



**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

F3

**Fakulta elektrotechnická
Katedra měření**

Diplomová práce

Přesnost a dopad předpovědi slunečního ozáření

Mikuláš Černoهورský

Květen 2024

Vedoucí práce: Mgr. RNDr. Vladislav Martínek

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Černohorský** Jméno: **Mikuláš** Osobní číslo: **483524**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Inteligentní budovy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Přesnost a dopad předpovědi slunečního ozáření

Název diplomové práce anglicky:

Accuracy and impact of solar irradiance prediction

Pokyny pro vypracování:

Sledujte vliv časového horizontu předpovědi na její přesnost. Charakterizujte křivku vadnutí pro krátkodobou předpověď z měřeného osvitu. Pro stanovenou křivku vadnutí vytvořte Matlab/Python skript pro její automatický výpočet. Charakterizujte váhovací křivku nowcast předpovědi tvořené pomocí snímků sky-imageru. Kvantifikujte ekonomický přínos předpovědi osvitu pro energetické řízení různých typů budov s ohledem na kvalitu instalovaného fotovoltaického systému. Kvantifikujte ztráty zapříčiněné nepřesnostmi předpovědi a stanovte dopad nowcastu na snížení těchto ztrát.

Seznam doporučené literatury:

- [1] SENGUPTA, M., HABTE, A., WILBERT, S., GUEYMARD, C., REMUND, J. et al.: Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications: Third Edition. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5D00-77635, 2021, ISBN: 978-0-578-87694-8
[2] HAUPT, S. E.: A Public-Private-Acadmic Partnership to Advance Solar Power Forecasting. Final Technical Report, 2016, <https://doi.org/10.2172/1408392>
[3] ZHANG, J., HODGE, B. M., LU, S., HAMANN, H. F., LEHMAN, B. et al.: Baseline and target values for regional and point PV power forecasts: Toward improved solar forecasting. Solar Energy. 2015, roč. 122, s. 804-819. ISSN 0038092X.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Mgr. RNDr. Vladislav Martínek řízení, monitoring a diagnostika budov UCEEB

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

Datum zadání diplomové práce: **15.02.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **24.05.2024**

Platnost zadání diplomové práce:

do konce letního semestru 2024/2025

Mgr. RNDr. Vladislav Martínek
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování / Prohlášení

Rád bych poděkoval RNDr. Vladislavu Martínkovi za podporu a milý přístup při vedení mé diplomové práce. Děkuji také za aktivní pomoc při sháňení potřebných dat.

Dále bych chtěl zmínit UCEEB a společnosti Fenix s.r.o. a AERS s.r.o., které spolupracují při provozování předpovědi PV Forecast a umožnily vypracování této práce.

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

V Praze dne 16. 05. 2024

.....

Abstrakt / Abstract

Práce se věnuje předpovědi slunečního ozáření pro účely fotovoltaických systémů. Představuje používané metody a všímá si jejich časového omezení. Hlubší vhled nabízí do tématu krátkodobé předpovědi, tzv. nowcastingu. Součástí je navržený systém nowcast předpovědi z měřeného osvitu, který vede ke zpřesnění predikce služby PV Forecast. Velká pozornost směřovala ke zkoumání závislosti, kterou má přesnost předpovídaných hodnot na vzdálenosti časového horizontu. Pro generování nowcast poskytuje práce automatický výpočet křivky vadnutí pomocí Python programu. Přínos předpovědi slunečního ozáření je ilustrován na příkladu tří budov. Každá z nich reprezentuje jiné parametry, s nimiž se lze u instalovaných FVE setkat. Na základě simulačního programu byly kvantifikovány ekonomické ztráty způsobené nepřesnostmi předpovědi. Rovněž bylo odvozeno, jak se podílí nowcast na snížení těchto ztrát.

Klíčová slova: ozáření; nowcasting; osvit; MAE; FV systém; předpověď ozáření; PV Forecast

This thesis deals with the solar irradiance forecast for the purpose of photovoltaic systems. It presents the commonly used methods and notes their time limitations. Furthermore, it offers a deeper insight into the topic of short-term forecasting, the so-called nowcasting. Included is a proposed nowcast prediction system from measured irradiance, which leads to an improved PV Forecast service. Much attention has been focused on investigating the dependence of the accuracy of the predicted values on the time horizon. For the generated nowcast, the thesis provides an automatic calculation of the fading curve using a Python program. The benefit of solar irradiance prediction is illustrated by the example of three buildings. Each of them represents different parameters that can be encountered in installed PV plants. Based on the simulation program, the economic losses due to the inaccuracies of the prediction were quantified. The contribution of nowcast in reducing these losses was also derived.

Keywords: irradiance; nowcasting; MAE; PV system; irradiance forecast; PV Forecast

Title translation: Accuracy and impact of solar irradiance prediction

/ Obsah

1 Úvod	1
2 Sluneční záření	2
2.1 Průchod slunečního záření atmosférou	3
2.2 Sluneční ozáření a osvit	5
2.3 Celkové sluneční ozáření	5
3 Předpovídání slunečního ozáření	7
3.1 Clear-sky a all-sky modely	8
3.1.1 Modely oblačnosti	8
3.1.2 Clear-sky modely	9
3.1.3 All-sky modely	10
3.2 Satelitní modely ozáření	11
3.2.1 Empirické a poloempiri- cké modely	11
3.2.2 Fyzikální modely	11
3.3 Modely numerické předpovědi	12
3.4 Předpovědi s CMV	13
3.4.1 Sky-imager	14
3.4.2 Satelitní CMV předpověď	16
3.5 Statistický přístup	18
4 Vyjádření přesnosti před- povědi	20
4.1 RMSE (Root mean square error)	21
4.2 MBE (Mean bias error) a MAE (Mean absolute error)	21
4.3 MrE (Mean relative error) a MrAE (Mean relative ab- solute error)	22
5 Praktická část	23
5.1 PV Forecast	23
5.2 Nowcast z místního měření	23
5.2.1 Určení času pro nowcasting	24
5.2.2 Ověření použití now- castu během dne na cvičných křivkách	25
5.2.3 Váhovací křivka nowcastu	27
5.2.4 Vadnutí přesnosti	30
5.3 Ekonomický přínos	32
6 Závěr	39
Literatura	40

Kapitola 1

Úvod

S narůstajícím zapojením obnovitelných zdrojů energie OZE do energetické soustavy se již léta diskutuje o proměnlivosti jejich výkonu. Zvláště v případě energie získávané ze slunečního záření brání její nestálost ještě širšímu využití těchto zdrojů. Velká míra pozornosti se proto věnuje vývoji baterií a jiných typů úložišť, kde se dá získaná energie přechovat do doby, než nastává její potřeba. Efektivnímu využití úložišť a zdrojů energie pomáhá, když se daří dopředu odhadovat jejich výkon. V případě fotovoltaických systémů je hlavní veličinou určující jejich výkon sluneční ozáření, které na panely dopadá.

