pochopení síly, která roztáčí lopatky větrné elektrárny je nutné mluvit u větru o tzv. dynamickém vztlaku, který vzniká vzájemným dynamickým působením při pohybu tělesa tekutinou v důsledku odporu, který klade prostředí (tedy tekutina – plyn či kapalina) pohybu tělesa. Při pohybu tělesa se na základě 3. Newtonova zákona, k síle, kterou těleso při pohybu působí na okolní vzduch, se vytváří reakční síla, kterou okolní vzduch působí na těleso; zjednodušeně říkáme zákon akce a reakce. [41] Obvykle se pro snazší pochopení problematiky hovoří o proudnicích a jejich zahuštění.



Obr. 5 Proudnice probíhající okolo křídla [42]

Výše zobrazená schémata popisují základní princip vztlaku. Pro složitější tvary křídel je třeba znát vírovou teorii křídla založenou na cirkulaci větru kolem něho, jejíž základem jsou Navier-Stokesovy rovnice pro proudění skutečných tekutin z 19. století, která se v praxi začala užívat v 60. letech 20. století. [42] Navier-Stokesovy rovnice jsou uvedeny výše v kapitole 2.2.1 Laminární proudění.

2.3 SIMULACE PROUDĚNÍ

V současnosti je možné využít simulačních softwarů pro stanovení průběhu proudění. Matematický základ pro výpočet v simulacích proudění vychází již z výše uvedených vztahů a je dále rozveden níže.

2.3.1 Matematický základ modelů turbulence

Přímé modelování s využitím Navier-Stokesových rovnic je zatím příliš náročné pro praktické modelování [28] a žádný model turbulence není obecně použitelný všechny případy. Volbu turbulentního modelu ovlivňuje způsob toku tekutiny, požadovaná přesnost řešení, simulační čas a dostupná výpočetní technika.

Pro modelování se v praxi užívají [2]:

a) Statistické teorie, kdy přenosové jevy v turbulentním proudu mají dominantní náhodný charakter a je vhodné použít k jejich popisu nástroje matematické statistiky. Navier-Stokesovy rovnice byly již Reynoldsem upraveny pro turbulentní proudění tak, že jsou nahrazeny okamžité hodnoty veličin jejich středními hodnotami a fluktuacemi. Výsledkem jsou tři nové rovnice pro tečné napětí τ , kde *ij* je nahrazeno směry *x, y, z* a dohromady mají tvar:

$$\tau_{ij} = \rho\overline{v_i'}\,\overline{v_j'} \qquad (30).$$

Počet neznámých pak převyšuje počet a soustava rovnic není uzavřená. [4]

b) Semiempirické modelování středních turbulentních veličin, které je založené na zdánlivé (vírové) viskozitě, jež je analogií dynamické viskozity tekutin. Tento směr se soustřeďuje na stanovení veličin, jež mají význam pro praxi, jako např. pole středních rychlostí, nebo tečná napětí. První pokus řešení turbulentního proudění předložil Boussinesq (1877), který zavedl zdánlivou (vírovou) viskozitu A. Na rozdíl od dynamické viskozity tekutin není zdánlivá viskozita látkovou vlastností ale funkcí souřadnic a je závislá na charakteristikách

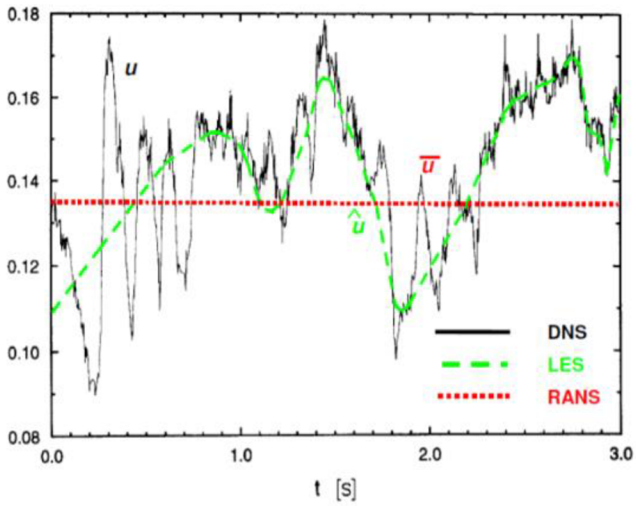
proudového pole, zejména geometrii. Pro rovinné turbulentní proudění je zdánlivé tečné napětí vyjádřeno vztahem:

$$\tau_t = A\frac{d\overline{v_x}}{dy} \tag{31}$$

a výsledné tečné napětí v turbulentním proudu bude rovno součtu

$$\tau = (\eta + A)\frac{d\overline{v_x}}{dy} \tag{32}.$$

2.3.2 Druhy modelů turbulence

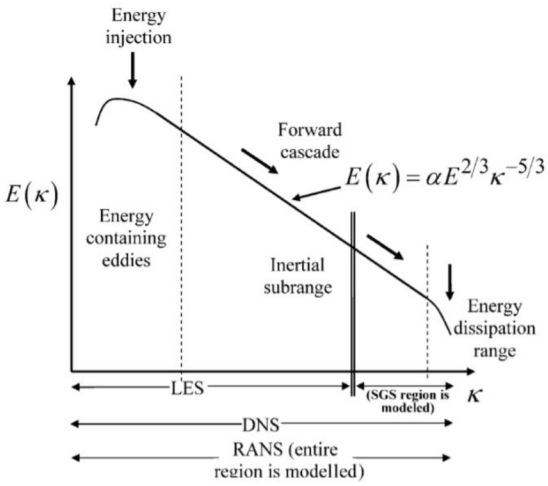


Obr. 6 Metody modelování turbulence dle vektoru rychlosti

Jednotlivé základní turbulentní modely [18] jsou v CFD, což je zkratka pro numerické metody používané k predikci proudění tekutin, k čemuž využívá rovnice zachování pro hmotnosti, hybnosti a energetickou rovnici tyto:

- DNS (Direct Navier-Skokes) má obrovské výpočetní nároky zvláště pro složitější proudění v zařízeních. Ve většině případů není nutné řešit všechny velikosti fluktuací.
- LES (Large Eddy Simulation); metoda velkých vírů filtruje malé fluktuace a řeší pouze část turbulentního spektra
- RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), metody časového středování časově středují veličiny turbulentního proudění pomocí Reynoldsovy rovnice. RANS modelují všechny velikosti turbulentních vírů a řeší časově zprůměrované hodnoty proudění, což výrazně snižuje výpočetní nároky, a zároveň většinou poskytují požadovanou úroveň přesnosti. Simulace je provedena pomocí Navier-Stokesových rovnic středovaných podle Reynoldse, v nichž je třeba nahradit dvojné korelace fluktuací rychlosti modelem turbulence.

Jednotlivé přístupy vyjadřuje energetické spektrum na obr. 5. Hranice určující rozdělení mezi metodami není striktní. Existují varianty základních modelů, které představující přechod mezi uvedenými metodami.



Obr. 7 Volená metoda dle energetického spektra vírů

Rozdílné RANS modely zjednodušují stanovený problém přidáním dalších transportních rovnic. Podtypy RASN modelů:

- Modely typu k-ε, k-ω přidávají i turbulentní viskozitu.
- Model RSM jako konstitutivní rovnice jsou používá přímo transportní rovnice pro šest složek Reynoldsových napětí a vynechává turbulentní viskozitu. Výsledkem simulace je stacionární střední proudové pole.
- Metody URANS (Unsteady-RANS) předpokládají, že turbulentní časové měřítko je mnohonásobně menší než časové měřítko středního proudu, model je časově závislý. Tyto modely jsou schopné zachytit nestability, ale nejsou schopné zachytit turbulentní nestability. Výpočet řeší sekvenci stacionárních stavů.

2.3.3 Okrajové podmínky

Při simulaci turbulentního proudění ve vnějším prostředí odpovídá skutečné fyzické hranici pouze spodní část výpočetní oblasti, a to terén s budovami.

Drsnost

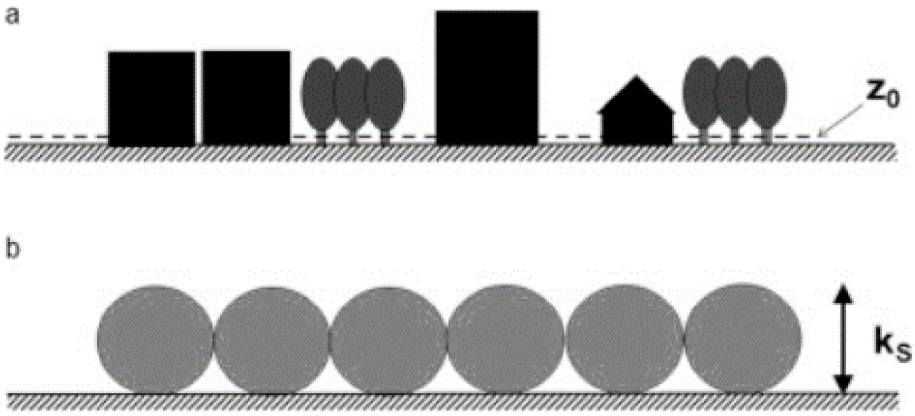
Mezi důležité okrajové podmínky hranic simulovaného prostoru patří drsnost povrchu. Měly by být rozlišeny dva typy drsnosti. První je aerodynamická délka drsnosti z_0 a druhá je ekvivalentní výška drsnosti písku k_s. Aerodynamická délka drsnosti z_0 je spojena zejména s překážkami na povrchu terénu a lze ji definovat jako relativní změnu průměrné rychlosti U se změnou výšky za neutrální stability (staticky neutrální podmínky (větrno, zataženo, zanedbatelná advekce teplot) ve výškách z_1, z_2 nad prvky drsnosti, kde d je výška roviny posunutí nad zemí. [38][39]

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{ln\left[\frac{(z_1 - d)}{z_0}\right]}{ln\left[\frac{(z_2 - d)}{z_0}\right]} \tag{33}$$

Vztah mezi z_0 a k_s je založený na porovnání prvního řádu mezi rychlostními profily atmosférické mezní vrstvy (ABL) a stěnovými funkcemi pro ANSYS Fluent je rovno:

$$k_{s_1,ABL} = \frac{9{,}793 z_0}{C_s} \quad (34),$$

kde C_s je konstanta drsnosti.



Obr. 8 Schematické znázornění délky aerodynamické drsnosti z_0 a odpovídající výšky drsnosti písku k_s [38]

Davenportova klasifikace s hodnotami z_0 drsného nekomplexního terénu byla revidována Wieringou s využitím dat z více než šedesáti experimentů přímo v terénu a porovnána s různými hodnoceními drsnosti, takže ukazuje realistické hodnoty [40]. Hodnoty pro jednotlivé druhy terénu jsou uvedeny níže v Tab. 1.

Tab. 1 Aktualizované hodnoty koeficientu aerodynamické drsnosti Davenport-Wieringa [40]

Kategorie	z_0 (m)	Popis terénu
1:"Moře"	0.0002	Otevřené moře nebo jezero (bez ohledu na velikost vln), přílivová rovina, zasněžená rovina, jednotvárná poušť, asfalt a beton, se vzdáleností několika kilometrů
2:"Hladký"	0.005	Jednotvárný povrch země bez znatelných překážek a se zanedbatelnou vegetací; např. pláže, souvisle plující kusy ledu (pack ice) bez velkých hřebenů, bažina a sněhem pokrytá nebo ladem ležící otevřená krajina.
3:"Otevřený"	0.03	Rovinatá země s nízkou vegetací (např. tráva) a izolovanými překážkami s odstupy rovnými nejméně 50krát výšce překážek; např. pastviny bez větrolamů, vřes, vřesoviště a tundra, přistávací plocha letišť.
4:"Hrubý/otevřený"	0.10	Obdělávaná plocha s pravidelným krytem nízkých plodin nebo mírně otevřená krajina s občasnými překážkami (např. nízké živé ploty, jednotlivé řady stromů, izolované stavení) v relativních

		horizontálních vzdálenostech rovných alespoň 20krát výšce překážek.
5:"Hrubý"	0.25	Nedávno založená „mladá“ krajina s vysokými plodinami nebo plodinami různé výšky a rozptýlenými překážkami (např. husté ochranné pásy, vinice) v relativních vzdálenostech rovných přibližně 15krát výšce překážek.
6:"Velmi hrubý"	0.5	„Stará“ obdělávaná krajina s mnoha poměrně velkými obsádkami (velké farmy, shluky lesů) oddělenými prostranstvími rovnými cca 10krát výšce překážek. Také nízká velká vegetace s malými meziprostory, jako jsou křoviny, sady, mladý hustě osázený les,
7: “Uzavřený"	1.0	Krajina úplně a pravidelně pokrytá velkými překážkami podobné velikosti, s otevřenými prostory srovnatelnými s výškou překážek; např. stejnoměrně vzrostlé lesy, homogenní města nebo vesnice.
8:"Chaotický"	>2	Centra velkých měst se směsí nízkopodlažních a výškových budov. Rozsáhlé lesy nepravidelně rostlé lesy s mnoha pasekami.

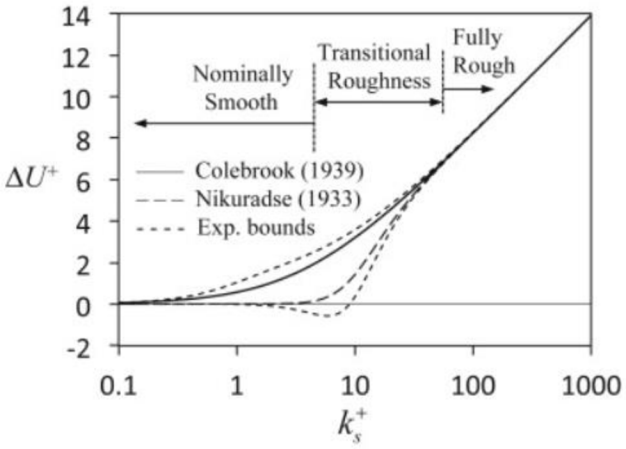
Nejvyšší třída, 8 ("Chaotická"), je uvedena pouze pro úplnost. V městech s výškovými budovami nebo ve velkých topografiích je kvůli existenci povrchové vrstvy a vertikálního toku aplikace konceptů drsnosti značně diskutabilní. [40]

Ekvivalentní výška drsnosti písku ks je důležitá zejména při proudění vody v korytech řek, v potrubí či při řešení mezní vrstvy u proudění. Tradičně je ekvivalentní výška drsnosti písku stanovována pro povrchy experimentálně. Bylo vyvozeno množství vztahů a ks je předmětem zkoumání i dnes. Nejznámějším vztahem pro ekvivalentní výšku drsnosti písku je ten od Nikuradseho z roku 1933 k němuž se přidává zkoumání Collebrooka (1939). Nikuradse zkoumal dopad uniformní velikosti k_s na tření v potrubí s použitím průměrného průměru pískového zrna k určení výšky drsnosti povrchu. [54] Drsnost ovlivňuje mezní vrstvu proudění a byla stanoveno Reynoldsovo číslo drsnosti k_s^+, které závisí na kinematické viskozitě υ a třecí rychlosti U^*.

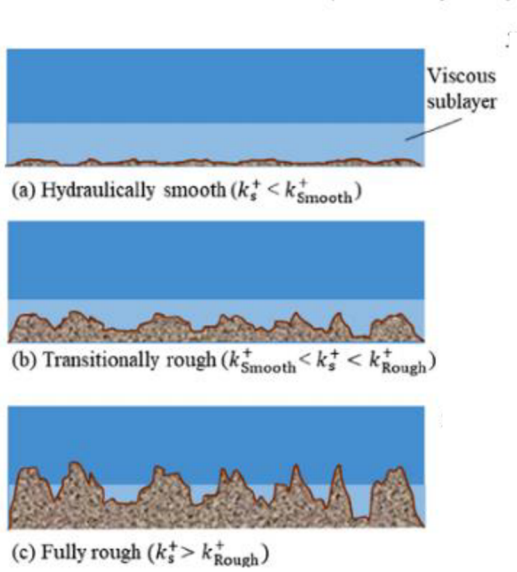
$$k_s^+ = \frac{k_s U^*}{\upsilon} \tag{35}$$

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \tag{36},$$

Kde vztah pro třecí rychlost je vyvozen ze vztahu (30).



Obr. 9 Funkce drsnosti, ΔU^+, jako funkce ekvivalentní výšky drsnosti pískových zrn s rozdělením kategorií drsností povrchu [55]



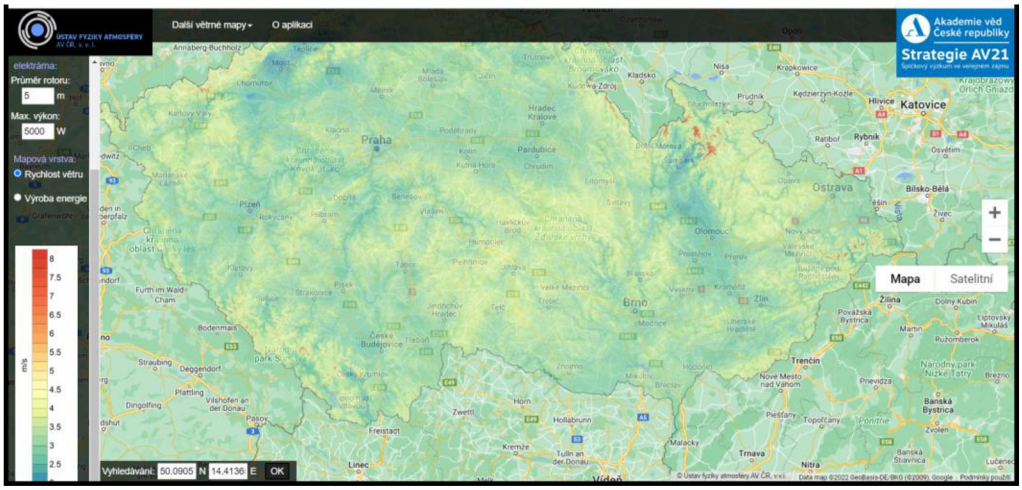
Obr. 10 Turbulentní proudění nad drsné povrchy; (a) hydraulicky hladký režim s drsností uloženou pod viskózní podvrstvou, (b) přechodně drsný režim s částečně rozloženou viskózní podvrstvou, (c) plně drsný povrch s úplně destruovanou viskózní podvrstvou [54]

2.4 ENERGIE VĚTRU A JEJÍ UŽITÍ

Nejobvyklejším využitím energie větru jsou dnes větrné elektrárny. Ty využívají síly proudění větru k roztočení vrtule, ke které je připojen elektrický generátor. Kromě užití velkých větrných elektráren je možné využít i menších typů. Jednou z možností užití malých větrných elektráren jsou ostrovní systémy (tzv. off-grid) nezávislé na rozvodné síti. Obvykle se zde uplatňují malé elektrárny s výkonem od 0,1 do 5 kW. Součástí ostrovního systému je také akumulátor a řídící jednotka. Pro dodávku střídavého proudu je vřazen střídač. Druhou možností, pokud je budova napojena na elektrickou síť, je přidání vlastní malé větrné elektrárny, kterou snižujeme spotřebu. Každá kWh vyrobená větrem odpovídá úspoře přibližně 0,43 kg emisí CO_2 a samozřejmě i finanční úsporu dle tarifu poskytovatele elektrické energie. [26] Je nutné zmínit, že větrné elektrárny nedosahují po většinu své životnosti vypočítaných hodnot výkonu, protože rychlost větru velmi kolísá.