Specifický zájem na přesné předpovědi ozáření mají operátoři energetické sítě, kteří potřebují soustavu vyvažovat. Ačkoliv zůstává podíl fotovoltaických zdrojů na celkovém energetickém mixu poměrně malý, v určitých okamžicích mohou tvořit významnou složku výroby. Proto je potřeba s ohledem na jejich očekávaný výkon plánovat spouštění špičkových zdrojů energie. Nemalý přínos však může předpověď ozáření a výkonu mít i pro běžného majitele FV systému. Podle predikce lze plánovat vlastní spotřebu a v případě bateriového úložiště řídit nákup a prodej energie na spotovém trhu, a tak dosáhnout většího ekonomického přínosu.

Přesnost tvořené předpovědi lze odvodit pomocí metod analýzy časových řad. Protože se sluneční ozáření vyznačuje rychlými změnami a velkým rozptylem, je třeba zajistit, aby zvolená metrika nezkreslovala hodnocení a zůstala čitelná. Nároky se rovněž odvíjí od smyslu užití předpovědi.

V této práci se zaměřuji především na předpověď v krátkodobém výhledu, tzv. nowcasting. Cílem je navrhnout výpočet nowcastu z měřeného osvitů, který povede ke zpřesnění služby PV Forecast. Na získaných datech pak sleduji vývoj přesnosti s narůstajícím časovým horizontem předpovědi. Součástí je program, který umožní křivku vadnutí operativně vypočítat. Z porovnání přesnosti nově modelovaného průběhu a základní varianty předpovědi lze nastavit optimální dobu, na kterou má význam nowcast tvořit.

Dále se zabývám ekonomickým přínosem, který předpověď osvitů uživatelům poskytuje. V práci jsou představeny tři příklady budov s FVE, které reflektují různé koncepce. Simulace energetického řízení obsahují jak variantu se základní předpovědí PV Forecast, tak i s nowcastem. Z porovnání výsledků se situací, kdy by se dařilo předpovídat ozáření přesně, jsou vyčísleny ztráty způsobené nepřesnostmi odhadu. Sleduje se také efekt navrženého nowcastu na snížení ztrát.

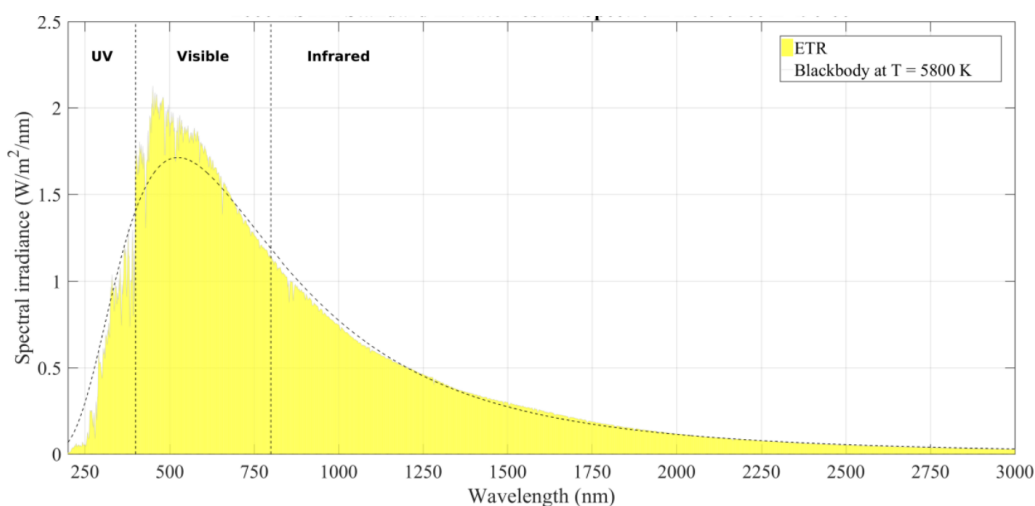
Kapitola 2

Sluneční záření

Sluneční záření tvoří spolu s geotermickými procesy a slapovými efekty jediný zdroj obnovitelné energie na Zemi. Je hnací silou pro oběh vody v přírodě a tvorbu větru, které od pradávna lidé využívají ve svých energetických procesech. S hledáním dalších a dalších zdrojů energie, pokud možno obnovitelné, dostalo se větší pozornosti i energetickému využití samotného dopadajícího záření. Nyní je již nedílnou součástí našich plánů a těší se stále velkému zájmu.

Zdroj slunečního záření, Slunce, je složeno především z atomů vodíku (70 %) a helia (28 %). V jeho centrální části dochází k jaderné fúzi – termonukleární reakci, při které jsou lehčí jádra vodíku přeměněna na těžší jádra helia. Při této reakci se uvolňuje obrovské množství energie, které je formou elektromagnetického vlnění vyzářeno do okolí.

Ze zemského pohledu si lze Slunce představit jako černé těleso s povrchovou teplotou okolo 5800 K, které vyzařuje na vlnových délkách od řádově od nanometrů až po jednotky metrů. Spektrální průběh hustoty vyzařování je velmi blízký tomu, který pro těleso dané teploty předpovídá Planckův zákon. Většina energie slunečního záření se tak soustředí do oblasti vlnových délek od 0,2 do 3,0 μm . Protože není na cestě k Zemi sluneční záření ničím rušeno nebo pohlcováno, dopadá na horní hranici atmosféry se stejným spektrálním složením. Má však výrazně nižší hustotu zářivého toku způsobenou rozptřením výkonu na větší plochu. Na obrázku 2.1 je vidět spektrum záření přicházejícího na hranici atmosféry a teoretickou charakteristiku dle Planckova zákona.

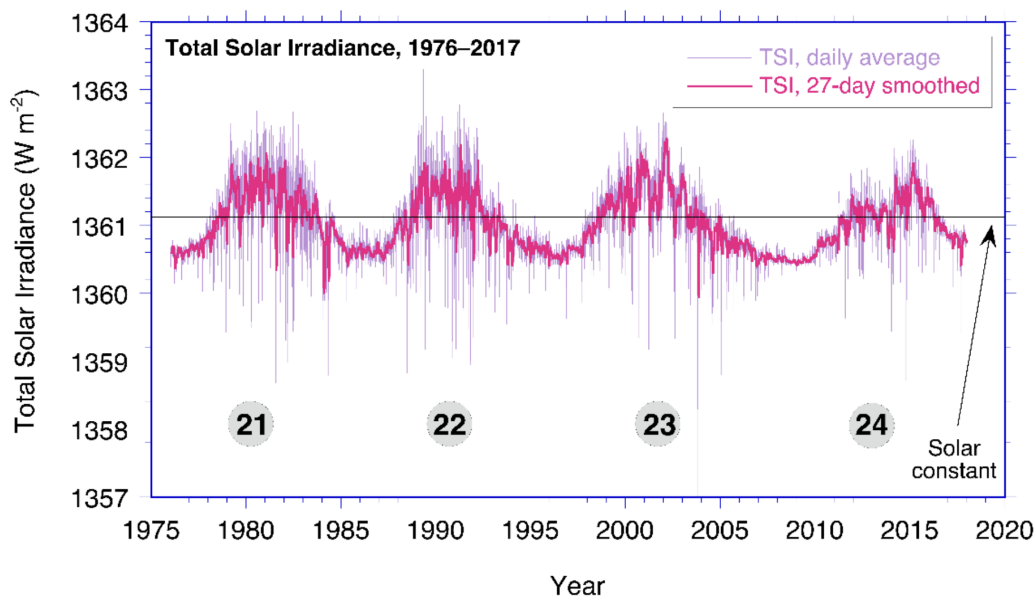


Obrázek 2.1. Spektrum záření dopadajícího na hranici atmosféry porovnané se zářením černého tělesa o teplotě 5800 K [1]

Integrací hustoty zářivého toku ve střední vzdálenosti Země od Slunce přes celé spektrum lze získat celkové sluneční ozáření na vnější hranici atmosféry (TSI). Dříve se pro TSI běžně používalo označení solární konstanta, nicméně pak bylo zjištěno, že dochází

k jeho fluktuaci. Solární konstanta je nově definovaná jako dlouhodobý průměr z celkového slunečního ozáření (TSI). Podle výzkumů z posledních let je hodnota solární konstanty určena na $1361,1 \text{ W/m}^2$ [1].

Vzhledem k velikosti proměn TSI je lze v praktických výpočtech zanedbat, protože mnohem větší dopad má třeba sezónní variace daná měnící se vzdáleností Země–Slunce (až 1409 W/m^2 na začátku ledna, resp. 1315 W/m^2 na začátku července). Větších změn při slunečním cyklu doznává jen UV oblast spektra, při jejím bližším sledování bývá tedy zajímavé sluneční aktivitu sledovat.



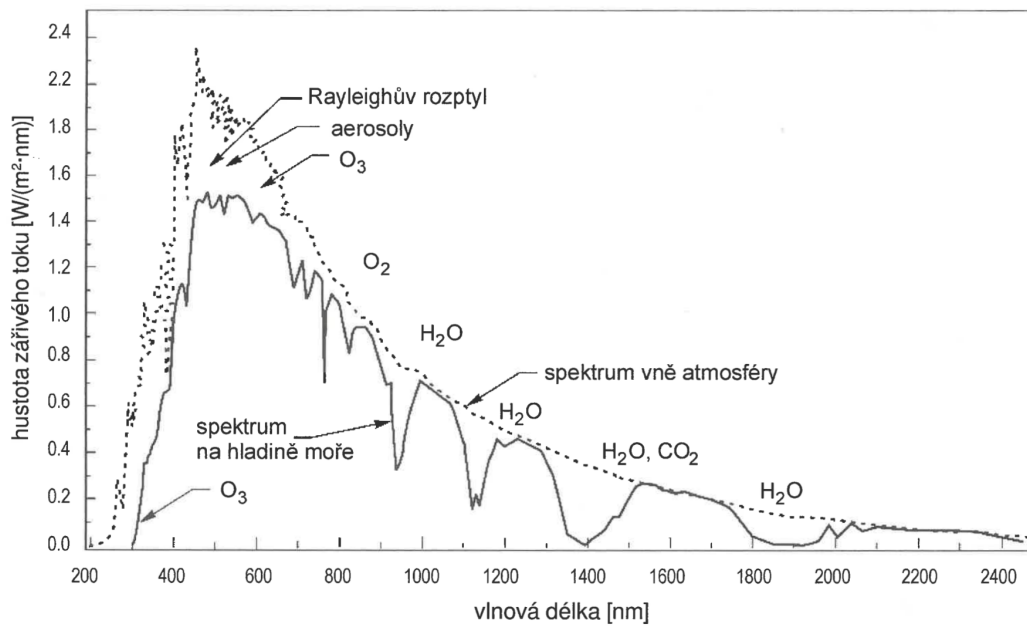
Obrázek 2.2. Celkové sluneční ozáření vně atmosféry (TSI) a solární konstanta [1]

2.1 Průchod slunečního záření atmosférou

Zatímco k okraji zemské atmosféry dorazí sluneční záření s nezměněným spektrem, sama atmosféra funguje jako filtr určitých vlnových délek. Chrání nás tak před nebezpečnou částí UV záření, ale dopad má i do jiných částí spektra. V závislosti na vrstvě atmosféry, do které záření proniká, brání jeho průchodu různé molekuly a částičky, které se v atmosféře vyskytují. Nejvýznamnějšími součástmi jsou molekuly dusíku a kyslíku, ozon, oxid uhličitý, prach a aerosoly. Na těchto částicích dochází jak k pohlcení, tak i k odrazu a rozptylu dopadajícího záření.