2.4.1 Matematický model AV ČR

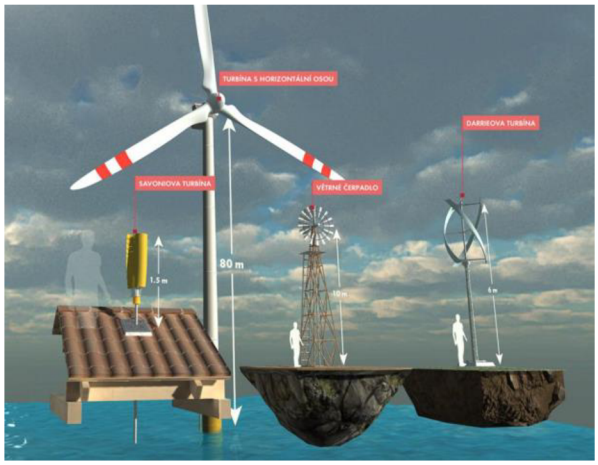
Pro obecné stanovení hodnot rychlosti proudění větru a jeho směru, které jsou vstupními hodnotami pro výběr větrné elektrárny, lze pro území české republiky využít mapovou aplikaci Akademie věd ČR, a to ve vrstvě 10 m a vrstvě 100 m nad terénem. [29] Data zobrazovaná v aplikaci vycházejí z výpočtů numerického predikčního modelu WRF s přesností rozlišením na 3 km. [31] Tento model provozuje pod názvem MEDARD Ústav fyziky atmosféry AVČR. Data použitá aplikací jsou revidována tak, aby co nejvíce odpovídala skutečným větrným podmínkám ČR a geostatickými metodami byl uvažován vliv místního terénu. Avšak větrné poměry mohou být lokálně výrazně ovlivněny místními překážkami proudění. [31]



Obr. 11 Aplikace Vítr [29]

2.4.2 Druhy větrných elektráren

Základní údaje o jednotlivých typech větrných elektráren jsou uvedeny v Tab. 2 níže. Větrné elektrárny se obvykle dělí podle směru osy otáčení na ty s horizontální osou otáčení rotoru – (HAWT) a vertikální (VAWT). Pro srovnání velikostí je ukázáno na Obr. 12 orientační srovnání obvyklých výšek jednotlivých větrných elektráren vzhledem k výšce člověka.



Obr. 12 Výšky jednotlivých typů větrných elektráren vůči výšce člověka [46]

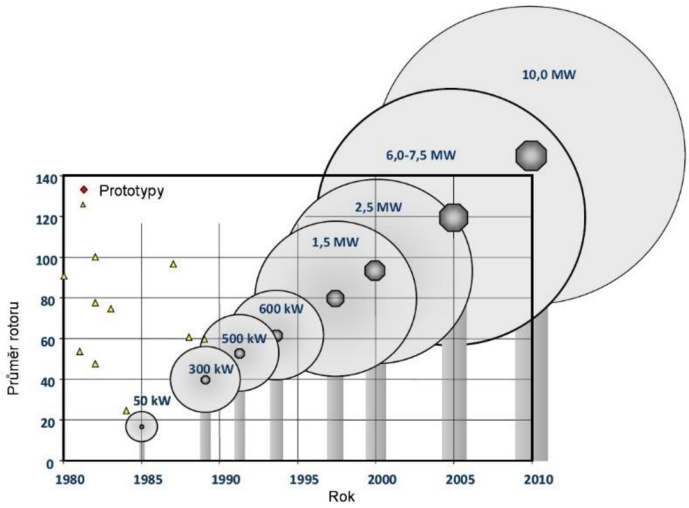
Tab. 2 Základní typy větrných elektráren

Typ	**Vrtule**	**Vícelopatkový rotor**	**Darrierův rotor**	**Savoniův rotor**
osa otáčení	vodorovná (HAWT)		svislá (VAWT)	
princip	vztlakový	vztlakový	vztlakový	odporový
počet lopatek	1-4 listy	desítky (až 150)	2-3 listy	2-4 listy
účinnost	30–45 %	20–30 %	cca 35 %	20 %
náběhová rychlost	3–6 m/s	Od 0,2 m/s	5-8 m/s nutností roztočení	Od 2 m/s
pozn.	většina komerčně vyráběných zařízení	spíše historické využití, např. americké kolo, Halladayova turbína; jiné názvy: větrná turbína, mnoholistý větrný mlýn	rozběh jen s dopomocí	často v kombinaci s rotorem typu Darrieus kvůli rozběhu

Vrtule

Vrtule je nejběžněji se vyskytující typ větrné elektrárny a zároveň tvoří většinu komerčně vyráběných zařízení, s instalacemi od malých elektráren až po velké větrné parky. Využívá princip vztlaku podobně jako letecké křídlo, rotor se natáčí kolmo na směr větru. Průměr rotoru největších z nich dosahuje až 160 metrů, účinnosti přibližně 45 %.

Obr. 13 Vrtule [46]



Obr. 14 Průměr rotoru a výkon vrtule [48]

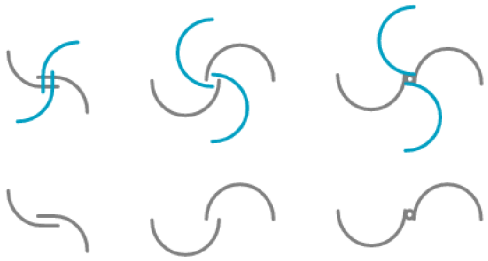
Vícelopatkový rotor

Vícelopatkový rotor je zejména historicky využívaným strojem. Pracuje na odporovém principu větrné turbíny. Vítr se opírá do plochy natočených lopatek na oběžném kole a roztáčí hřídel stroje. Rotační pohyb hřídele je potom převáděn na svislý pohyb pístu čerpadla. Tyto turbíny nedosahují takové účinnosti, jako turbíny založené na vztlakovém principu, ale jejich výroba je jednodušší a málo nákladná.

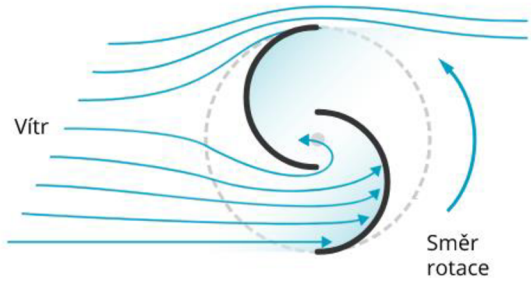
Savoniova turbína

Tento typ turbíny vynalezl roku 1922 ve Finsku Sigurd J. Savonius. Pracuje na odporovém principu využití větrné energie a patří mezi pomaluběžné větrné motory. Rychlost rotace lopatek nemůže být větší, než je rychlost větru a účinnost se pohybuje kolem 20 %. Turbínu tvoří nejčastěji dva vzájemně otočené půlválce (listy rotoru), podélně uchycené k vertikální ose, tvořící v řezu písmeno S. Na základě rozdílného koeficientu odporu vyduté a vypuklé plochy působí vítr větším tlakem na lopatku tvořící misku proti směru větru a tím roztáčí rotor turbíny. Osa otáčení je kolmá na směr proudění vzduchu. Vnitřní okraje lopatek se obvykle u středu mírně překrývají a umožňují tak průtok vzduchu mezi nimi.

Obr. 15 Savoniův rotor [49]



Obr. 16 Jednotlivé konfigurace Savoniova rotoru [46]



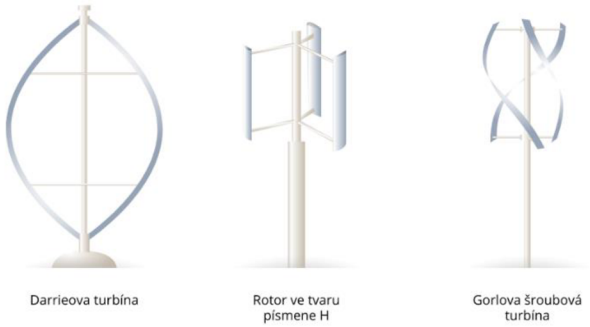
Obr. 17 Princip činnosti Savoniova rotoru [46]

Také rychlost větru se u meteorologických stanic měří pomocí anemometru, pracujícím na principu Savoniovy turbíny.

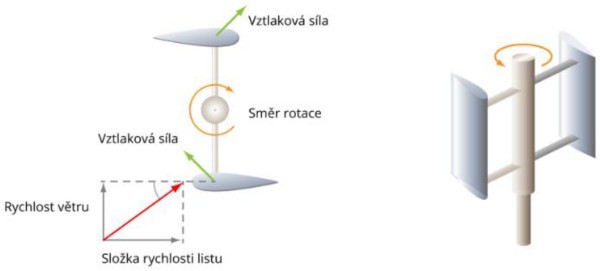
Darrierův rotor

Vertikální větrnou turbínu vynalezl v roce 1931 francouzský inženýr Georges Jean Marie Darrieus. Turbína se obvykle skládá ze dvou nebo tří tvarovaných listů otáčejících se kolem vertikální osy.

Obr. 18 Větrná elektrárna postavená r. 1987 v Kanadě, výška 110 m. [50]



Obr. 19 Typy Darrieovy turbíny [46]



Obr. 20 Princip činnosti Darrieovy turbíny [46]**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**[50]

Obr. 21 Příklad větrné elektrárny umístěné na střeše Fakulty elektrotechniky VUT, kombinace rotoru typu Darrius a Savonius

Často je dodávána kombinace Darrirova a Savoniva rotoru pro kombinaci rozběhu se Savoniovým rotorem a větší účinnosti větrné elektrárny typu s rotorem typu Darrius. Instalace např. na VUT v Brně, fakulta elektrotechniky.

2.4.3 Výroba elektrické energie

Pro množství vyprodukované energie větrnou elektrárnou je nutné znát její výkon. Základem jsou níže uvedené vztahy. Výkon je prací W vykonanou za čas τ (37)

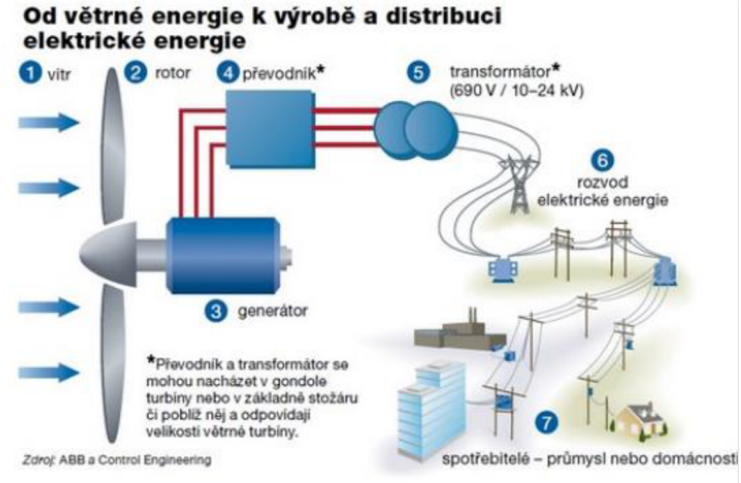
$$P = \frac{dW}{d\tau} = U\frac{dQ}{dt} = U \cdot I \qquad (37),$$

což se u výkonu pro stejnosměrný elektrický proud vypočítá jako součin napětí U a proudu I. Změnu práce lze vyjádřit jako změnu elektrického náboje toho, že změnu práce lze vyjádřit jako změnu elektrického náboje Q za čas při daném napětí U. Pro střídavý proud závisí napětí také na tvaru signálu a vzájemném fázovém posunu napětí a proudu, ve výpočtu proto hraje roli člen $cos\phi$, který se nazývá účiníkem [57] Jednotkou výkonu je watt [W]

$$P = U \cdot I \cdot cos\phi \qquad (38).$$

Jednotkou práce je joule [J] jinak také [Ws]. Pro praxi se nejčastěji užívá její převod na kWh.

Jednotlivé kroky, které vedou až k elektřině napájející spotřebič v domácnosti lze shrnout do 7 kroků, pokud je proud vyráběn ve větší vzdálenosti od spotřebitele. První je působení větru na lopatky, otáčí se rotor. V generátoru se generuje stejnosměrný proud, který prochází přes převodník, měřič energie a transformát do rozvodné sítě pro elektrickou energii, kudy střídavý proud doputuje až ke koncovému zákazníkovi. Pokud je elektrárna na domě u zákazníka lze vynechat bod 6.



Obr. 22 Schéma výroby a distribuce elektrické energie

Systémy připojené větrných elektráren lze dělit na grid-on systémy, tedy ty propojené s elektrickou sítí. Jedná se obvykle o systém spojený zpravidla s výroba elektrické energie s velkými výkony, který nelze užít pro autonomní systémy. Trendem je výstavba velkých elektráren s velkým výkonem, kdy klesají náklady na generovanou kWh. Na souši může být celkový instalovaný výkon jedné větrné elektrárny v současnosti roven 2 MW. Mezi systémy větrných elektráren zapojených do rozvodné sítě patří i tzv. off-shore elektrárny, tj. elektrárny umístěné na moři mimo pobřeží, kde je v současnosti možné instalovat elektrárny o výkonu až 5 MW. Druhým užívaným systémem je grid-off systém, jinak řečeno systém nezávislý na elektrické síti. Obvykle jsou instalovány malé výkony, je generován stejnosměrné napětí a jedná se obvykle o výkony cca 0,1-5 kW propojené s baterií, velmi často v kombinaci s fotovoltaikou. [51]

Obr. 23 Bahrain world Trade center [56]

Pro využívání energie větru se nabízí i možnost zabudování větrné elektrárny přímo do stavby, kdy tvar budovy umožňuje koncentrovat energii větru do místa s turbínou. Příkladem může být Bahrain world Trade center, kde jsou instalované 3 větrné turbíny (s vrtulemi o 3 listech) o průměru 29 m, každá o výkonu 225 kW. Jejich produkce elektrické energie zajišťuje pokrytí dosahuje 1.1 to 1.3 GWh/rok a pokrývá cca 11-15 % celkové spotřeby elektrické energie v objektu. [56]

2.4.4 Účinnost větrem poháněného stroje

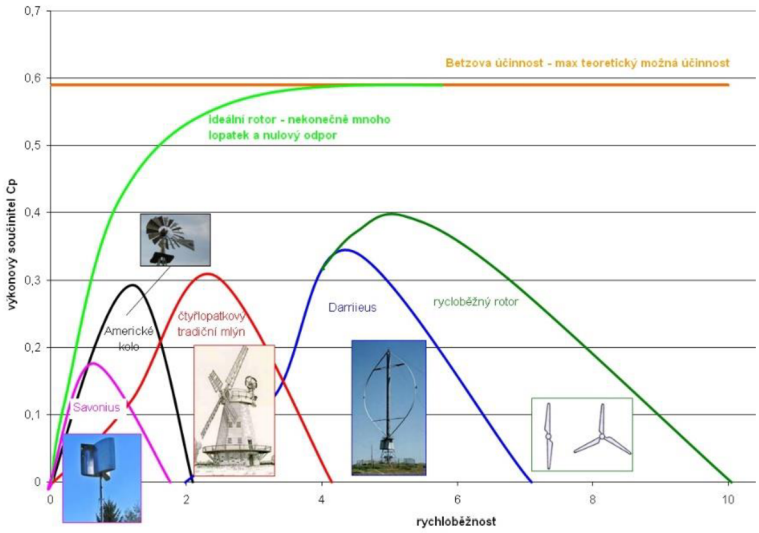
Maximální dosažitelnou účinnost větrem poháněného stroje odvodil teoreticky v roce 1919 Albert Betz jako 59,26 %. Teoreticky dosažitelný výkon P_t, lze určit na základě vztahu (39)

$$P_t = k_B \cdot \rho \cdot \frac{v^3}{2} \quad (39),$$

Kinetická energie větru přechází na otáčivý pohybu a poté se přeměňuje na elektrickou energii. Teoreticky dosažitelný výkon je přímo měrný třetí mocnině rychlosti proudícího vzduchu. Pro reálné turbíny s průměrem rotoru D, kde D je průměrem válce vzduchu se užívá vztah

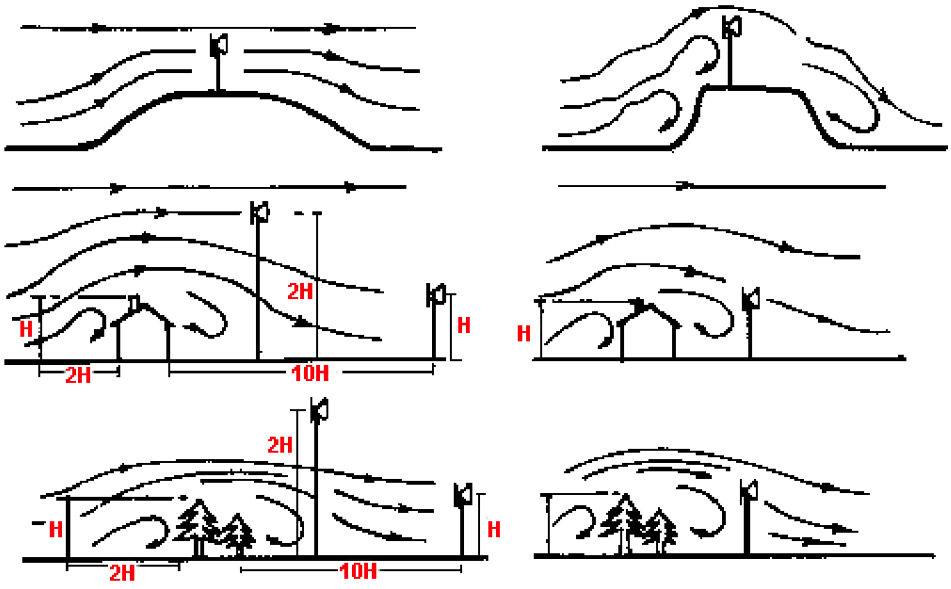
$$P = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot v^3 \cdot \frac{\pi D^2}{4} \quad (40),$$

kde C_p je součinitel výkonnosti. Na základě Betzova pravidla je nejvyšší možný součinitel výkonnosti roven 0,5926. Rotory reálných zařízení vykazují další ztráty energie, které snižují součinitel výkonnosti a současná zařízení dosahují C_p v rozmezí okolo 40 %, což je na hranici 80 % možného výkonu. [25] Hodnoty součinitele výkonnosti pro jednotlivé typy větrných elektráren lze nalézt graficky znázorněné na Obr. 24 Výkonový součinitel větrné turbíny níže.