Zásadním parametrem, který ovlivňuje průchod slunečního záření, je množství atmosféry, kterým musí fotony na cestě k zemskému povrchu projít (angl. Air mass, AM). Záleží tedy na relativní pozici pozorovatele vůči slunečním paprskům. Tato pomyslná dráha slunečního paprsku zvyšuje pravděpodobnost, že dojde k absorpci nebo odražení fotonu. S narůstající vzdáleností také dochází ke změně spektrální charakteristiky záření, které se dokáže dostat až k zemskému povrchu. V praxi můžeme vliv vzdálenosti pozorovat poklesem intenzity dopadajícího slunečního záření a změnou barvy slunečního kotouče, pokud je blízko nad obzorem.

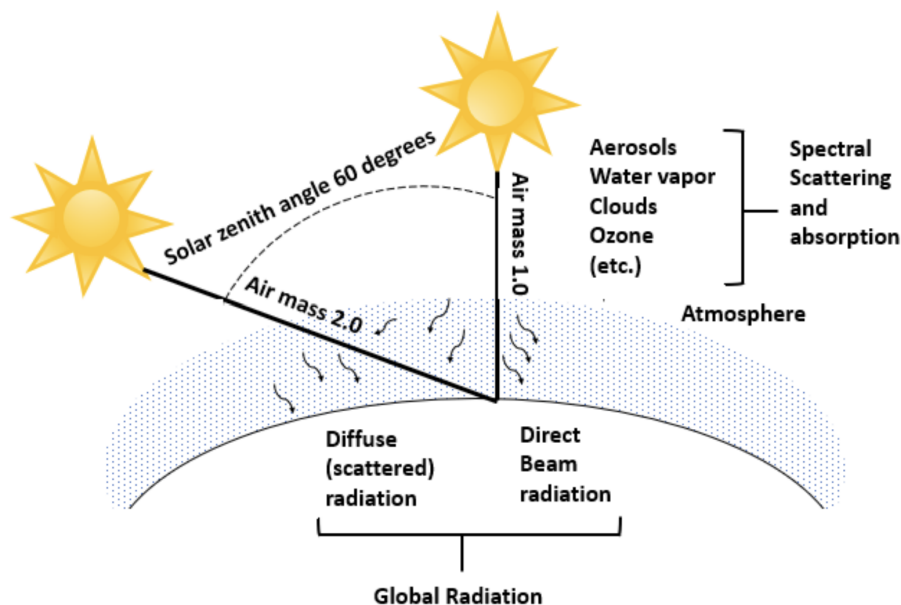
Ačkoli k výše zmíněné absorpci a rozptylu záření dochází kdykoli, tedy i na bezmračné obloze, je nutné podotknout, že mraky jsou hlavním prvkem, který ovlivňuje míru a kvalitu záření, které dopadne na zemský povrch. Zároveň optické vlastnosti mraků nejsou stálé, můžou se rychle měnit v čase a také bývají značně rozdílné v různých částech



Obrázek 2.3. Spektrum záření procházející zemskou atmosférou [2]

pozorované oblohy. Proto se jejich vliv těžko modeluje. Zvláště popis třídimenzionální struktury složité oblačnosti bývá velmi náročný. Naopak, když mají mraky podobu homogenní jednoduché vrstvy, daří se je pro účely modelu charakterizovat s poměrně vysokou přesností [1].

Pozorované záření se rozděluje v závislosti na interakcích, ke kterým v atmosféře dochází, do dvou částí. Fotony, které na zemi projdou bez toho, aby byly odraženy nebo pohlceny, se nazývají přímé sluneční záření. Kvůli jeho směrovému charakteru ho můžeme vnímat jako sluneční paprsky. Naopak záření, které je během své cesty pohlceno nebo rozptýleno, případně odraženo od okolních ploch, se nazývá difúzní záření. Protože jeho charakter je všesměrový, jeho intenzita nezáleží na úhlu dopadu, jako je tomu u přímého záření. Nicméně využití přímého slunečního záření díky jeho vyšší intenzitě bývá energeticky zajímavější.



Obrázek 2.4. Přímé a difúzní záření, vliv množství atmosféry AM (Air mass) [1]

2.2 Sluneční ozáření a osvit

Sluneční ozáření, obvykle značené G , je nejčastější veličinou vyjadřující energetický obsah slunečního záření. Jde o „výkonovou hustotu zářivého toku slunečního záření“ [2], neboli výkon sluneční energie, který ve formě záření dopadá na jednotku plochy. Jak odpovídá definici, jeho jednotkou je W/m^2 . Lze se setkat i s tím, že je sluneční ozáření označené E , což odpovídá analogické fotometrické veličině tzv. osvětlení, nebo se používá zkratka vycházející z počátečních písmen (např. GHI – Global horizontal irradiance). Velmi často se také mluví o intenzitě slunečního ozáření, což jen podtrhuje fyzikální význam stále stejné veličiny.

Osvit, který je možné značit H , se slunečním ozářením úzce souvisí, neboť jde o jeho integrovanou hodnotu. Vyjadřuje plošnou hustotu dopadající energie za určitý časový úsek. Nejčastěji se uvádí s jednotkami Wh/m^2 nebo kWh/m^2 . V odborné literatuře se pro stejnou veličinu můžeme setkat také s označením dávka slunečního ozáření, neboť osvit spíše odpovídá fotometrickému pojetí. Nicméně v případě předpovědí pro účely predikce výkonu FVE se častěji autoři drží názvu osvit, a proto je v této práci nadále užíván.

2.3 Celkové sluneční ozáření

Celkové sluneční ozáření GHI (Global horizontal irradiance) v sobě obsahuje veškeré záření, které dopadá na plochu ze sledovaného poloprostoru. Matematicky se jedná o geometrický součet částí přímého a difúzního záření.

$$\text{GHI} = \text{DNI} * \cos(\text{SZA}) + \text{DHI} \quad (1)$$

Kde

DNI je přímé normálové sluneční ozáření

DHI je difúzní sluneční ozáření

SZA je zenitový úhel Slunce, který udává úhel mezi svislicí a spojnicí pozorovatele a Slunce

Pro většinu aplikací není potřeba znát jednotlivé složky ozáření, a proto stačí sledovat GHI. Bývá také prvotní informací zvažovanou při umisťování FV zdrojů. Pro základní představu zde uvádím tabulku typických hodnot celkového slunečního ozáření pro středoevropskou oblast, jak vychází z podkladu [2]. Poměr difúzního ozáření k celkovému ve třetím sloupci tabulky by měl být brán jen jako orientační. V jiných zdrojích se například můžeme setkat s tvrzením, že difúzní složka ozáření při jasné obloze a polojasnu nepřevyšuje 30 % a při husté oblačnosti je difúzní složka shodná s přímým normálovým ozářením [1].