Obr. 24 Výkonový součinitel větrné turbíny, zdroj: ČSVE

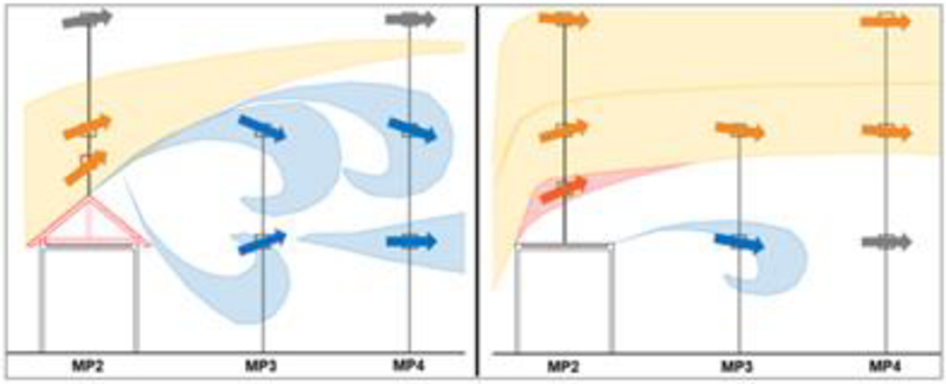
Na účinnost provozu má také nemalý vliv umístění v terénu a okolní stavby. Jednoduché zobrazení proudnic větru vzhledem k terénu s umístěním větrné elektrárny a poměrů výšky jejího stožáru k okolí je zobrazen na Obr. 25 Vhodnost terénu pro umístění větrné elektrárny [24][26].



Dobrý profil Špatný profil

Obr. 25 Vhodnost terénu pro umístění větrné elektrárny [24][26]

Jak již bylo zmíněno výše výkon větrné elektrárny je závislý na rychlosti proudění větru, která je v nižší vrstvě nejvíce ovlivněna skladbou okolí, pokud chce umístit větrnou elektrárnu na střeše budovy je nutné provést simulaci proudění kolem budovy nebo podrobně zaznamenat a vyhodnotit data proudění kolem budovy, jak je vyhodnoceno na Obr. 26 Výsledky měření směru proudění větru dle typu střechy v jinak nezastavěné oblasti [27]



Obr. 26 Výsledky měření směru proudění větru dle typu střechy v jinak nezastavěné oblasti [27]

2.5 TEORIE CHYB A NEJISTOTY MĚŘENÍ

Teorie chyb je základem pro určení nejistot měření. Chyby je možné vyjádřit v absolutních nebo relativních hodnotách a podle působení je dělíme na chyby systematické, náhodné a hrubé. Dle zdroje se rozdělují chyby na chyby přístroje, metody, pozorování a vyhodnocení. Hodnota hrubé chyby se značně liší od ostatních hodnot získaných opakovaným měřením. Je způsobena výjimečnou příčinou jako nesprávným zapsáním výsledku, náhlým selháním měřící aparatury či nesprávným nastavením podmínek měření. Hrubá chyba se ze zpracování výsledků vylučuje, aby nezkreslovala výsledek. Systematické chyby ovlivňují naměřené hodnoty konstantně jedním směrem. Je způsobena například jistou chybou přístroje, problematická může být její identifikace a kvantifikace. K tomu může sloužit například srovnávací měření jinou metodou či přístrojem. Je možné ji matematicky korigovat a obdržet správné výsledky měření. Náhodnou chybu bez dostatečného počtu měření není možné určit. Naměřené hodnoty se zpracovávají statistickými metodami za určitého předpokladu náhodného rozložení chyb. [43]

U nejistoty měření jde o komplexnější přístup k posouzení měření než u chybové koncepce. Základem pro určení nejistoty měření je statistický přístup. Předpokládá se určité rozdělení pravděpodobnosti, se kterou se může měřená hodnota odchylovat od skutečné hodnoty, resp. pravděpodobnost, s jakou se může skutečná hodnota v intervalu daném nejistotou nacházet.

Základem je standardní nejistota u, která představuje rozsah hodnot okolo naměřené hodnoty pomocí směrodatné odchylky. Ta se dále rozděluje na nejistotu typu A a typu B. Metoda pro hodnocení nejistoty u_A je hodnocením nejistoty měření statistickou analýzou série měření stejné hodnoty, např. stanovení standardní odchylky série měření jedné hodnoty. Metoda hodnocení nejistoty u_B je hodnocením nejistoty měření jiným způsobem než statistickou analýzou série pozorování. Příkladem je například výrobcem zveřejněná specifikace pro přístroj. [58]

Pro nejistotu typu A je vhodné zmínit metodu delta, která je vyhodnocení nejistoty typu A pro výsledky z dlouhodobého meteorologického měření na střeše budovy v práci použita. Ve statistice je delta metoda výsledkem týkajícím se přibližného rozdělení pravděpodobnosti pro funkci asymptoticky normálního statistického odhadu ze znalosti limitního rozptylu tohoto odhadu. Matematické vyjádření pro jednorozměrnou delta metodu zní: Nechť $\{T_n\}$ splňuje $\sqrt{n}(T_n - \mu) \xrightarrow{D} N(0, \sigma^2)$ pro nějaké $\mu \in R$ a $\sigma^2 \geq 0$ a nechť g: R→R má spojitou derivaci na nějakém okolí bodu μ, platí:

$$\sqrt{n}(g(T_n) - g(\mu)) \xrightarrow{D} N(0, [g'(\mu)]^2\sigma^2), \quad n \to \infty \tag{41},$$

kde μ a σ^2 jsou konstanty a $\xrightarrow{D}$ značí konvergenci v distribuci. (41) platí pro jakoukoli funkci g pokud $g'(\mu)$ existuje a má nenulovou hodnotu. Znak sigma σ je směrodatnou odchylkou „populace“, přičemž ta určuje rozsah odlišností v určité skupině položek anebo dat z procesu.

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce je zaměřena na přímou využitelnost energie větru, který proudí kolem střechy budovy. Stanovení množství využitelné energie větru v budově bude určováno na střeše pilotního objektu chytrých regionů. Hlavním cílem této práce je stanovit obecnou metodu pro určení množství elektrické energie generované zařízením umístěným na střeše budovy z obvykle známých parametrů. Řešení hlavního cíle disertační práce je rozděleno na následně uvedené dílčí cíle:

- tvorba simulačního modelu
- realizace referenčního měření
- výběr vhodných malých větrných elektráren
- stanovení výsledků metody na příkladu
- verifikace a stanovení použitelnosti vytvořené metody

4 METODY ŘEŠENÍ

Metody řešení jsou volené teoretické, simulační a experimentální. Teoretické podklady pro řešení jsou uvedeny výše.

4.1 NÁVRH METODY

Jako vhodné řešení určení potenciálu využití větrné energie na střechách budov v zastavěné oblasti se na základě níže uvedených skutečností jeví jako nejvhodnější metoda s následujícím postupem v jednotlivých krocích:

(1) Zjištění parametrů budovy a okolí

(2) Získání dat pro proudění větru z akademie věd ČR, model Medard

(3) Vytvoření základního modelu budovy umístěného v terénu

(4) Přenesení modelu do CFD prostředí (vytvoření kvalitní sítě)

(5) CFD simulace proudění v okolí střechy budovy

(6) Výběr větrné elektrárny

(7) Stanovení počtu umístitelných větrných elektráren

(8) Analýza změn rozložení větrných sil dle umístění překážek

(9) Stanovení výsledného potenciálu

Návrh těchto kroků byl uskutečněn na základě výsledků níže uvedených realizovaných měření viz. kapitola 4.3 Experimentální část a provedených simulací viz kapitola 4.4 Simulační část. Stanovení potenciálu pro vybranou budovu je uvedeno v kapitole 5 Stanovení potenciálu pro vybraný objekt.

4.2 REFERENČNÍ BUDOVA

Jako referenční budova byla vybrána budova P4 ve vědeckém areálu AdMaS, VUT v Brně na Purkyňově ulici č. 139, která je také pilotním objektem pro chytré regiony.

Obr. 27 Letecký pohled na areál AdMaS s vyznačeným bodem měření na střeše budovy

Nadmořská výška terénu je v místě stavby budovy P4 295 m n. m., areál je umístěný ve svahu a střecha není kryta ostatními budovami a okolí se nachází stejně vysoké budovy, volný terén a ve větší vzdálenosti také les.

Obr. 28 Budova P4 v areálu

Samotná budova se skládá na bocích ze dvou přízemních hal laboratoří a skladů, a centrální čtyřpodlažní hmoty administrativy. Levá hala je částečně podsklepena, pravá je jednopodlažní nepodsklepená. Podsklepená část je s halou propojena nákladním výtahem a schodištěm. V levé hale je vestavěno kancelářské patro, propojené s 2.NP administrativní části. Střední, administrativní část a vybrané laboratoře a kanceláře v hale jsou vytápěny pomocí radiátorů. Zbývající prostory (velkoprostorové technologické haly) jsou vytápěny pomocí teplovzdušných teplovodních jednotek. Zdrojem tepla pro vytápění jsou 4 tepelná čerpadla ZEMĚ/VODA o výkonu 41,9kW každé (v technické místnosti), bivalentním zdrojem je plynový kondenzační kotel o výkonu 45kW, umístěný v samostatné technické místnosti. K systému je připojen i solární bojler, pro předehřev TV a bojler pro špičkový dohřev TV. Laboratoř geodézie má nainstalovanou úpravu vzduchu.

Výpočtové hodnoty klimatických poměrů pro areál [32]:

Místo	:	Brno
Nadmořská výška	:	295 m.n.m.
Normální tlak vzduchu	:	0,0975 MPa
Letní výpočtová teplota	:	+ 29 °C
Letní výpočtová entalpie	:	59,0 kJ/kg s.v.
Zimní výpočtová teplota	:	-12°C
Zimní výpočtová entalpie	:	-8,6 kJ/kg s.v.
GPS souřadnice	:	49.235200N, 16.5705000E

4.3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.3.1 Stanovení hodnot větru

Údaje o rychlosti a směru proudění větru lze najít v úředních databázích, např. databáze RESTEP nebo lze využít již výše zmiňované Aplikace Vítr viz. kapitola 2.4.1 Matematický model AV ČR. Přesné hodnoty rychlosti proudění větru, směru větru a turbulence nad střechou budovy jsou ale kritickými hodnotami pro hodnocení vhodnosti střechy pro určení potenciálu využitelnosti větrné energie. Pokud není užito simulace, je pro přesnější zjištění hodnot proudění větru doporučeno nejméně 2měsíční experimentální ověření, a to ve výšce dosahující výšky, ve které je plánována instalace větrné elektrárny [33]. Ideální je měření trvající jeden rok [33], kde se měří a zaznamenávají data ve stanovených intervalech, obvykle 10minutových [35]. Měřené hodnoty mají být klasifikovány a nahrávány s přesným datem a časem [26] Je vhodné zaznamenávat rychlost, směr, a intenzitu turbulence větru, který proudí kolem budovy. [27] Dle známých poznatků je vhodné umístit větrnou elektrárnu do oblasti laminárního proudění. Tato oblast je v metodě posouzena simulací, a proto je zde navrženo pouze sledování rychlosti a směru proudění větru.

V současné době existuje mnoho meteorologických stanic pro efektivní měření větru, obvykle jsou vybaveny hrnkovými anemometry pro měření rychlosti větru a větrnými lopatkami k měření směru větru. Zaznamenává se také teplota a tlak vzduchu. Nezbytnou součástí je robustní ústředna dobře izolovaná proti dešti, která data odebírá, zaznamenává a dálkovým ovládáním odesílá. [33]

4.3.2 Realizace referenčního měření

Navržené experimentální měření rychlosti a směru větru bylo provedeno zařízením, které bylo umístěno v reálném prostředí na střeše budovy P4 ve vědeckém areálu AdMaS. Na střechu budovy byla přesunuta malá meteorologická stanice, z níž byla naměřená data obsahující údaje o teplotě vzduchu, hodnotu vzdušné vlhkosti, množství dopadající slunečního záření, naměřenou rychlost a směr větru jednou za den přenášena do databáze dostupné přes webové rozhraní. Data z meteorologické stanice byla měřena v 10minutových intervalech a zaznamenávána v online databázi na serveru fiedler.company. Meteorologická stanice byla zapůjčena ve spolupráci společností ENKI o.p.s. [36]. a byla celá dodána společností Fiedler.

Specifikace meteorologické stanice:

Měřící ústředna:	jednotka H7
	zapůjčení aktivované SIM karty
Systém napájení:	bezúdržbový gelový akumulátor 12V/9Ah
	solární panel 10W s nerezovým držákem
	regulátor dobíjení RS13 k solárnímu panelu
Mech. konstrukce:	nerezový stožár 3m s kotvením
	výložníky pro upevnění čidel a senzorů

Měření dešť. srážek:	srážkoměr SR03 s příslušenstvím
Měření teplot:	teplotní čidlo Pt100-3M (3 ks)
	radiační kryt RK5
Měření RV vzduchu:	snímač RVT11 + radiační kryt RK5
Měření atm. tlaku:	snímač ATM11
Měření větru:	anemometr W2
Měření glob. záření:	pyranometr CMP3, připojení k TEP06/P
Měření vlh. půdy:	po přesunu na střechu odpojeno

Stanice byla pro měření přesunuta z původní pozice před budovou přesunuta na nové stanoviště na střeše budovy. Fotografie obou umístění se nachází níže.

Obr. 29 Meteorologická stanice umístěná na střeše budovy P4

Obr. 30 Meteorologická stanice na původním stanovišti před budovou P4

Pro snímání rychlosti větru a směru větru byla meteorologická stanice vybavena čidlem W2 – (anemometrem) od firmy Tlusťák. Anemometry W2 používají pro měření rychlosti větru rotační lopatkový Robinsonův kříž a pro měření směru otočnou lopatkovou směrovku. Otáčky kříže a poloha směrovky se snímají optoelektronicky a k dalšímu zpracování se předávají v digitální formě. Čidlo má zabudované topení, což zajišťuje spolehlivý provoz v zimním období. Temperuje se osa

Robinsonova kříže a osa otočné směrovky. Topení se samočinně reguluje termostatem. Vytápěné čidlo je napájeno zdrojem 24 VDC / 30 W. Součástí dodávky čidla byl i vnější převodník.

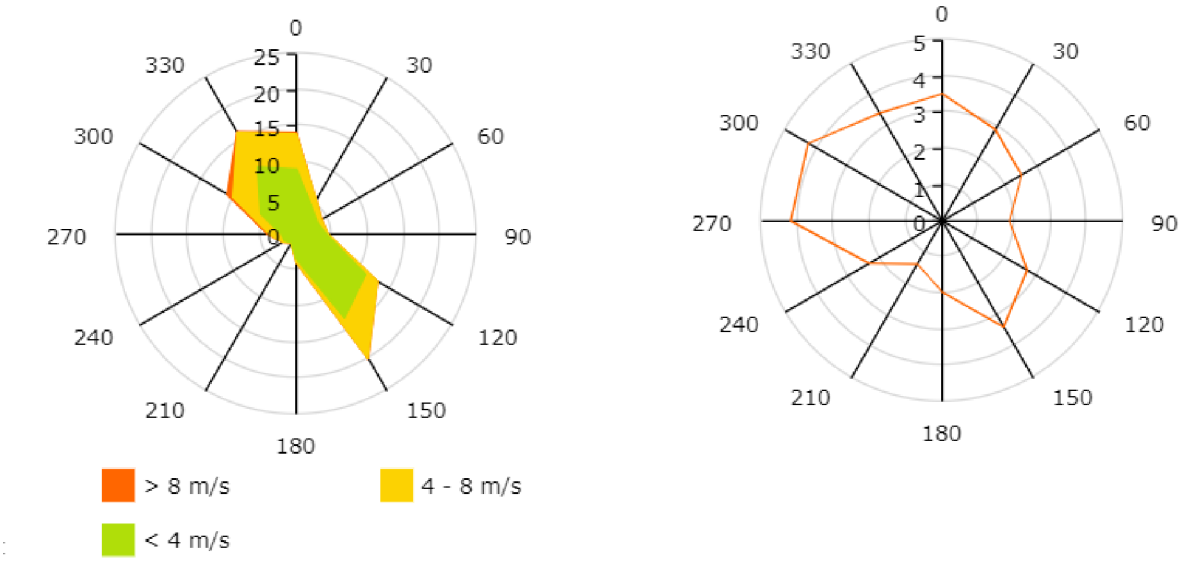
Obr. 31 Miskový anemometr W2

Dle informací od výrobce z kalibrace kalibračního tunelu má anemometr W2 je mez citlivosti pro měření rychlosti větru 0,8 – 0,9 m/s, pod tuto mez není možné přesně určit hodnotu měření. V hladině 0,9 až 5m/s je maximální chyba měření 0,4 m/s. V hladině 5,1 až 20 m/s je max +-0,15 m/s. Rozlišení měření směru větru u čidla W2 je 10 úhlových stupňů a jelikož se jedná o digitální přenos je tato přesnost absolutní. Mez citlivosti měření směru větru je 1,2 m/s.

Pro meteorologické měření byla odchylka výsledných hodnot (nejistota měření) anemometrů stanovena z údajů z kalibračního měření čidla ve větrném tunelu od výrobce. Měření byla pro tento účel považována za nezávislá. Pro průměrnou rychlost byl z normálního rozdělení, k=1, které odpovídá rozdělení četnosti rychlosti z měření stanovena rozptylem interval spolehlivosti měření pro jednotlivé rychlosti proudění vzduchu. U hodnot do 0,9m/s lze mluvit o cenzorovaném výběru, neboť kvantifikační limit činil 0,9 m/s. Pro analýzu výsledků směru větru je nutné vynechat hodnoty větru u rychlosti menší než 1,2m/s.

4.3.3 Srovnání výsledků dlouhodobého měření a hodnot z klimatického predikčního modelu

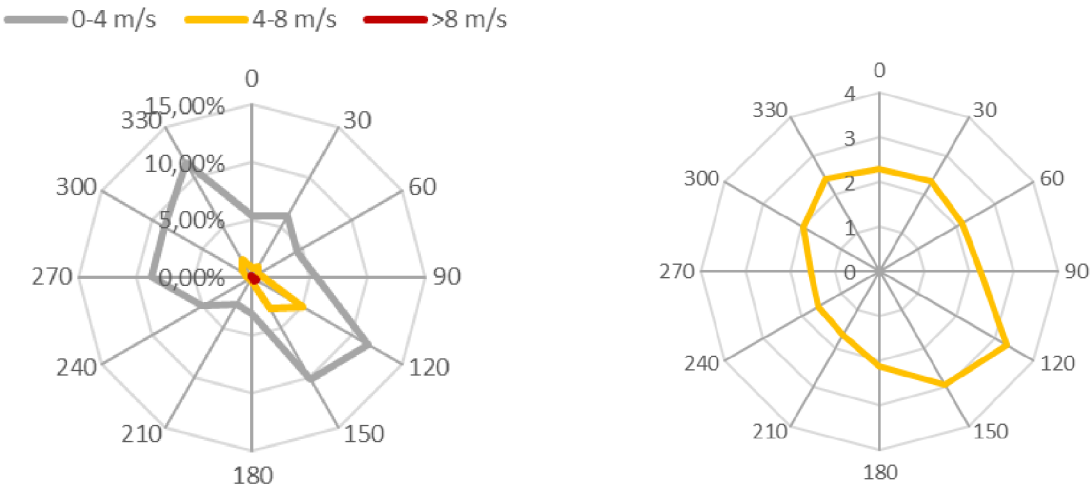
Na Obr. 32 (a) rozdělení směru větru v (%) a (b) průměrná rychlost větru v (m/s), hodnoty na krajích růžice °. Zdroj: Aplikace Vítr jsou viditelné hodnoty získané z modelu WRF, MEDARD [34] pro GPS souřadnice 49.235200N, 16.5705000E, které odpovídají GPS souřadnicím budovy P4 a výšce zvolené v aplikaci 10 m. Pro vizualizaci rozdělení směru větru odpovídá 0 severu, 180 jihu, jak je obvyklé pro rozdělení azimutů.



(a) (b)

Obr. 32 (a) rozdělení směru větru v (%) a (b) průměrná rychlost větru v (m/s), hodnoty na krajích růžice °. Zdroj: Aplikace Vítr

Na Obr. 33 jsou zpracovány hodnoty z meteorologické stanice umístěné na střeše P4 z celého roku 2018. Převažující směr větru určený z dlouhodobého měření na střeše byl zjištěn jako severovýchodní a jihozápadní, což odpovídá 315° a 135°. Rozložení směru větru odpovídá v dobré shodě s hodnotami z aplikace Vítr (model WRF, MEDARD), ale panuje rozdíl mezi rychlostmi větru. Průměrná rychlost větru je ve směru SV změřena v roce 2018 v hodnotě 2,4m/s, hodnota z aplikace Vítr je tomto směru o cca 0,7 m/s vyšší. Vyšší rychlost, může být dána tím, že model neobsahuje budovy jako překážky.



(a) (b)

Obr. 33 (a) rozdělení směru větru (%) and (b) průměrná rychlost větru (m/s) z realizovaného ročního měření

4.3.4 Realizace měření pro ověření simulace

Pro ověření CFD modelu byla zaznamenána rychlost větru krátkodobým měřením s jedním opakováním v listopadu 2021. Místo měření bylo vybráno na střeše budovy identické s dříve umístěnou meteostanicí [36], bez překážek tak, aby byl zajištěn co nejpřesnější sběr dat. [37] Teplota vzduchu byla v době měření na kladná (přestože je na fotografiích vidět sníh, teplota nad nulou byla ověřena) a srážky nulové, čímž byla zajištěna správná funkce žárových anemometrů, jimiž bylo ověřovací měření prováděno. anemometry byly umístěny na mobilních sloupech, ve výšce 1,7 m nad povrchem ploché. Zároveň bylo provedeno měření ve volném terénu ve vzdálenosti shodné s okrajem vybraného modelovaného prostoru kolem objektu. Zde byly anemometry umístěny opět na mobilním sloupu ve výšce 1,8m. Měření bylo provedeno žárovými anemometry o průměru sondy 7,5 mm.

Obr. 34 Letecký pohled na umístění měřících bodů, zdroj: mapy.cz

Pro umístění měřících přístrojů ve bodě v terénu bylo využito detekce signálu GPS, tak aby bylo dosaženo předem stanoveného umístění. Realizace krátkodobého ověřovacího měření byla provedena sondami Testo a Ahlborn a zaznamenána níže popsanými ústřednami. Foto z měření na střeše budovy je na a , čemuž odpovídají informace v tabulce roof = střecha, terrain = pole.

Obr. 35 Ověřovací měření, bod pole

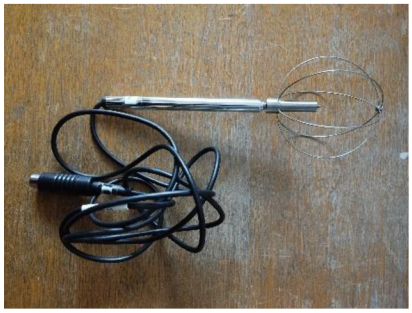
Obr. 36 Ověřovací měření, bod střecha

Tab. 3 Sondy, jejich parametry a použité dataloggery

Obr. 37 Thermoanemometrické čidlo Ahlborn FVA935TH5

Rychlost větru
měřicí rozsah: 0,20 až 20,00 m/s,
rozlišení: 0,01 m/s -
přesnost: ± (0,02 m/s +2 % z měř. hodnoty)

Teplota
měřicí rozsah: -20...+70 °C,
rozlišení: 0,1 °C



Obr. 38 Sonda se žhaveným drátkem Testo

Rychlost větru
měřicí rozsah 0 do 30 m/s
přesnost± (0.1 m/s + 5 % z mv) (0 do 2 m/s)
± (0.3 m/s + 5 % z mv) (2 do 15 m/s)
rozlišení 0.01 m/s
Teplota
měřicí rozsah: 0 do +50 °C
rozlišení: 0.1 °C
přesnost: ±0.3 °C

Obr. 39 Ústředna Almemo

Obr. 40 Ústředna Testo

Výsledky procentuálního zastoupení jednotlivých skupin rychlosti, které se vyskytly a průměrná rychlost větru v daném bodě jsou uvedené v Tab. 4 Výsledky krátkodobého měření rychlosti větru níže.

Tab. 4 Výsledky krátkodobého měření rychlosti větru

	0-4 m/s	> 4 m/s	průměrná rychlost v m/s
střecha	98,36 %	1,67 %	0,94 ± 0,15
terén	81,96 %	18,04 %	2,70 ± 0,27

4.3.5 Odchylky měření

Rychlosti větru byly vyhodnocovány ve třech rychlostních skupinách, stejně jak je hodnotí v aplikaci Vítr Akademie věd ČR. Tyto třídy jsou 0-4 m/s, 4-8 m/s a více než 8 m/s. Data byla zpracována do větrných růžic krokem 30°C.

Nejistota typu A by zpracována pro data z meteorologické stanice byla vyhodnocena bodovým odhadem pravděpodobnosti s 95 % procentním intervalem spolehlivosti. Data byla uvažována jako na sobě nezávislé hodnoty. Bodový odhad je určený pomocí Weibullova rozdělení viz odstavec 2.2.3 Proudění větru, které je pro proudění větru udáváno jako nejvhodnější [45] a intervaly spolehlivosti jsou počítány na základě asymptotické normality pomocí tzv. delta metody.

Větrné růžice v uvedených skupinách s daným rozpětím rychlosti s výsledným intervalem odchylky lze nalézt v příloze práce. Rozsah výsledného intervalu je úzký, protože vyhodnocovaných dat bylo velké množství. Takto úzký interval vycházel i při srovnání vyhodnocení nejistoty podle bodového odhadu s Weibullovým rozdělením s vyhodnocením s binomickým rozdělením.

4.4 SIMULAČNÍ ČÁST

4.4.1 Výběr simulačního softwaru

Z dostupných simulačních nástrojů je nutné vybrat takový, který optimálně zpracuje proudění větru na střeše objektu. Proudění větru, jak bylo popsáno výše je turbulentního charakteru a je faktem, že žádný model turbulence není univerzálně použitelný pro všechny typy úloh. Výběr turbulentního modelu závisí uvážení fyzikálních charakteristik proudění, na úrovni požadované přesnosti řešení, na dostupných prostředcích pro výpočet a množství možného času pro řešení dané simulace.

Metody RANS nejsou vhodné pro modelování nestabilit jakéhokoli druhu, neboť nejsou schopné popsat vývoj malých poruch v čase. Není jimi spolehlivě možné modelovat přechod do turbulence ani odtržení mezní vrstvy. Výpočty získané pomocí metod RANS by však měly být vždy doplněny ověřovacím experimentem nebo alespoň kvalitativním srovnáním s publikovanými výsledky experimentů na podobných úlohách. [18] Model turbulence LES zanedbává malé víry turbulence a tímto procesem zkracuje dobu výpočtu, je vhodný pro simulaci proudění větru nad složitým terénem [16]. Modely založené na RANS ukazují na dobrý kompromis mezi výpočetním časem a přesností výsledků [17]. Potřeba výpočetního výkonu metodou LES jsou vyšší než u RANS a v praktických aplikacích mají výsledky nižší kvalitu, postupy s nejlepší praxí zabývající se metodou LES vedou k nižšímu spoléhání se na tuto metodu. [18]

Pro analýzu proudění větru nad střechou budovy byl vybrán CFD software ANSYS Fluent (ver. 19.2, ANSYS Inc., CA, USA), který umožňuje jak simulaci proudění, jak mocí metody LES, tak různými druhy RANS. (např. k-ε model, k-ω model, Reynold stress model, Spalart-Allmaras model).

4.4.2 CFD model

Jak již bylo zmíněno výše, CFD je výpočetní numerická metoda užívaná k predikci proudění vzduchu, k čemuž využívá rovnice zachování hmotnosti [28], hybnosti a energie. Tyto rovnice následují:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \tag{42}.$$

Rovnice (42) obsahuje zákon zachování hybnosti, kde S_m lze nazvat hmotnostním členem (kgm^{-3}s^{-1}), ρ je hustota (kgm^{-3}), ρ je čas (s), ∇ divergence a $\vec{v}$ je vektor rychlosti proudění.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \tag{43},$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla\left(\vec{v}(\rho E + p)\right) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum h \vec{J} + \left(\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}\right)\right) + S_h \tag{44},$$

Ve vztazích (43) a (44) je p je statický tlak (Pa), $\bar{\tau}$ tenzor napětí (Pa), $\rho \vec{g}$ je gravitační síla tělesa (kg m^{-2} s^{-2}), $\vec{F}$ vnější síla tělesa (N), E je celková energie (J), k_{eff} je efektivní vodivost (Wm^{-1}K^{-1}), h citelná entalpie (J mol^{-1}), $\vec{J}$ je difúzní tok látek (kgm^{-2}s^{-1}) a S_h je zdroj tepla (Wm^{-2}).

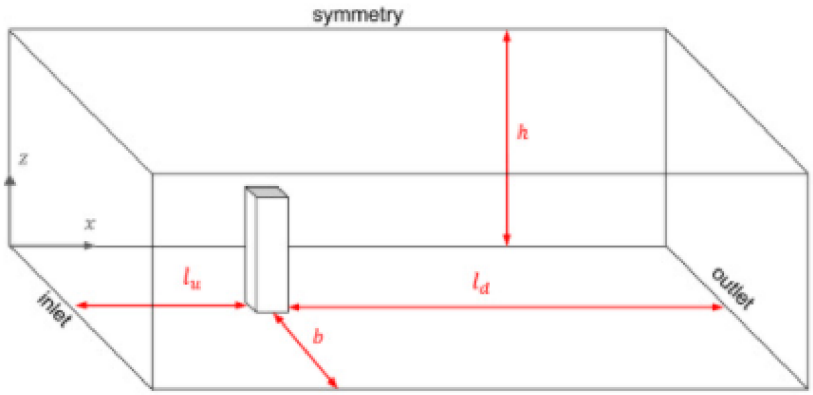
Pro simulaci byl vybrán model turbulence RANS k-ε, jehož základní charakteristika je uvedena výše v kapitole 2.3.2 Druhy modelů turbulence Rovnice RANS, tak jak jsou uvedeny v Ansys User Guide jsou následující:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{45},$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_J} + \frac{\partial u_J}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_{ij}}(-\rho\overline{u_i' u_j'}) \tag{46},$$

kde t je čas (s), u je střední rychlost (ms^{-1}), u' je fluktuující část rychlosti (ms^{-1}) a μ dynamická viskozita (kgm^{-1}s^{-1}). [28]

4.4.3 Kvalita výpočetního modelu a sítě



Obr. 41 Dimenze určující výpočetní doménu [52]

Jedním z nejdůležitějších faktorů, který ovlivňuje přesnost a délku výpočtu CFD simulací, je velikost výpočetní domény. Pro simulaci proudění větru okolo budov je důležité správně určit rozměry okolního prostoru. V případě příliš krátkých vzdáleností může dojít k deformaci výsledného pole proudění větru. Konkrétní délky doporučené pro simulaci proudění vzduchu kolem budovy jsou:

Nejmenší vhodná vzdálenost od okraje zkoumaného objektu k vtoku je rovna pětinásobku výšky objektu. [18]

Vhodná výška prostoru se rovná minimálně desetinásobku výšky budovy. Existuje takzvaný efekt blokování větru. Za budovou je recirkulace větru [18] a dostatečná vzdálenost l_d se rovná trojnásobku výšky budovy.

U sítě je nutné zkontrolovat kvalitu prvků, což lze provést několika způsoby. Jedním z určujících parametrů sítě je šikmost, která určuje kvalitu ortogonality sítě. U trojúhelníkových buněk by šikmost neměla překročit 0,85 a u čtyřstěnných buněk by šikmost neměla překročit 0,9. Celkově vzato, podle nejlepší praxe, je doporučeno, aby se minimální hodnoty kvality sítě pohybovaly nad 0,1. Kvalita sítě významně ovlivňuje přesnost a stabilitu numerického výpočtu. [21]

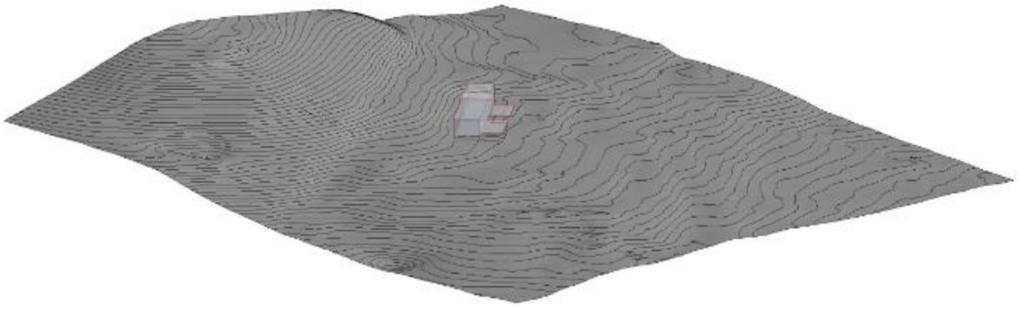
4.4.4 Geometrický model

3D model trénu by vytvořen s využitím opensource dat Českého úřadu zeměměřičského a katastrálního (ČÚZK). Údaje pro vnější tvar budovy P4 poskytlo vědecké centrum AdMaS, jež je vlastníkem budovy. Byly použity různé softwarové balíčky pro předzpracování, konkrétně Revit (ver.2021, Autodesk Inc., USA) s doplňkem BIMTech Tools pro Revit (ver.2.3.3., BIM Technology sro, CZ), AutoCAD (ver. 2019, Autodesk Inc., USA), Fusion 360 (cloud, Autodesk Inc., USA) a (DesignModeler (ver. 19.2, ANSYS Inc., USA). Pro získání dat z ČÚZK byl použit Revit s doplňkem BIMTech Tools. Zdrojová data z ČÚZK jsou omezena na čtvercové o straně s délkou 180 m s rovnoběžností stran se základními směry (S,J,V,Z), takže bylo potřeba získat více čtverců pro vytvoření komplexního terénu a jednotlivé body vrstevnic se pak v částech spojení překrývají. S využitím AutoCADu jsem zpět importovala mapu s čistými vrstevnicemi do Revitu a nově byla vytvořena triangulární síť terénu. Třetí krok obsahoval vytvoření pevného objektu s prostorem

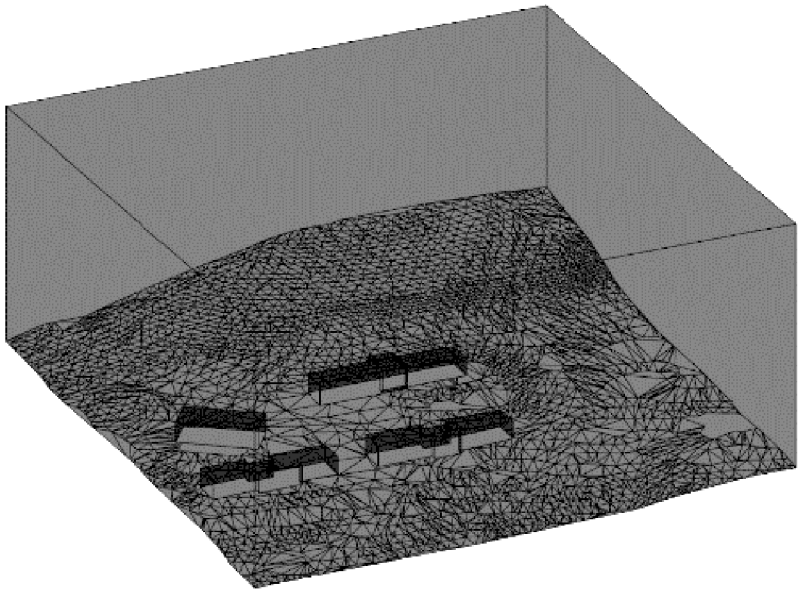
pomocí softwaru Fusion 360. Posledním bodem absolvovaného postupu byla volba importního formátu pro přenesení 3D komplexního topografického modelu do DesignModeleru, jež je součástí softwaru Ansys Fluent.