	GHI	Poměr DHI/GHI
Jasný den	700–1000 W/m ²	10–20 %
Lehce zataženo	200–700 W/m ²	20–80 %
Silně zataženo	100–200 W/m ²	80–100 %

Tabulka 2.1. Typické hodnoty GHI v České republice. Tabulka je převzata z [2].

Kapitola 3

Předpovídání slunečního ozáření

Z hlediska energetického využití slunečního záření je zásadní znát jeho vývoj a snažit se ho maximálně efektivně využít. Na počátku, při plánování umístění a výběru zdroje energie, hraje důležitou roli především analýza historických dat. Ta může přinést i další zlepšení během provozu, například díky odhalení vad a chyb v systému, které se podepisují na snížení výkonu. Pokročilejší přístup však spočívá v předpovídání slunečního ozáření na určitý čas dopředu. Pro účely FV zdrojů se používají tři hlavní přístupy k předpovídání, které se rozcházejí právě v časovém horizontu, na který cílí. Protože jsou principiálně odlišné, a tedy se doplňují, obvykle se nejlepších výsledků dosáhne jejich kombinací. Tyto hlavní proudy představuje:

- Statistické vyvozování z časových řad měření osvitů prováděného na zemi.
- Sledování pohybu mraků, popsaného technikou tzv. CMV (cloud motion vector). K získání CMV lze použít různá snímací zařízení instalovaná buď na zemi (sky-imager), nebo na meteorologických satelitech.
- Předpověď založená na modelech numerické předpovědi počasí (NWP – numerical weather prediction).

Pro předpověď do jedné hodiny je vždy potřeba místní měření osvitů a stavu mraků, které zajistí dostatečné prostorové rozlišení a četnost předpovídaných okamžiků. Ke zpracování měřených hodnot se v poslední době kromě statistických metod využívají i zlepšující se neuronové sítě. V případě, kdy je oblačnost poměrně stabilní, stačí v místě instalované měření osvitů na relativně smysluplnou předpověď až na několik hodin dopředu. Za proměnných podmínek však nemívá výsledek nejlepší, protože místně bodové měření nezvládne dobře pokrýt nahodilý pohyb mraků. Přesně v těchto chvílích může být předpověď významně vylepšena sky-imagerem snímajícím pohyb mraků. Tento senzor CMV dokáže ve svém nejbližším okolí poskytnout vývoj zastínění s přesností na desítky metrů. Typická doba, na kterou umí sky-imager předpověď ovlivnit, bývá 10–30 minut v závislosti na sférickém úhlu, který jeho kamera nezakrytě snímá, rychlosti a výšce mraků pohybujících se po obloze.

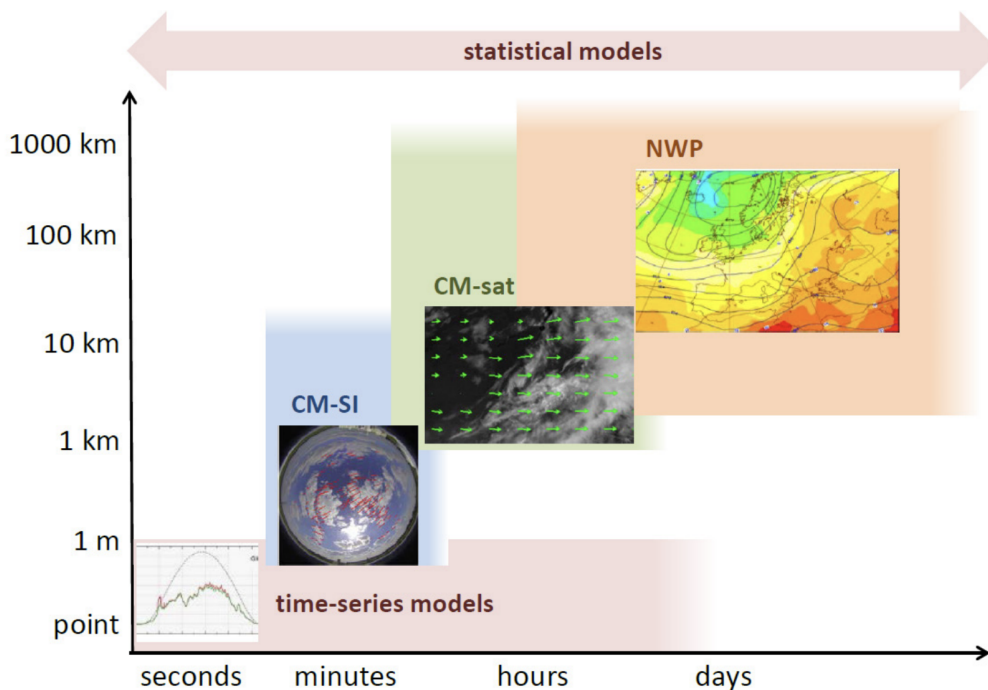
Předpověď v delším časovém horizontu, typicky 4 až 6 hodin, se tvoří za pomoci snímků zemské atmosféry, které zajišťují meteorologické satelity. Díky odvození vektoru pohybu (CMV) je možná extrapolace pozice mraků a vytvoření odhadu podoby oblohy. Předpověď na 4 až 6 hodin dopředu se obvykle označuje jako nowcast, i když se s tímto výrazem můžeme setkat i v souvislosti s předpovědí pomocí sky-imageru. Rozlišení takto získané předpovědi bývá v rozmezí 1–5 km a závisí na aktuální poloze geostacionárních satelitů. Obecně platí, že rozlišení nad hustě osídlenými kontinenty je lepší než v jiných částech světa.