Pro tento krok je důležité vědět, že např. není možné importovat soubory ve formátu STEP obsahující modely s objemem větším než 500 metrů krychlových v libovolném směru od počátku, i když je zapnutá možnost "Povolit podporu velkých modelů". [44] Vzhledem k výše uvedené skutečnosti byl jako formát importu geometrie zvolen formát ACIS (.sat). Pro vyhodnocení nutnosti osadit okolí budovy dalšími objekty byly vytvořeny dvě varianty modelu.

Varianta A obsahuje kromě budovy P4 další budovy ve vědeckém areálu. Toto je vidět na Obr. 43 Hotový model před zasíťování (varianta B s budovami v areálu). Varianta B v podobě modelu v Revitu před vytvořením prostoru je vidět na Obr. 42 Výsledná mapa vrstevnic s budovou P4. Ve variantě B jsou ostatní budovy nahrazeny délkou aerodynamické drsnosti z_0 obdélníku podle Wieringy, jak je popsáno v kapitole 2.3.3 Okrajové podmínky výše.



Obr. 42 Výsledná mapa vrstevnic s budovou P4 (varianta A)



Obr. 43 Hotový model před zasíťování (varianta B s budovami v areálu)

4.4.5 Parametry simulačního modelu

Po dokončení modelu přichází na řadu generování sítě a uspořádání vnitřní mřížky. Pro obě varianty, kde varianta A je pouze s terénem, kde areál tvoří obdélník s různou výškou aerodynamické drsnosti a objektem P4 a varianta B s budovou P4 a s budovami modelovanými objemem jako okolními překážkami. Ostatní parametry a okrajové podmínky jsou voleny identicky. Vzhledem ke složitosti struktury terénu byla pro obě varianty zvolena tetrahedrální síť. Pro rozměry prostoru 300 x 300 x 150 m od rohu byla zvolena maximální velikost buněk mřížky 3 m pro obě varianty. Kvalita sítě byla zkontrolována a parametry kvalita prvku a maximální šikmost vyhovují, jak je vidět v tabulce 2. Ortogonální kvalita prvku by měla být vyšší než 0,1 a maximální šikmost by měla být nižší než 0,9. [53] Tyto parametry jsou shrnuty v tabulce Tab. 1 Aktualizované hodnoty koeficientu aerodynamické drsnosti Davenport-Wieringa [40]. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 5 Výsledky analýzy kvality sítě níže. Také jednotlivé okrajové podmínky užité v simulaci jsou shrnuty v tabulce a to v Tab. 6 Užité okrajové podmínky .

Tab. 5 Výsledky analýzy kvality sítě

Kritéria kvality sítě	**Varianta A**	**Varianta B**
Ortogonální kvalita prvků (min)	0,18243>0,1	0,15607>0,1
Maximální šikmost prvků (max)	0,89783<0,9	0,89151<0,9

Tab. 6 Užité okrajové podmínky

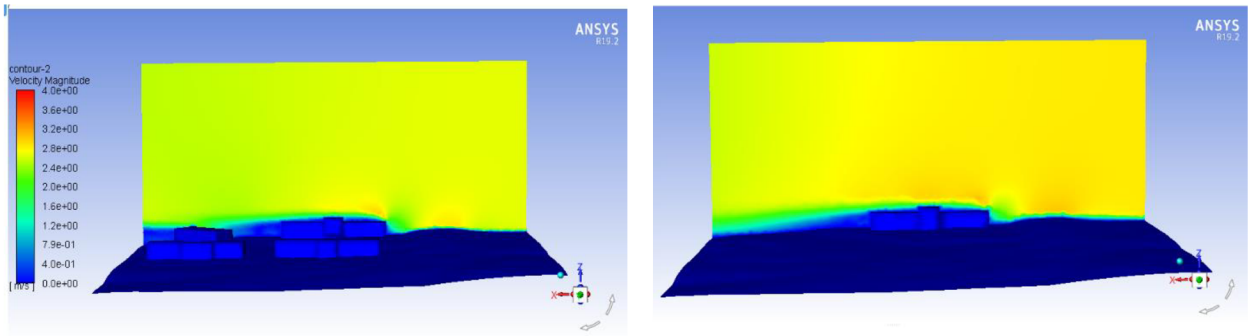
Hranice modelu	**Typ**	**Varianta A**	**Variant B**
inlet	velocity inlet - wall perpendicular to the main direction of the wind flow from measurement	velocity magnitude = 2,7 m/s	
outlet	pressure outlet	zero-gauge pressure	
bottom	solid wall - roughness height z_0	z_0 = 0.03 m	
grounds	solid wall - roughness height z_0	z_0 = 1,0 m	buildings in their real volume
top	symmetry		
other sides	symmetry		

Při tvorbě modelu byla věnována pozornost obecným zásadám pro modelování proudění vzduchu, jak je uvedeno výše, v části 4.4.3.Kvalita výpočetního modelu a sítě .Mřížka o rozměrech prvku nominálně rovných 3 m poskytuje dostatečnou kvalitu pro výpočet výsledku při přijatelné době výpočtu.

4.4.6 Srovnání variant pro užití ke stanovení potenciálu

Výsledné obrazy proudění po simulaci proudění s výpočetním modelem RANS k-epsilon se vstupní rychlostí rovnou 2,7m/s se obrazu rychlosti proudění pro obě varianty A i B na Obr. 44 Výsledné

obrazy proudění rychlost proudění pro varianty B (B) a A (A) níže ukazuje, že proudění vzduchu je deformováno zleva, ale výsledný obraz proudění vzduchu nemá být použit pro analýzu pohodlí chodců nebo bezpečnost proudění vzduchu pro chodce v okolí budovy. Pro naše účely je klíčová plocha na vrcholu střechy budovy P4 ve stanoveném bodě, kde byla umístěna meteorologická stanice. Tato oblast není výrazně ovlivněna ukončením prostoru na levé straně, které je vidět na obrázcích níže.



(B) (A)

Obr. 44 Výsledné obrazy proudění rychlost proudění pro varianty B (B) a A (A)

Hodnota rychlosti proudění větru ve výšce 1,7 m nad střechou v použitém bodě použitém pro validaci simulace krátkodobým měřením je při užité vstupní rychlosti rovné hodnotě naměřené v bodě terrain (2,7 m/s ± 0,27) ve variantě B rovna 0,56 m/s a ve variantě A je rovna 0,8 m/s. Hodnota odpovídající těmto simulovaným hodnotám získaným z ověřovacího měření je hodnota naměřená na střeše a to 0,94 m/s ± 0,15. To ukazuje, že pro tyto účely je spolehlivější vytvořit objem okolní budovy, ale stanovení rychlosti proudu vzduchu v ustálené oblasti (oblasti bez turbulencí), která je jako oblast pro umístění malých větrných elektráren na střeše zcela zásadní, (cca 3,5 m), je tento rozdíl zanedbatelný a okrajová podmínka délky aerodynamické drsnosti v oblasti obdélníku nahrazujícím obdélníky budov místo skutečného objemu budov pro zpracování hodnot ve větší výšce může být použita.

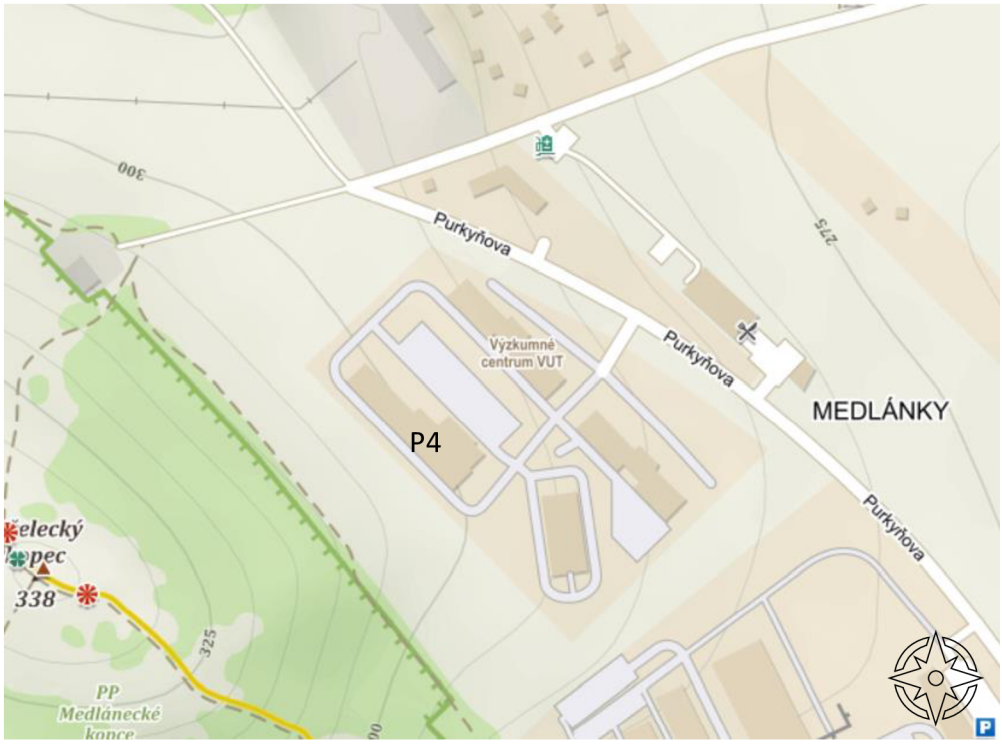
5 STANOVENÍ POTENCIÁLU PRO VYBRANÝ OBJEKT

5.1 ZJIŠTĚNÍ PARAMETRŮ BUDOVY A OKOLÍ

Potenciál využití energie větru na střeše budovy je zjišťován pro plochou střechu administrativní budovy P4 stojící v areálu AdMaS v Brně na Purkyňově ulici. Nadmořská výška terénu je v místě stavby budovy P4 295 m n. m., areál je umístěný ve svahu a střecha není kryta ostatními budovami a okolí se nachází stejně vysoké budovy, volný terén a ve větší vzdálenosti také les.

Tab. 7 Základní parametry budovy, určující simulaci:

Základní vnější rozměry:	Výška: 11,35 m Délka: 81 m Šířka: 15 m	
GPS souřadnice	49.235200N	16.5705000E
Orientace na světové strany:	Čelní strana budovy:	SZ



Obr. 45 Umístění budovy P4 v okolí, zdroj: mapy.cz

5.2 ZJIŠTĚNÍ RYCHLOSTI VĚTRU A SMĚRU VĚTRU

Bod 2 navržené metody se zabývá zjištěním dat náležejících proudění větru. Data jsou získána z akademie věd ČR dle GPS souřadnic budovy z modelu Medard z aplikace Vítr. Obsahují níže zobrazené údaje: a to hustotu pravděpodobnosti rychlosti větru viz. Obr. 47 Hustota

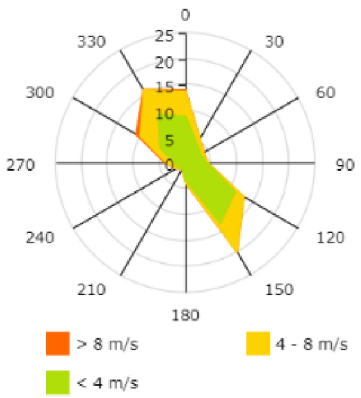
pravděpodobnosti rychlosti větru zdroj: aplikace Vítr, tabulku s údaji o četnosti proudění větru dle jeho směru, parametry větru *A* a *k* podle Weibulla, z nichž je vyvozeno rozdělení proudění větru do jednotlivých intervalů, větrná růžice s m/s,), viz. Obr. 46 Výstup z aplikace Vítr pro GPS souřadnice budovy P4. Poslední dva sloupce ve zde zobrazené tabulce se věnují výrobě energie ve volném prostoru 10 m nad zemí a nelze je použít pro střechu budovy.

zem. šířka: 49°14'6.270"N
zem. délka: 16°34'13.858"E

výška nad zemí (střed rotoru): 10 m
průměr rotoru: 5 m
maximální výkon: 5000 W

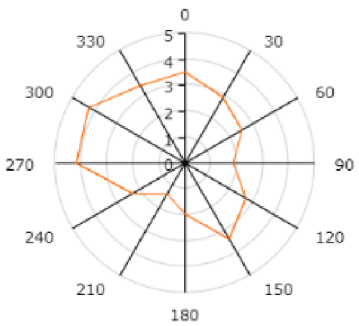
směr větru [°]	relativní četnost				prům. rychlost [m/s]	parametry Weibull		výroba energie	
	vše	0-4 m/s	4-8 m/s	> 8 m/s		A [m/s]	k	roční [kWh]	relativně
0	14.1%	9.02%	4.85%	0.23%	3.51	3.96	2.01	337.0	15.70%
30	5.5%	4.34%	1.15%	0.00%	2.92	3.29	2.29	54.1	2.52%
60	4.1%	3.33%	0.72%	0.05%	2.53	2.77	1.40	82.2	3.83%
90	4.4%	4.18%	0.22%	0.00%	1.86	2.08	1.68	13.4	0.62%
120	13.0%	11.12%	1.88%	0.00%	2.71	3.05	2.44	88.0	4.10%
150	19.9%	13.36%	6.45%	0.09%	3.38	3.82	2.27	323.5	15.07%
180	3.9%	3.45%	0.42%	0.03%	1.96	2.06	1.16	53.9	2.51%
210	1.4%	1.35%	0.05%	0.00%	1.37	1.45	1.18	3.6	0.17%
240	2.2%	1.88%	0.31%	0.01%	2.34	2.60	1.54	24.6	1.15%
270	4.0%	2.06%	1.69%	0.25%	4.19	4.73	1.93	184.9	8.61%
300	11.1%	5.71%	4.45%	0.94%	4.28	4.81	1.77	689.6	32.12%
330	16.4%	10.75%	5.54%	0.11%	3.44	3.89	2.24	291.9	13.60%
celkem	**100%**	**70.56%**	**27.72%**	**1.72%**	**3.22**	**3.62**	**1.79**	**2146.9**	**100%**

Rozdělení směrů větru (%)



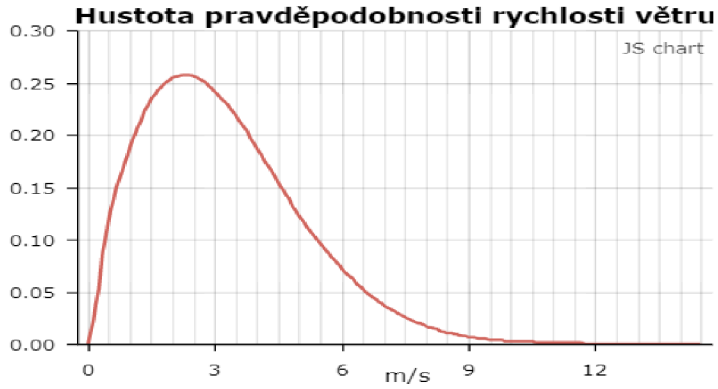
JS chart

Průměrná rychlost větru (m/s)

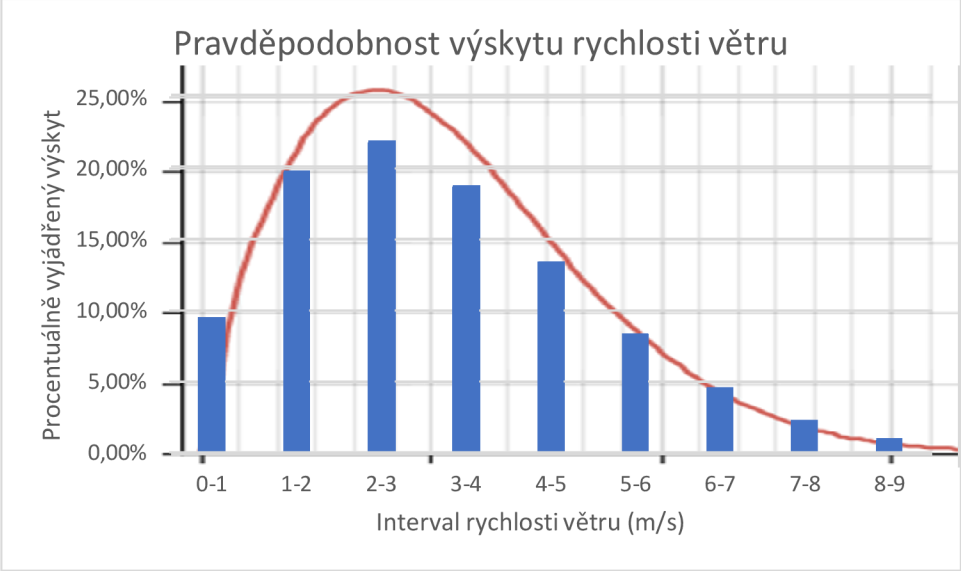


JS chart

Obr. 46 Výstup z aplikace Vítr pro GPS souřadnice budovy P4



Obr. 47 Hustota pravděpodobnosti rychlosti větru zdroj: aplikace Vítr



Obr. 48 Zastoupení rychlostních skupin (intervalů) proložené grafem hustoty pravděpodobnosti

Pro účely zpracování proudění větru je pomocí na základě parametrů A a k a průměrné rychlosti proudění podle Weibullova rozdělení, vztahu (25), uvedeného na straně 18 rozdělen vítr do jednotlivých intervalů, jehož střední hodnota je vstupem do CFD simulace. Rozdělení do intervalu s jeho procentuálním zastoupením v Tab. 8 Rozdělení pravděpodobností rychlostí proudění vzduchu pro polohu budovy P4.