Numerické modely NWP umožňují předpovídat ozáření s dobrou přesností až na několik dní dopředu. Posouvají tak hranici předpovědní doby na její současné maximum. NWP modely vychází z fyzikálního popisu atmosféry, který se následně snaží parametrizovat a numericky řešit. K tomu potřebují sadu okrajových podmínek, které pro ně měří množství přístrojů umístěných jak na zemi, tak i na obíhajících satelitech. V matematickém vyjádření je v nich skrytý popis vývoje zemské atmosféry včetně vzniku,

zániku, přesunu i proměně mračných celků [1]. V závislosti na účelu a tvůrci NWP modelu je prostorové rozlišení do několika kilometrů, časová přesnost pak obvykle nebývá větší než 1 hodina.

Všechny zmíněné přístupy se dají vylepšovat, pokud jsou k dispozici data z provozu FV systému. Kromě statistických metod zde v současné době opět hrají roli strojové učení a neuronové sítě. Zvláště zjišťování odchylek měřeného a předpovídaného ozáření a zkoumání jejich vzájemné korelace může přinést zmenšení celkové chyby.

Přehled základního rozdělení předpovědních metod a jejich časoprostorové zacílení je možné sledovat na obr. 3.1.



Obrázek 3.1. Časové a prostorové rozložení základních metod předpovědi ozáření [1]

3.1 Clear-sky a all-sky modely

Dříve než se bude možné zabývat jednotlivými technologiemi, je potřeba objasnit některé obecné principy, které se u předpovídání slunečního ozáření uplatňují. Především u metod využívajících satelitní informace bývá aplikováno rozdělení výpočtu na samostatnou složku pro nezataženou oblohu (clear-sky model) a vliv mraků. Až následně dochází k jejich kombinaci v tzv. all-sky modelu. Důvodem pro toto rozdělení je odlišný vliv obou složek na procházející sluneční záření. Ten se také odráží v potřebě sledovat různorodé parametry. Zároveň platí, že oba jevy – odraz nebo rozptyl na částicích obsažených běžně v atmosféře a na shluku mraků – lze považovat do jisté míry za nezávislé. Výhodou, kterou rozdělení přináší, je zjednodušení výpočtu a možnost rozvíjet metodické postupy v každé části samostatně.

3.1.1 Modely oblačnosti

Vliv mraků na procházející sluneční záření se odvíjí od jejich optických vlastností – propustnosti a odrazivosti. Tyto fyzikální vlastnosti jsou ovlivněny celou řadou faktorů vystihujících stav oblačnosti a parametry dopadajícího záření. Aby se výpočet zjednodušil, bývají propustnost a odrazivost v modelech parametrizovány vlastnostmi, které

se lépe určují. Typicky se jejich hodnota stanovuje ze slunečního úhlu SZA, termodynamické fáze mraku (kapalná/led), optické tloušťky a velikosti částic. Optická tloušťka vyjadřuje, jak daleko je záření schopné projít, než je v prostředí pohlceno nebo rozptýleno. Jde o součin geometrické tloušťky mraku a lineárního koeficientu útlumu. Pro některé modely oblačnosti je důležitá také samostatná informace o výšce horního okraje mraku.

■ 3.1.2 Clear-sky modely

Hlavní význam clear-sky modelů spočívá v určení přímého (DNI) a difúzního (DHI) ozáření při započtení látek a částic obsažených běžně v atmosféře. Jejich množství je totiž proměnné. Jednoznačně nejobtížnější část procesu tvoří odhadování difúzního záření atmosféry. Většina dalších modelů v této oblasti přebírá několikrát vylepšený Perezův model. Dříve nebyl ale výjimkou ani jednoduchý izotropní model. V závislosti na typu modelu se jako vstupní veličiny využívají informace o vodní páře, ozónu, optické tloušťce aerosolů (AOD) a atmosféry, nadmořské výšce a méně často i další kritéria. Jednotliví autoři si pro své teorie vybírají jen některé parametry. Pro lepší pochopení zde uvádím několik příkladů clear-sky modelů, jak jsou zaznamenány v podkladu [1].

SOLIS clear-sky model představuje poměrně jednoduchý přístup k výpočtu celkového slunečního ozáření, přičemž řešení provádí v jednotlivých spektrálních pásmech. Základní myšlenkou je rozšíření Lambert-Beerova vztahu pro výpočet DNI tak, aby aproximoval hodnoty difúzního ozáření. Původní Lambert-Beerův vztah má podobu:

$$I = I_0 * e^{-AM*\tau} \quad (1)$$

Kde

τ je atmosférická optická tloušťka

AM je množství atmosféry (air mass)

I_0 je ozáření dané vlnové délky na povrchu atmosféry (TOA)

I je dopadající ozáření DNI příslušné vlnové délky

SOLIS model tento vztah upravuje, aby odpovídal i šikmému sklonu záření, a přizpůsobuje ho zároveň i difúzní složce celkového ozáření.