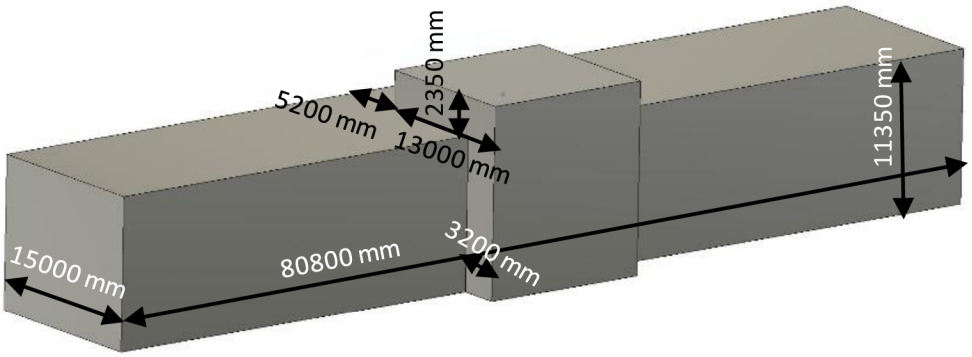
Převažující směr větru (pro ustanovení simulace, zejména stěny prostoru pro vstup (inlet) a výstup (outlet)) je 330°, dle toho je stanovena stěna prostoru – vstup simulace (kolmá na tento směr).

Tab. 8 Rozdělení pravděpodobností rychlostí proudění vzduchu pro polohu budovy P4

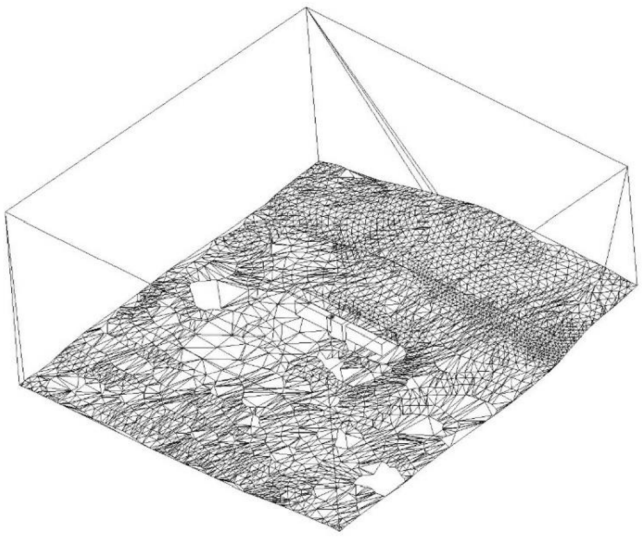
Interval rychlosti větru m/s	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13
Sloupec	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Pravděpodobnost výskytu [%]	9,51	19,72	21,82	18,70	13,43	8,37	4,60	2,25	0,99	0,40	0,14	0,05	0,01

5.3 VYTVOŘENÍ MODELU BUDOVY A PROSTORU

Třetím krokem je vytvoření modelu. V prostředí podporujícím stažení katastrálních map (zvolen REVIT s doplňkem BIM TechTools viz. Kapitola 4.4.1 Výběr simulačního softwaru. Je vytvořen terén. Dále jsou v Autocadu sloučeny linie terénu. Následně je v softwaru Fusion 360 vytvořena budova a prostor okolo ní. Tvorba modelu byla řízena základními zásadami, které jsou uvedeny v Tab. 9 Základní zásady pro tvorbu prostoru kolem budovy a užité hodnoty spolu s rozepsanými zásadami jsou v této tabulce uvedeny konkrétně pro model budovy s prostorem užité hodnoty.



Obr. 49 Základní rozměry budov



Obr. 50 Model budovy a prostoru z programu Fusion 360

Tab. 9 Základní zásady pro tvorbu prostoru kolem budovy a užité hodnoty

		(m)	v modelu
Výška budovy		H_{budovy}=	11,35 m
Minimální výška prostoru	$H_{min} = 10 \times h_{budovy}$=	113,5	120 m
Minimální vzdálenost od vtoku k budově	$L_u = 5 \times h_{budovy}$=	56,75	60 m
Minimální vzdálenost k výtoku od budovy	$L_{down} = 3 \times h_{budovy}$=	34,05	40 m
Orientace stěny vstupu okolního proudění do prostoru – dle převažujícího směru proudění vzduchu			330°

5.4 TVORBA SÍTĚ

Bod 4 metody obsahuje přenesení modelu ve formátu ACIS (.acis) do CFD prostředí s vytvořením kvalitní sítě hodnocení jednotlivých údajů k síti použité pro simulaci proudění jsou uvedeny níže v tabulce Tab. 10 Hodnocení kvality sítě (výchozími byli informace z kapitoly 4.4.5).

Tab. 10 Hodnocení kvality sítě

Prvky sítě	tetrahedrální
Počet uzlů	126144
Počet buněk	722506
Maximální velikost buňky	3 m
Šikmost (0 - velmi dobrá, nad 0,9 - špatná)	Minimální hodnota 0,0006346 Maximální hodnota 0,89783 Průměrná hodnota 0,25603
Ortogonální kvalita (1 - velmi dobrá, pod 0,1 - špatná)	Minimální hodnota 0,21969 Maximální hodnota 0,99593 Průměrná hodnota 0,84127
Zjemnění sítě na povrchu budovy a kolem ní (nominální velikost):	1 m
Poměr růstu buněk	1.2

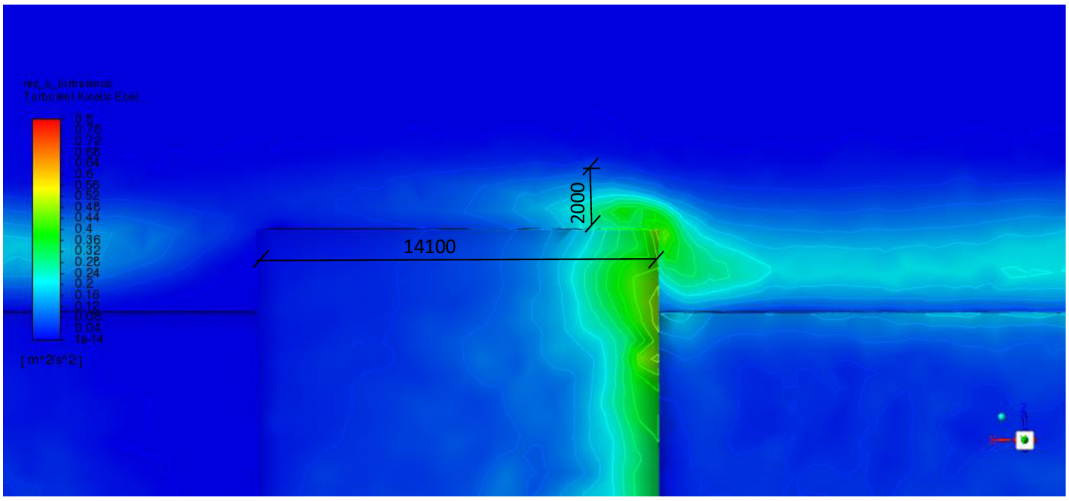
5.5 CFD SIMULACE

V pátém kroku byly provedeny simulace proudění větru pro okolí střechy budovy za stanovených okrajových podmínek, získání výsledků a export výsledků.

Tab. 11 Okrajové podmínky

Typ okrajové podmínky:	Strana, část	Detaily
Inlet	wall-x	velocity-inlet
Outlet	wall+x	pressure-outlet
Symmetry	top wall-y wall+y	
Wall	grounds forrest P4 surroundings	z_0 = 1,0 m, kat. 3 dle Wieringy – stejnoměrná zástavba kat.7. dle Wieringy – stejnoměrně vzrostlé lesy z_0 = 1,0 m z_0 = 0.03 m, kat. 3 Wieringy- rovinatá země s nízkou vegetací

Nejdříve byla vyhodnocena výška, ve které je proudění laminární. Pro budovu P4 je laminární proudění v bodě, kde bylo prováděno i experimentální měření s jistotou laminární od výšky 2 m na střechou pro nejčastěji zastoupenou rychlost větru, a to na horní hranici intervalu, pro hodnotu rychlosti větru 3 m/s.



Obr. 51 Kinetická energie turbulence pro nejzastoupenější interval rychlosti proudění vzduchu

Poté byly na základě rozdělení do jednotlivých intervalů stanoveny vstupní rychlosti do simulace (velocity-inlet) a vyhodnocena rychlost prodění v dané výšce nad střechou budovy. Výsledné

rychlosti proudění větru nad střechou budovy jsou pro jednotlivé intervaly spolu s pravděpodobností výskytu dle Weibullova rozdělení jsou uvedeny níže v tabulce Tab. 12 níže:

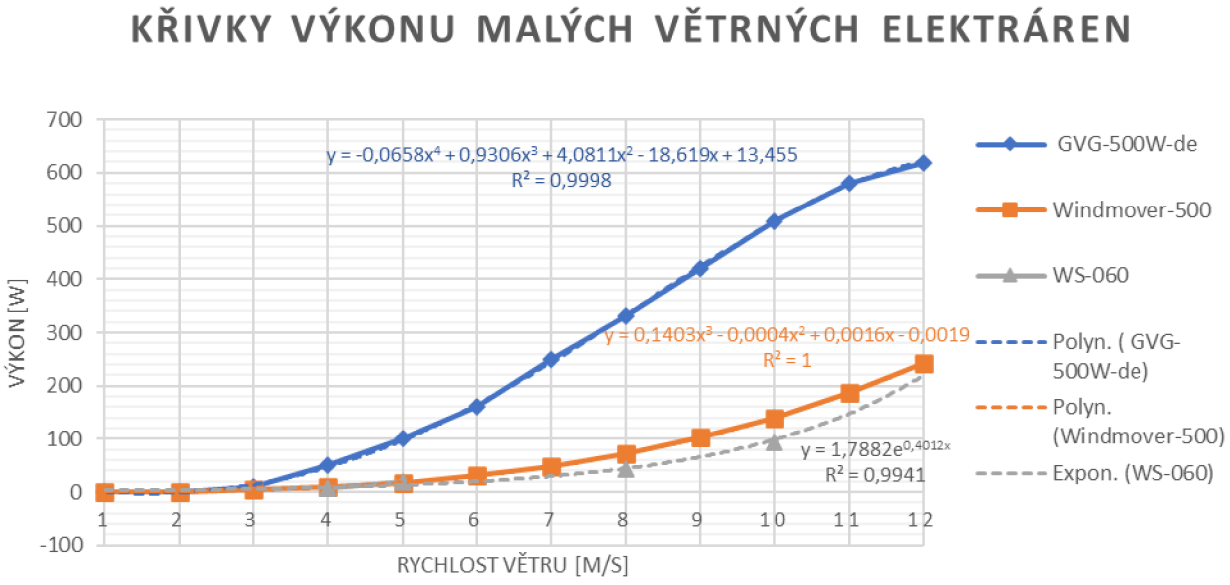
Tab. 12 Výsledky pro jednotlivé intervaly rychlosti

Rozsah intervalu	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
č. intervalu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Zastoupení intervalu v %	9,51	19,72	21,82	18,70	13,43	8,37	4,60	2,25	0,99	0,40	0,14	0,05
Vstupní rychlost do simulace v m/s	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5
Rychlost proudění nad střechou ve výšce 2 m (střední hodnota zjištěného intervalu) v m/s	**0,51**	**1,56**	**2,56**	**3,58**	**4,61**	**5,63**	**6,36**	**7,34**	**8,32**	**9,30**	**10,28**	**11,26**

5.6 VOLBA TYPU VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY A VÝŠKY STOŽÁRU

Za účelem výběru větrné elektrárny vhodné pro umístění na střeše objektu byly vybrány tři malé větrné elektrárny od různých výrobců. Všichni tito výrobci garantují nízkou rozběhovou rychlost a poskytují potenciálnímu kupci větrné elektrárny parametry výkonu při stanovených rychlostech větru. Parametry a foto vybraných větrných elektráren GVG-500W-de, Windmover-500 a WS-060 lze nalézt v přílohách práce P1-P3 viz. 11 Seznam příloh a přílohy práce.

Výběr typu větrné elektrárny dle k linií náležející křivky produkce elektrické energie. Výška stožáru je volena tak, aby bylo dosaženo výšky neovlivněné tvarem budovy (tj. oblasti s laminárním prouděním vzduchu a vyšší rychlostí proudění vzduchu). V prvním kole ověřování byla zvolena výška stožáru s větrnou elektrárnou dohromady a to 2,5 m.



Obr. 52 Křivky výkonu vybraných větrných elektráren

Dále jsou body výkonu větrných elektráren proloženy, nejvhodnější spojnicí trendu. Výsledné vztahy pro spojnici trendu jednotlivých větrných elektráren spolu s hodnotou spolehlivosti R jsou uvedeny výše na Obr. 52 Křivky výkonu vybraných větrných elektráren. Na základě křivek výkonu byla jako nejlepší vybrána větrná elektrárna GVG-500W-de.

5.7 POČET VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

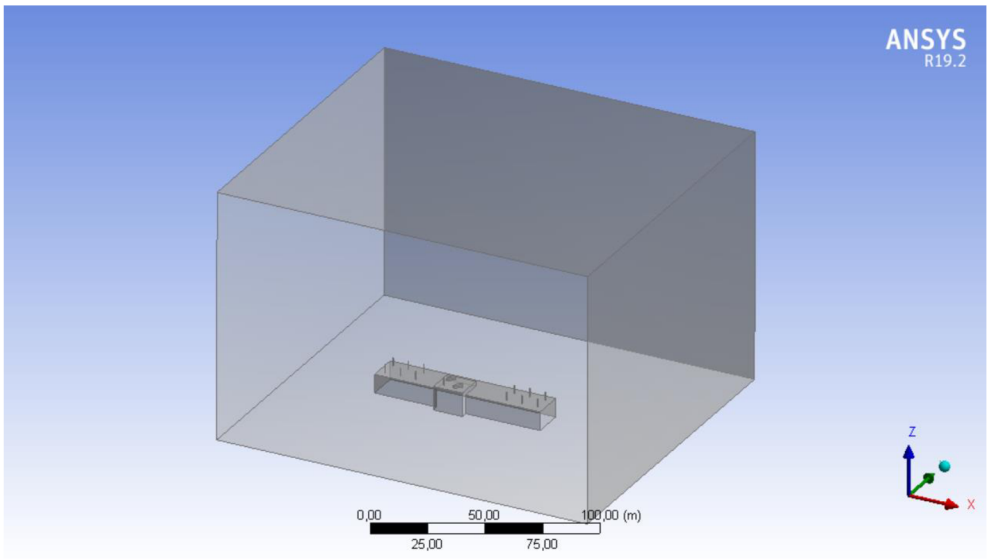
Stanovení počtu umístitelných větrných elektráren na základě volného prostoru na střeše, její únosnosti, m^2 nutných pro umístění 1 větrné elektrárny) a předchozího výsledku proudění na střeše budovy (do oblastí s výrazně nižší rychlostí proudění nemá smysl větrnou elektrárnu umisťovat) Výsledný počet větrných elektráren na střeše také podléhá dalšímu uvedenému kroku 5.8 Analýza změn rozložení větrných sil dle umístění překážky. V prvním návrhu bylo navrženo celkem 13 větrných elektráren jejich rozložení viz. Obr. 54 Rozmístění větrných elektráren

5.8 ANALÝZA ZMĚN ROZLOŽENÍ VĚTRNÝCH SIL DLE UMÍSTĚNÍ PŘEKÁŽKY

Pro ověření proudění na střeše, a toho, že mezi jednotlivými elektrárnami je mezera s lineárně proudícím vzduchem, který není ovlivněn blízkostí další větrné elektrárny či dalších prvků na střeše budovy. Pokud je již střecha osázena jinými prvky, které mohou výrazně ovlivňovat proudění vzduchu nad střechou jsou také zahrnuty do simulace. V tomto případě jsou takovýmito výraznými prvky fotovoltaické panely.

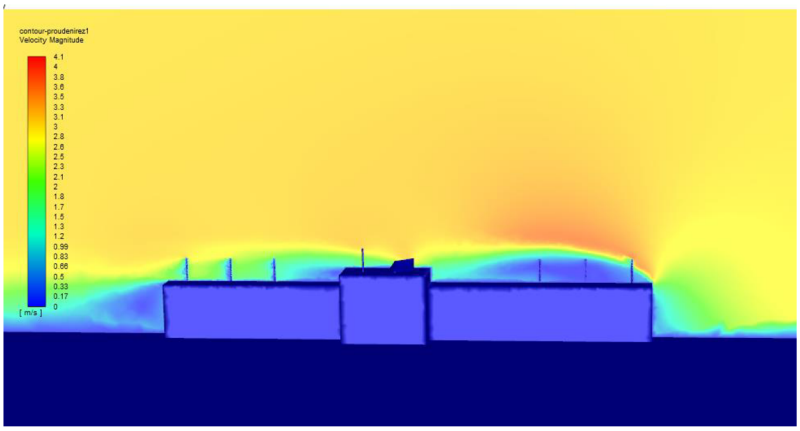
Obr. 53 Fotografie horní střechy s fotovoltaickými panely

Zjednodušený model střechy s osazenými překážkami a větrnými elektrárnami je k vidění níže na Obr. 54 Rozmístění větrných elektráren na střeše.

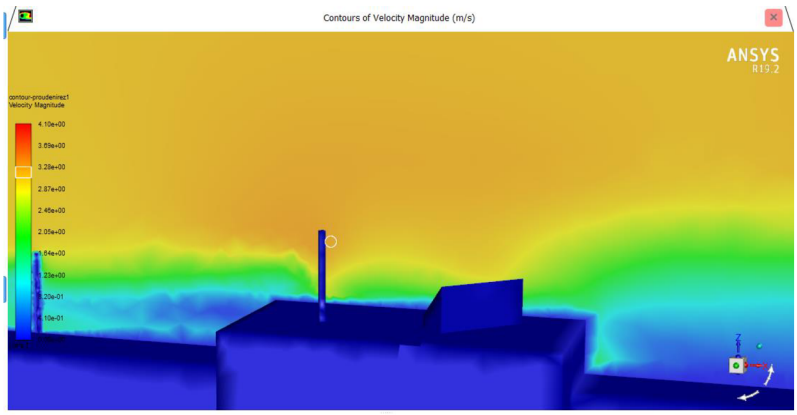


Obr. 54 Rozmístění větrných elektráren na střeše

Dále je ukázáno na Obr. 55 Obraz rychlosti proudění větru se střechou a stožáry o výšce 4200 mm proudění s řezem budovy v polovině, na které, je vidět, že výška, do které jsou větrné elektrárny na pravém křídle osazeny není vhodná. Na levém křídle je vidět, že se je prodění za stožárem ovlivněno jeho jednotlivými kusy. Stožár umístěný uprostřed na zvýšené střišce se jeví jako dostatečně vysoký viz Obr. 56 Obraz proudění kolem stožáru o výšce 4200 mm na zvýšené střišce.

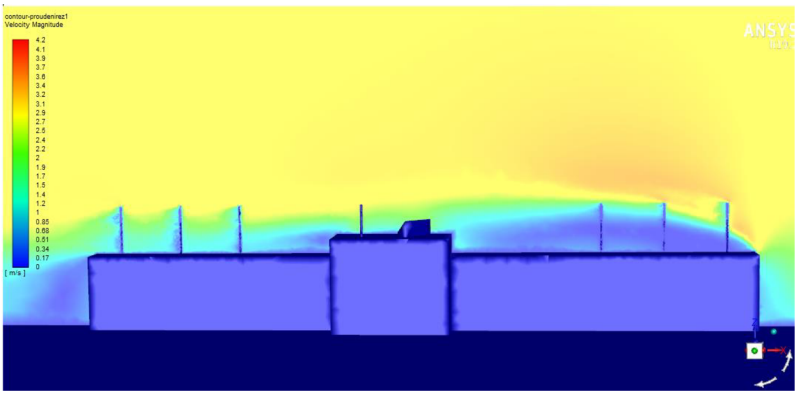


Obr. 55 Obraz rychlosti proudění větru se střechou a stožáry o výšce 4200 mm



Obr. 56 Obraz proudění kolem stožáru o výšce 4200 mm na zvýšené střišce

Proto byly stožáry k větrným elektrárnám umístěných na bocích zvýšeny na 5700 mm a provedena další simulace.



Obr. 57 Výška stožárů s větrnou elektrárnou na bočních stranách budovy 5700 mm s prouděním kolem budovy

Takto nahusto osazené větrné elektrárny na bocích budovy výrazně ovlivňují proudění pro dále osazené elektrárny. Kroky 6. až 8. se opakují, dokud není nalezeno jistoty, že se větrné elektrárny neovlivňují. Z tohoto potvrdíme počet větrných elektráren, kterými je možné budovu osadit. V tomto konkrétním případě byla analýza rozložení větrných sil kolem stožárů po dvou kolech simulací ukončena a bylo rozhodnuto dokončit určení potenciálu s umístěním 1 větrné elektrárny o výšce 4200 mm na zvýšenou část střechy uprostřed budovy.

5.9 URČENÍ VÝSLEDNÉHO POTENCIÁLU

Tab. 13 Výpočet výkonu větrné elektrárny GW-500-de pro jednotlivé intervaly rychlosti

Rozsah intervalu	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
č. intervalu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Zastoupení intervalu v %	9,51	19,72	21,82	18,70	13,43	8,37	4,60	2,25	0,99	0,40	0,14	0,05
Rychlost proudění nad střechou ve výšce 2 m (střední hodnota zjištěného intervalu) v m/s	**0,51**	**1,56**	**2,56**	**3,58**	**4,61**	**5,63**	**6,36**	**7,34**	**8,32**	**9,30**	**10,28**	**11,26**
Výkon (y) ve W při zastoupení jedné třídy	0	0	5,31	31,13	75,72	138,13	191,97	273,71	361,66	449,45	529,28	591,87
Výkon (y) W při procentuálním zastoupením intervalu	0	0	1,16	5,82	10,17	11,56	8,83	6,16	3,58	1,80	0,74	0,30

Výkon je vypočítán dle vztahu (47), který je uveden již na Obr. 52 Křivky výkonu vybraných větrných elektráren na str. 56.., na obrázku uvedené jednotlivé body výkonu dle rychlosti jsou získány od

výrobců a pro účel výpočtu jsou body proloženy polynomiální křivkou. y ve vztahu (47) odpovídá výkonu ve W a x je rovno rychlosti v m/s. Výsledný výkon pro jednotlivé intervaly lze nalézt v tabulce Tab. 13 Výpočet výkonu větrné elektrárny GW-500-de pro jednotlivé intervaly rychlosti výše.

$$y = -0{,}0658x^4 + 0{,}9306x^3 + 4{,}0811x^2 - 18{,}619x + 13{,}455, \quad (47)$$

při $R^2 = 0{,}9998$

Procentuální zastoupení intervalu se vztahuje k zastoupení rychlosti větru během roku z výkonu zpracovaného ve W poníženým o jeho procentuální zastoupení během roku pak dostaneme na základě vztahu (37) hodnotu obsahující množství energie vyprodukované za rok P_{1Y} pro navržený počet n větrných elektráren. Pro budovu P4 bylo určeno:

$$P_{1Y} = n \cdot P_{1E} =$$
$$P_{1Y,P4} = 439{,}01 \text{ kWh}$$

Výsledné množství produkovatelné elektrické energie z energie větru za rok, které je výslednou hodnotou potenciálu pro budovu P4 činí při zvolené elektrárně GW-500-de 439,01 kWh.

Závěrem lze ke stanovení potenciálu říci, že konkrétně zde, na referenční budově P4 by se jevilo jako vhodné uvolnit zvýšenou část střechy pouze pro osazení větrnými elektrárnami a fotovoltaické panely umístit na boky budovy. Pokud by se tak majitel budovy rozhodl učinit nyní, kdy jsou panely již osazeny, znamenalo by to zvýšené náklady, ale bylo by možné dále analyzovat a patrně i navýšit potenciál využitelnosti větrné energie na střeše budovy.

6 LIMITY POUŽITÍ MALÝCH VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

Návrh osazení konkrétními malými větrnými elektrárnami podléhá kontrole statika pro únosnost střechy a kontrole hluku a vibrací. Kontrola hluku a vibrací je však spíše záležitostí technologického vývoje a není předmětem této práce, přesto je nutné jejich dopad je krátce uvést.

V Rakousku byly v rámci projektu SmallWindPower@Home testován u více typů malých větrných turbín jejich akustický výkon, vibrace a kmity. Akustický výkon je obvykle udáván i samotným výrobcem. Vibrace malých větrných elektráren mohou být způsobeny mechanickými silami a silami souvisejícími s větrem, přičemž je třeba říct, že tyto síly mohou i vybuzovat vlastní frekvence u svých součástí (stožár, generátor, list rotoru) a vést tak k rezonančním vibracím a následnému poškození konstrukce díky předčasné únavě materiálu viz

Obr. 58 Škody způsobené vibracemi níže. Obecně zvýšené zatížení může vést k únavě materiálu, únavovým lomům, opotřebení ložisek a zatížení budovy. [27] Toto je nutné toto zohlednit při statickém posouzení budovy. Zejména u rodinných domů to může někdy znamenat, že malé větrné elektrárny nelze instalovat nebo je nelze instalovat požadovaným způsobem z důvodu statického přetížení po zamýšleném umístění větrné elektrárny.

Obr. 58 Škody způsobené vibracemi [27]

Malé větrných turbíny namontované na budovách mohou také nepříznivě působit na osoby pohybující se uvnitř a v blízkosti budovy s instalovanou větrnou elektrárnou, a to emisemi hluku, infrazvukem i hlukem a vibracemi šířenými. Znalost frekvenčního spektra, posunu, rychlosti a zrychlení vibrací se tak jeví jako nezbytná pro bezpečný a efektivní provoz. Dále je nutné pamatovat na to, že výkon větrné elektrárny může v našem klimatickém pásmu ovlivnit námraza [27].

7 ZÁVĚR

V rámci práce bylo provedeno dlouhodobé experimentální měření meteorologickou stanicí na střeše budovy s rovnou střechou – budovy P4 ve vědeckém centru AdMaS, která je taktéž využívána v rámci pilotních programů chytrých regionů. Byly vytvořeny dva modely jeden pro terén s budovami a jeden s rozdělením terénu na sekce s náhradou budov oblastí s okrajovou podmínkou aerodynamické délky drsnosti z_0 v hodnotě 1 m pro uzavřenou, homogenní zástavbu dle Wieringy. Funkčnost simulace byla ověřena krátkodobým experimentálním měřením rychlosti větru v terénu v místě shodném se vstupem do simulace a na střeše budovy.

Dále byly srovnány data z celoročního měření a údaje získané z predikčního modelu Medard z Aplikace Vítr poskytované Akademií věd ČR. Byl stanoven převažující směr proudění větru, na jehož základě byl vytvořen tvar objemu prostoru kolem budovy. Pomocí softwaru Ansys Fluent s využitím CFD byl simulován proud větru v jednom převažujícím směru působící na vybranou budovu modelem turbulence RANS k-ε.

Na základě výsledné simulované rychlosti a obrazů proudění větru kolem střechy budovy je s pomocí četnosti jednotlivých rychlostí proudění větru nad střechou budovy stanoven její potenciál pro produkci elektrické energie z energie větru vybraným typem malé větrné elektrárny. Výsledný potenciál je závislý zejména na rychlosti proudění vzduchu v dané oblasti, volném prostoru na střeše a technologických možnostech vybrané malé větrné elektrárny.

Navržená metoda navazuje na snahu omezit produkci CO_2 v rámci celosvětové dohody Green Deal využitím obnovitelného zdroje energie – energie větru. Zároveň také navazuje na snahu o decentralizaci produkce elektrické energie v rámci zavádění chytrých regionů. Výsledné poznatky mohou posloužit k rozšíření mikrosítí a energetické soběstačnosti budov. Je možné do budoucna uvažovat s provázáním výsledků s IoT technologií.

Praktický přínos práce

Hlavní praktickým přínosem práce je možnost predikce využitelnosti střechy k produkci elektrické energie z energie větru již ve fázi návrhu budovy. Pro budovy již postavené je hlavním přínosem navržené metody zkrácení času potřebného ke zjištění využitelnosti střechy pro osazení větrnými elektrárnami, aniž je nutná realizace dlouhodobého měření rychlosti větru anemometry na střeše. Zároveň je vhodně posouzena výška i místo, do které by měla být větrná elektrárna umístěna. Tím, že není nutné dlouhodobé měření metoda také eliminuje možnost chybného osazení měřidel. Zároveň je možné dopředu eliminovat nevhodné rozmístění prvků na střeše budovy, které mohou bránit optimálnímu rozmístění větrných elektráren a snižují tak potenciál využitelnosti i větrné energie na střeše budovy. Díky tomu, že lze metodu využít již při návrhu budovy lze v této fázi přizpůsobit dopředu nosné konstrukce pro instalaci větrných elektráren. Všechny zmíněné body vedou k ekonomické úspoře.

Pedagogický přínos

Metoda je svým návrhem motivuje studenty k využívání moderních technologií, je praktickým využitím CFD simulací a ukazuje na aplikovatelnost při studiu nabytých znalostí. Rozšiřuje pro studenty technických zařízení budov oblast používání CFD simulací z interiéru na exteriér. Metoda může být využita v rámci předmětů zabývajících se obnovitelnými zdroji energie. Tato práce také může sloužit jako podklad pro diplomové práce, které ji mohou dále rozvíjet, nabízí se např.

podrobnější hodnocení proudění z jiného směru na budovu či srovnání proudění v okolí budovy, která je umístěna v terénu s reliéfem a proudění v okolí budovy s terénem nahrazeným rovnou plochou, což se nabízí jako zjednodušení navržené metody pro oblasti, kde by nebyly dostupné 3D vrstevnice povrchu tak, jak je to možné v České republice. Předpokládá se použitelnost metody také pro šikmé střechy, což je by mělo být předmětem dalšího ověření.

Teoretický přínos práce

Metoda nabízí spojení různých zdrojů dat, a to konkrétně reliéfu budovy, tvaru budovy a simulace proudění. Jsou srovnána data z dlouhodobého ročního měření a údajů z predikčního modelu. Predikovaná data proudění větru pro volný terén jsou díky simulaci využita k získání hodnot rychlosti proudění větru kolem budovy.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] GEBAUER, Günter, Olga RUBINOVÁ a Helena HORKÁ, 2005. *Vzduchotechnika*. Brno: ERA. Technická knihovna (ERA). ISBN 80-736-6027-X.

[2] SOBÍŠEK, Bořivoj, a kolektiv. *Meteorologický slovník výkladový a terminologický*. 1. vyd. Praha: Ministerstvo životního prostředí České republiky, 1993. 594 s. ISBN 80-85368-45-5. Heslo vítr, s. 360.

[3] Nové požadavky na hodnocení energetické náročnosti budov od 1. dubna 2013, 2013. *TZB-info* [online]. [cit. 2018-03-10]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: https://www.tzb-info.cz/energeticka-narocnost-budov/9745-nove-pozadavky-na-hodnoceni-energeticke-narocnosti-budov-od-1-dubna-2013

[4] JANALÍK, Jaroslav a Pavel ŠŤÁVA, 2002. *Mechanika tekutin*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita. ISBN 80-248-0038-1.

[5] Climate strategies & targets, 2017. *European Commission* [online]. © European Union [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies_en

[6] Webové stránky Evropské komise [online]. 2022 [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_cs

[7] Klimaticko-energetický balíček, 2018. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/klimaticko_energeticky_balicek

[8] *Státní energetická koncepce České republiky* [online], 2014. Praha: Ministerstvo obchodu a průmyslu [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statni-energeticka-politika/2016/12/Statni-energeticka-koncepce-_2015_.pdf

[9] *Vyhláška č. 78/2013 Sb.: Vyhláška o energetické náročnosti budov*, 2013. In: . ročník 2013, 36/2013, 78/2013 Sb.

[10] Zákon č. 406/2000 Sb.: Zákon o hospodaření energií, In: *2000*. ročník 2000, 115/2000, číslo 406.

[11] NZEB definitions in Europe, 2014. *REHVA*. 2014(2), 6-9.

[12] *Nazeleno.cz: Měrná potřeba tepla na vytápění* [online], 2018. [cit. 2018-03-07]. ISSN 1803-4160. Dostupné z: https://www.nazeleno.cz/merna-potreba-tepla-na-vytapeni.dic

[13] FELDMAN, D. R., W. D. COLLINS, P. J. GERO, M. S. TORN, E. J. MLAWER a T. R. SHIPPERT, 2015. Observational determination of surface radiative forcing by CO2 from 2000 to 2010. *Nature*. 519(7543), 339-343. DOI: 10.1038/nature14240. ISSN 0028-0836. Dostupné také z: http://www.nature.com/articles/nature14240

[14] *Climate Change 2013 The Physical Science Basis* [online], 2013. USA: Cambridge University Press [cit. 2018-03-07]. ISBN 978-1-107-05799-1. Dostupné z: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf

[15] Study on the Energy Savings Potentials in EU Member States, Candidate Countries and EEA Countries Final Report, 2009. Karlsruhe/Grenoble/Rome/Vienna/Wuppertal.

[16] DAVIS, S. J. a K. CALDEIRA, 2010. Consumption-based accounting of CO2 emissions. Proceedings of the National Academy of Sciences. 107(12), 5687-5692. DOI: 10.1073/pnas.0906974107. ISSN 0027-8424. Dostupné také z: http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0906974107

[17] SPOUSTA, Vladimír, 2008. KRIZE SOUČASNÉ SPOLEČNOSTI A PROMĚNY HODNOT NA PŘELOMU TISÍCILETÍ. PEDAGOGIKA [online]. LVIII, 2008, 241-252 [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: file:///C:/Users/Eli%C5%A1ka%20T/Downloads/P_2008_3_04_Krize_241_252.pdf

[18] VLČEK, Petr, 2013. Modelování turbulentního proudění. In: *Procesní technika 2013* [online]. Praha: České vysoké učení technické, s. 1-21 [cit. 2018-03-10]. ISBN 978-80-01-05285-3. Dostupné z: http://chps.fsid.cvut.cz/pt/2013/pdf/3509.pdf

[19] KOZUBKOVÁ, Milada a Sylva DRÁBKOVÁ, 2003. *Numerické modelování proudění*. Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení. ISBN 80-248-0525-1.