$$I(SZA) = I_0 * e^{\frac{-\tau_c}{(\cos(SZA))^c}} \quad (2)$$

Kde

I je jeden z typů ozáření DNI, DHI nebo GHI

c je empirický koeficient, který je stanoven pro každý z typů ozáření

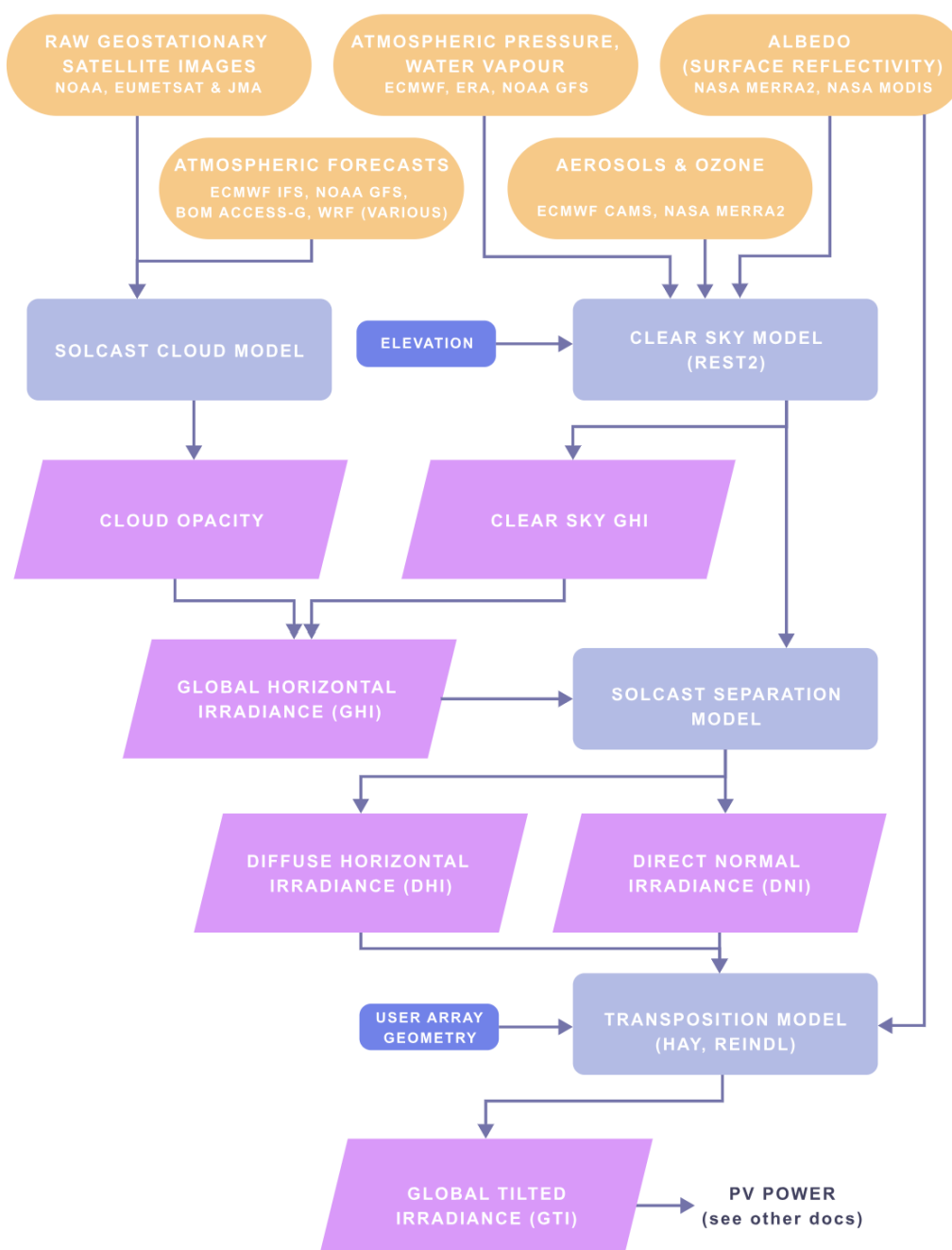
τ_c je vertikální optická tloušťka pro daný typ ozáření

Podobně jako u dalších modelů neodpovídá SOLIS model úplně zcela teorii přenosu záření, která počítá se vznikem druhotného záření vlivem ohřátí částic média, na nichž dochází k rozptylu a absorpci (popsáno např. v podkladu [3]). Na druhou stranu tento vliv je v případě atmosféry a slunečního záření na poměr jen velmi malý.

Jiným příkladem může být McClear model, který se vyznačuje svojí rychlostí. Opírá se o některé starší modely, ale přijímá zároveň nové poznatky v oblasti výzkumu složení atmosféry (aerosoly, vodní pára a ozón). Svoji rychlost nabývá díky předvyplněným vyhledávacím tabulkám. Je také příkladem širokopásmového modelu, který nepočítá každou vlnovou délku samostatně.

3.1.3 All-sky modely

Kvalita all-sky modelů závisí především na předchozích výsledcích modelů oblačnosti a clear-sky. Součástí all-sky modelů je pak spojení získané propustnosti a odrazivosti s clear-sky modelem do jednoho celku. Typicky se ještě přidává vliv zemského albeda. Vývoj v posledních letech vedl k urychlování a zjednodušení výpočetní náročnosti těchto modelů při zachování dosažené přesnosti. Celý vývoj předpovědi all-sky modelu dobře zachycuje následující diagram.



Obrázek 3.2. Tvorba předpovědi osvitů Solcast [4]

3.2 Satelitní modely ozáření

Hlavní účel satelitních modelů ozáření sice nesouvisí s předpovídáním, přesto je lze ve střednědobém horizontu použít. Satelitní modely totiž především informují o aktuálním ozáření v místech, kde se nenachází místní měření. Proto se pro většinu studií stačí zabývat korektním odvozováním současných hodnot ze satelitního pozorování. Takto odvozená data se pak hojně využívají při plánování a hodnocení potenciálních fotovoltaických a jiných solárních zdrojů energie.

Satelitní modely lze z hlediska přístupu k jejich tvorbě rozdělit na empirické, resp. poloempirické, a fyzikální. Zatímco empirický přístup zkoumá vztah měřeného satelitního a pozemského pozorování napřímo, a pak převádí satelitní hodnoty na údaje na zemi rovnou, fyzikální modely obecně pracují ve dvou krocích. První určí optické vlastnosti atmosféry a mraků, a potom je zužitkují při výpočtu přenosu záření na zemský povrch. Proto je také u fyzikálních modelů základním výstupem jak celkové ozáření GHI, tak i přímé DNI, ale u empirických jen GHI. K dopočtu DNI pak potřebují využít další separační model.

3.2.1 Empirické a poloempirické modely

Dnešní poloempirický přístup vychází z předpokladu, že celkové ozáření GHI souvisí s odrazivostí pozorovanou satelity. Na jejím základě jsou vytvořeny indexy pokrytí oblohy (cloud-cover), které modifikují GHI z clear-sky modelu. Zároveň do výpočtu vstupují empiricky získané parametry odvozené z porovnání souběžného měření satelity a na zemi. Původní Heliosat metoda, která je v této oblasti považována za základ, pracovala s indexem průhlednosti K_t :

$$K_t = an + b \quad (3)$$

Kde

- a, b jsou empiricky odvozené indexy určující předpokládanou lineární závislost
- n je index pokrytí mraků, který se vypočte pomocí vztahu:

$$n = (\rho - \rho_g) / (\rho_{cloud} - \rho_g) \quad (4)$$

Kde ρ , ρ_{cloud} a ρ_g představují činitele odrazivosti pro aktuální scénu oblačnosti, nejsvětlejšího mraku a zemi.