[20] JOSHI, Jyeshtharaj B., Nandkishor K. NERE, Chinmay V. RANE, B. N. MURTHY, Channamallikarjun S. MATHPATI, Ashwin W. PATWARDHAN a Vivek V. RANADE, 2011. CFD simulation of stirred tanks: Comparison of turbulence models. Part I. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* [online]. 89(1), 23-82 [cit. 2018-04-20]. DOI: 10.1002/cjce.20446. ISSN 00084034. Dostupné z: http://doi.wiley.com/10.1002/cjce.20446

[21] VLČEK, Josef, 2014. *Vliv turbulentního modelu na simulace proudění vzduchu v okolí průtokoměru* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/31294. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Soňa Šedivá.

[22] BLEJCHAŘ, Tomáš. Turbulence modelového proudění - CFX: učební text [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012 [cit. 2018-04-24]. ISBN 978-80-248-2606-6.

[23] PODSTATA VĚTRU, 2018. *ČEZ* [online]. [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/04/podstata_3.html

[24] Strom aus Klein-Windkraftanlagen von ÖKO-Energie, 2007. *Oeko-energie.de* [online]. Thomas Oberholz [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: https://www.oeko-energie.de/produkte/windkraft/index.php

[25] RAGHEB, Magdi, *WIND ENERGY CONVERSION THEORY, BETZ EQUATION* [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: http://mragheb.com/NPRE%20475%20Wind%20Power%20Systems/Wind%20Energy%20Conversion%20Theory%20Betz%20Equation..pdf

[26] Domácí větrná elektrárna: Instalace + přehled modelů, 2018. *Nazeleno.cz* [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: https://www.nazeleno.cz/energie/vetrna-energie/domaci-vetrna-elektrarna-instalace-prehled-modelu.aspx

[27] SmallWindPower@Home - Evaluierung der Auswirkungen von gebäudemontierten Kleinwindenergieanlagen auf Performance, Personen, Gebäude und Umgebung. In: *Nachhaltigwirtschaften.at* [online]. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2021 [cit. 2022-09-14]. Dostupné z: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/schriftenreihe-2022-10-small-wind-power-home.pdf

[28] *ANSYS* [online], 2018. USA [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: https://www.ansys.com/products/fluids/turbulence-modeling

[29] Aplikace Vítr. *Institute of Atmospheric Physics CAS* [online]. CZ: Strategie AV21, 2016 [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: http://vitr.ufa.cas.cz/male-vte/#

[30] WRF - Weather Research & Forecasting Model. *National Center for Atmospheric Research, Mesoscale & Microscale Meteorology Laboratory* [online]. Boulder, CO: NCAR, 2022 [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model

[31] HANSLIAN, David. Větrné podmínky pro malé větrné elektrárny. *TZB-info* [online]. Topinfo, 2012 [cit. 2022-02-16]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/8358-vetrne-podminky-pro-male-vetrne-elektrarny

[32] *B_Souhrnná technická zpráva, AdMaS*. Intar, 2019.

[33] SAYIGH, A. A. M. *Comprehensive renewable energy*. Amsterdam: Elevier, [2012]. ISBN 00-809-7167-9. Dostupné také z: https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/wind-measurement
[34] Aplikace Vítr. *Institute of Atmospheric Physics CAS* [online]. CZ: Strategie AV21, 2016 [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: http://vitr.ufa.cas.cz/male-vte/#
[35] WIZELIUS, T. Design and Implementation of a Wind Power Project. *Comprehensive Renewable Energy*. Elsevier, 2012, 2012, **2**, 391-430. ISBN 9780080878737. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-087872-0.00215-8
[36] Measured climatic data, Enki o.p.s.: Web viewer of measured data. *FMWEB (CloudFM 2): Web viewer of measured data* [online]. Třeboň: ENKI, 2012 [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: https://stanice.fiedler-magr.cz/index2.php
[37] MATTAR, Sarah Jamal, Mohammad Reza KAVIAN NEZHAD, Michael VERSTEEGE, Carlos F. LANGE a Brian A. FLECK. Validation Process for Rooftop Wind Regime CFD Model in Complex Urban Environment Using an Experimental Measurement Campaign. *Energies* [online]. 2021, **14**(9) [cit. 2022-09-15]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en14092497
[38] BLOCKEN, Bert. Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment* [online]. 2015, **91**, 219-245 [cit. 2022-02-26]. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2015.02.015
[39] *American meteorological society: Glossary of meteorology* [online]. USA, 2019 [cit. 2022-09-20]. Dostupné z: https://glossary.ametsoc.org/wiki/Aerodynamic_roughness_length
[40] WIERINGA, Jon. Updating the Davenport roughness classification. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1992, **41**(1-3), 357-368. ISSN 01676105. Dostupné z: doi:10.1016/0167-6105(92)90434-C
[41] Vztlak. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-09-21]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Vztlak
[42] Vznik vztlaku. In: *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Praha, 2021 [cit. 2022-09-21]. Dostupné z: https://www.csve.cz/cz/clanky/vznik-vztlaku/307#prettyPhoto
[43] SCHOVÁNEK, Petr a Vítězslav HAVRÁNEK. *Chyby a nejistoty měření: doplňující text k laboratornímu cvičení*. 2018. Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/pext2-nejistoty.pdf
[44] "ANSYS", Ansyshelp.ansys.com, 2022.
[45] HASLIAN, David, Jiří HOŠEK, Zuzana CHLÁDOVA a Lukáš POP. Větrné podmínky v České republice ve výšce 10 m nad povrchem II. In: Tzbinfo [online]. Topinfo, 2022 [cit. 2022-09-10]. Dostupné z: https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/9800-vetrne-podminky-v-ceske-republice-ve-vysce-10-m-nad-povrchem-ii
[46] VÍTR A JEHO VYUŽITÍ. In: Svět energie: Vzdělávací portál ČEZ [online]. ČR, 2020 [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie/vetrne-elektrarny-podrobne/vitr-a-jeho-vyuziti/vyklad
[47] Iowa's Wind Energy. In: IOWA DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES [online]. USA, 2016 [cit. 2022-10-21]. Dostupné z: https://www.iowadnr.gov/About-DNR/30th-anniversary
[48] Velikosti VtE. In: Česká společnost pro větrnou energii [online]. Praha, 2021 [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: https://www.csve.cz/img/wysiwyg/image/v%C3%BDvoj%20velikosti%20VtE.jpg
[49] JÜTTEMANN, Patrick. Vertikale Windkraftanlagen. In: Klein-windkraftanlagen [online]. DE, 2022 [cit. 2022-10-11]. Dostupné z: https://www.klein-windkraftanlagen.com/technik/vertikale-windkraftanlagen/?nowprocket=1

[50] Darrieus-Rotor. In: Deutsch Wikipedia [online]. Academic, 2022 [cit. 2022-10-21]. Dostupné z: https://de-academic.com/dic.nsf/dewiki/302855
[51] KABRHEL, Michal. Energie větru. In: Tzb.fsv.cvut.cz [online]. Praha: ČVUT, 2018 [cit. 2022-10-21]. Dostupné z: http://tzb.fsv.cvut.cz/vyucujici/16/2018/ozeb/10_vitr-a-voda_t2.pdf
[52] ABU-ZIDAN Y., MENDIS P. a GUNAWARDENA T., "Optimising the computational domain size in CFD simulations of tall buildings", Heliyon, vol. 7, no. 4, 2021.
[53] "ESFSTREAM: Design Software Blog", https://esfstream.com/, 2022.
[54] KADIVAR, Mohammadreza, David TORMEY a Gerard MCGRANAGHAN. A review on turbulent flow over rough surfaces: Fundamentals and theories. International Journal of Thermofluids [online]. 2021, 10(2021), 1-34 [cit. 2022-11-10]. ISSN 26662027. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijft.2021.100077
[55] KUNDU, Pijush K., Ira M. COHEN, David R. DOWLING a Grétar TRYGGVASON. Fluid mechanics. Sixth edition. Boston: Elsevier/AP, [2016]. ISBN 978-0-12-405935-1.
[56] Bahrain World Trade Center. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Bahrain_World_Trade_Center
[57] HAASZ, Vladimír a Miloš SEDLÁČEK. Elektrická měření: přístroje a metody. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-010-1717-6.
[58] HORSKÝ, Jiří a Pavel HORSKÝ. Jak pochopit vyjadřování nejistoty měření spojené s metrologií elektrických veličin. Elektro [online]. 2011, 5/2011, 2011(5), 14-17 [cit. 2022-12-01]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/jak-pochopit-vyjadrovani-nejistoty-mereni-spojene-s-metrologii-elektrickych-velicin--9881
[59] Delta metoda. In: Matematická sekce Matematicko-fyzikální fakulta Univerzita Karlova [online]. Praha: Univerzita Karlova, 217n. l. [cit. 2022-11-11]. Dostupné z: https://www2.karlin.mff.cuni.cz/~nagy/NMSA331/zadani171016.pdf

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Znázornění výpočtu energetické náročnosti budov [3] 12
Obr. 2 Hodnota fluktuace vx, a střední hodnota proudění vx 16
Obr. 3 Tvar funkce hustoty Weibullova rozdělení pro jednotlivá k, při A = 1. 66[45] 18
Obr. 4 Rozložení hustot rychlostí větru pro střední hodnotu rychlosti 15 m/s 19
Obr. 5 Proudnice probíhající okolo křídla [42] 20
Obr. 6 Metody modelování turbulence dle vektoru rychlosti 21
Obr. 7 Volená metoda dle energetického spektra vírů 22
Obr. 8 Schematické znázornění délky aerodynamické drsnosti z_0 a odpovídající výšky drsnosti písku k_s [38] 23
Obr. 9 Funkce drsnosti, ΔU^+, jako funkce ekvivalentní výšky drsnosti pískových zrn s rozdělením kategorií drsností povrchu [56] 25
Obr. 10 Turbulentní proudění nad drsné povrchy; (a) hydraulicky hladký režim s drsností uloženou pod viskózní podvrstvou, (b) přechodně drsný režim s částečně rozloženou viskózní podvrstvou, (c) plně drsný povrch s úplně destruovanou viskózní podvrstvou [55] 25
Obr. 11 Aplikace Vítr [29] 26
Obr. 12 Výšky jednotlivých typů větrných elektráren vůči výšce člověka [46] 26
Obr. 13 Vrtule [47] 27
Obr. 14 Průměr rotoru a výkon vrtule [48] 27
Obr. 15 Savoniův rotor [50] 28
Obr. 16 Jednotlivé konfigurace Savoniova rotoru [49] 28
Obr. 17 Princip činnosti Savoniova rotoru [49] 28
Obr. 18 Větrná elektrárna postavená r. 1987 v Kanadě, výška 110 m. [51] 29
Obr. 19 Typy Darrieovy turbíny [49] 29
Obr. 20 Princip činnosti Darrieovy turbíny [49][51] 29
Obr. 21 Příklad větrné elektrárny umístěné na střeše Fakulty elektrotechniky VUT, kombinace rotoru typu Darrius a Savonius 29
Obr. 22 Schéma výroby a distribuce elektrické energie 30
Obr. 23 Bahrain world Trade center [57] 31
Obr. 24 Výkonový součinitel větrné turbíny, zdroj: ČSVE 32
Obr. 25 Vhodnost terénu pro umístění větrné elektrárny [24][26] 32
Obr. 26 Výsledky měření směru proudění větru dle typu střechy v jinak nezastavěné oblasti [27] 33
Obr. 27 Letecký pohled na areál AdMaS s vyznačeným bodem měření na střeše budovy 36
Obr. 28 Budova P4 v areálu 37
Obr. 29 Meteorologická stanice umístěná na střeše budovy P4 39
Obr. 30 Meteorologická stanice na původním stanovišti před budovou P4 39
Obr. 31 Miskový anemometr W2 40
Obr. 32 (a) rozdělení směru větru v (%) a (b) průměrná rychlost větru v (m/s), hodnoty na krajích růžice °. Zdroj: Aplikace Vítr 41
Obr. 33 (a) rozdělení směru větru (%) and (b) průměrná rychlost větru (m/s) z realizovaného ročního měření 41

Obr. 34 Letecký pohled na umístění měřících bodů, zdroj: mapy.cz 42
Obr. 35 Ověřovací měření, bod pole 42
Obr. 36 Ověřovací měření, bod střecha 42
Obr. 37 Thermoanemometrické čidlo Ahlborn FVA935TH5 43
Obr. 38 Sonda se žhaveným drátkem Testo 43
Obr. 39 Ústředna Almemo 43
Obr. 40 Ústředna Testo 43
Obr. 42 Dimenze určující výpočetní doménu [53] 46
Obr. 43 Výsledná mapa vrstevnic s budovou P4 (varianta A) 47
Obr. 44 Hotový model před zasíťování (varianta B s budovami v areálu) 47
Obr. 45 Výsledné obrazy proudění rychlost proudění pro varianty B (B) a A (A) 49
Obr. 46 Umístění budovy P4 v okolí, zdroj: mapy.cz 50
Obr. 47 Výstup z aplikace Vítr pro GPS souřadnice budovy P4 51
Obr. 48 Hustota pravděpodobnosti rychlosti větru zdroj: aplikace Vítr 52
Obr. 49 Zastoupení rychlostních skupin (intervalů) proložené grafem hustoty pravděpodobnosti 52
Obr. 50 Základní rozměry budov 53
Obr. 51 Model budovy a prostoru z programu Fusion 360 53
Obr. 52 Kinetická energie turbulence pro nejzastoupenější interval rychlosti proudění vzduchu 55
Obr. 53 Křivky výkonu vybraných větrných elektráren 56
Obr. 54 Fotografie horní střechy s fotovoltaickými panely 57
Obr. 55 Rozmístění větrných elektráren na střeše 58
Obr. 56 Obraz rychlosti proudění větru se střechou a stožáry o výšce 4200 m 58
Obr. 57 Obraz proudění kolem stožáru o výšce 4200 m na zvýšené stříšce 58
Obr. 58 Výška stožárů s větrnou elektrárnou na bočních stranách budovy 5700 m s prouděním kolem budovy 59
Obr. 59 Škody způsobené vibracemi [27] 61

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Aktualizované hodnoty koeficientu aerodynamické drsnosti Davenport-Wieringa [40] 23
Tab. 2 Základní typy větrných elektráren 27
Tab. 3 Sondy, jejich parametry a použité dataloggery 43
Tab. 4 Výsledky krátkodobého měření rychlosti větru 44
Tab. 5 Výsledky analýzy kvality sítě 48
Tab. 6 Užité okrajové podmínky 48
Tab. 7 Základní parametry budovy, určující simulaci: 50
Tab. 8 Rozdělení pravděpodobností rychlostí proudění vzduchu pro polohu budovy P4 52
Tab. 9 Tvorba modelu byla řízena těmito základními zásadami, užity byly následující hodnoty: 54
Tab. 10 Hodnocení kvality sítě 54
Tab. 11 Okrajové podmínky 55
Tab. 12 Výsledky pro jednotlivé intervaly rychlosti 56
Tab. 13 Výpočet výkonu větrné elektrárny GW-500-de pro jednotlivé intervaly rychlosti 59

11 SEZNAM PŘÍLOH

P1 GVG 500 W - vertikální větrné kolo (Verticales Windrad)

P2 Windmover® -500

P3 WS-0,60 City

P4 Odhady parametrů Weibullova rozdělení fitovaného na nenulové hodnoty rychlosti větru.

12 SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ

TŮMOVÁ, E.; POKORNÁ, S.; HIRŠ, J. *Wind flow CFD simulation over the building rooftop.* Abstract book - WMCAUS 2022. 7th edition. 2022. p. 93-93.

KROUPA, J.; TŮMOVÁ, E.; TŮMA, Z.; KOVÁŘ, J.; SINGULE, V. Processing and visualization of microclimatic data by virtual reality. *MM Science Journal,* 2018, vol. 2018, no. December, p. 2621-2624. ISSN: 1805-0476.

TŮMOVÁ, E.; KROUPA, J. Systém sběru dat a jejich užití. In *Juniorstav 2018.* 2018. s. 1073-1077. ISBN: 978-80-86433-69-1.

TŮMOVÁ, E. Pilotní projekty inteligentních regionů. In *Inteligentní regiony 2017.* 2017. s. 20-20. ISBN: 978-80-02-02732-4.

TŮMOVÁ, E.; KROUPA, J.; TŮMA, Z. Virtuální realita a zobrazování výsledků měření. In *VIII. sympozium GREEN WAY 2017.* 2017. s. 49-49. ISBN: 978-80-02-02731-7.

TŮMOVÁ, E. PŘEHLED MOŽNOSTÍ ZOBRAZOVÁNÍ VE VIRTUÁLNÍ REALITĚ. In *Juniorstav 2017.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno, 2017. s. 1-6. ISBN: 978-80-214-5462-0.

KOMÍNEK, P.; TŮMOVÁ, E. SENSITIVITY ANALYSIS OF RESIDENTIAL BUILDING SIMULATION PARAMETERS. In *ENVIRONMENTALLY FRIENDLY AND ENERGY EFFICIENT BUILDINGS 27th Annual and 9th International conference INDOOR CLIMATE OF BUILDINGS 2016.* 2016. p. 129-136. ISBN: 978-80-89878-04-8.

HIRŠ, J.; HRŮZA, V.; TŮMOVÁ, E. Smart Region koncept Nový Lískovec. In *VII. sympozium Integrované navrhování a hodnocení budov 2016.* Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2016. s. 12-16. ISBN: 978-80-02-02677-8.

TŮMOVÁ, E. Simulace spotřeby energie budovy a její reálná spotřeba. In *Juniorstav 2016.* 2016. s. 1-6. ISBN: 978-80-214-5312-8.

TŮMOVÁ, E.; HIRŠ, J. Reálná a simulovaná spotřeba energie. In *VNÚTORNÁ KLÍMA BUDOV 2015 Energetické a environmentálne aspekty pri komplexnej obnove budov Sborník - 26. vedecká konferencia.* SSTP Bratislava. Bratislava: Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia, 2015. s. 137-140. ISBN: 978-80-89216-84-0.