V průběhu let došlo k několika vylepšením této metody a je stále hojně využívána. Jiným příkladem poloempirického přístupu může být regresivní model. Asi nejznámějším je Hayova metoda (Hay 1978), která odvozuje prostupnost atmosféry od bilance přicházejícího a odcházejícího záření na její hranici (TOA) [1]. Odhadnutá prostupnost pak spolu s regresivními koeficienty určuje ozáření GHI na povrchu. Tato metoda potřebuje množství trénovacích dat ke stanovení regresivních koeficientů.

3.2.2 Fyzikální modely

Fyzikální modely se opírají o teorii přenosu záření. Jako vstupy pro výpočet ozáření, které projde na zemi, potřebují informace o množství vodní páry, ozónu, aerosolů a vlastnostech mraků. Mezi vlastnosti mraků patří jejich optická tloušťka, teplota na horním okraji, termodynamická fáze, velikost částic a další, ne všechny ale bývají pro předpověď ozáření využity. Fyzikální modely fungují buď pro jednotlivé vlnové délky, nebo zohledňují celé spektrum najednou. Označují se pak buď jako spektrální, nebo širokopásmové.

Výpočetní náročnost fyzikálních modelů bývá vyšší než v případě empirických a poloempirických. Na druhou stranu můžou využít dodatečné zdroje vlastností mraků a rychle tak dokáží přijmout poznatky z nových technologií. Explicitní zohlednění fyzikálního vlivu aerosolů a látek v atmosféře by rovněž mělo vést k přesnějším hodnotám.

3.3 Modely numerické předpovědi

Numerické předpovědi počasí (NWP) dokáží poskytovat data ozáření na dlouhou dobu dopředu. Obecně je platné, že ale jejich odhady nedosahují takové přesnosti, jakou mohou mít satelitní modely. Jejich sestavení a provozování vyžaduje značné úsilí, a proto se jim věnuje jen několik subjektů z řad národních a mezinárodních meteorologických agentur. V první řadě je potřeba sesbírat dostatečné množství měření pro celý svět, které slouží ke stanovení počátečních okrajových podmínek. Tato pozorování pocházejí jak z pozemních měření, tak i ze sensorů umístěných na letadlech a satelitech. Následně se na základě popisu fyzikálních procesů simuluje vývoj atmosféry. Postup fyzikálního modelování je v případě NWP nevyhnutelný, protože souvislost mezi předpovědí na dlouhou dobu a aktuálním pozorováním oblohy je příliš malá [1].

Omezujícím parametrem pro NWP je velikost diskretizační mřížky, která se pro simulace uplatňuje. Čím hustší se použije, tím totiž roste výpočetní náročnost. Některé fyzikální procesy, jako třeba kondenzace nebo rozptyl světla, se však dějí v měřítku menším, než je velikost mřížky. Jejich výsledný vliv se proto shrne spolu s ději v mezní vrstvě na hranici atmosféry a na rozhraní se zemí a dochází k tzv. parametrizaci atmosférické fyziky. Kromě toho parametrizace slouží ke konvergenci numerických funkcí modelu.

Z hlediska rozsahu se dají NWP modely rozdělit mezi globální a regionální. Celosvětových je v dnešní době provozováno okolo 15, o které se starají významné meteorologické agentury. Jejich rozlišení bývá v rozsahu 10–50 km a časový krok předpovědi 1 až 3 hodiny. Regionální modely tvořené jen pro omezené území umožňují rozlišení v rozsahu 1–10 km, a tak zvládají explicitně vyjádřit i menší fyzikální procesy v atmosféře [1].

NWP modely poskytují informaci o celkovém ozáření jako jeden ze svých výstupů, teoreticky ho lze tedy napřímo využít. U energetických aplikací je však běžnou praxí ještě další úprava ke zvýšení přesnosti. Tomu se věnují komerční platformy zabývající se predikcí výkonu FV zdrojů, jako je Solcast nebo PV Forecast. Principiálně se zpřesňování děje buď na fyzikální, nebo statistické úrovni. Ve fyzikální oblasti se nejčastěji zaměřuje na AOD (aerosol optical depth). Největší nejistota totiž nastává u přímého ozáření, které má vyšší intenzitu. Přesnější určení AOD za pomoci jeho měření ze země může chybu DNI redukovat. Statistických metod, které používají krátkodobé měření ozáření, bylo představeno mnoho. Jejich smyslem je napřímo upravovat NWP nebo satelitní data i v dlouhodobém horizontu.

Obecná slabost NWP předpovědi spočívá v modelování oblačnosti. V případě předpovídání ozáření bylo proto vynaloženo úsilí, aby se tento stav podařilo zlepšit. Ze studie provedené v nedávné době Německou meteorologickou službou (DWD) vychází, že vysoké odchylky ozáření NWP modelů často souvisí s přítomností oblačnosti v nízkých vrstvách atmosféry [1]. Navrhli proto, aby v rámci post-processingu byla udělána korekce na detekci nízké oblačnosti.

3.4 Předpovědi s CMV

Rychlé změny ozáření během dne jsou spojeny s proměnou struktury oblačnosti. Proto se předpověď v kratším horizontu zaměřuje na její časový a prostorový vývoj. Pro používané techniky se vžil označení CMV odkazující na sledování trajektorie pohybu oblačnosti. Obecně se podařilo vypořádat několik významných jevů, které sloužili k ustanovení předpokladů pro používané techniky. Mraky bývají tvarově celkem stabilní, ale rychle se pohybují po obloze. Proto lze ve dvou po sobě jdoucích okamžicích hledat podobné obrazce mraků na různých místech oblohy. Zároveň bylo zjištěno, že malé struktury se mění rychleji než velké. Kvalitu a přesnost CMV předpovědi negativně ovlivňují podmínky, které lokálně zvyšují tvorbu nebo zánik mračných celků. Vývoj pozorované scény se pak totiž neodvíjí od jednoduše pozorované trajektorie.

Obecný postup tvorby CMV předpovědi se podle podkladu [1] skládá z následujících kroků:

- Získání snímků oblohy buď pomocí sky-imageru, nebo satelitním zařízením.
- Určení trajektorií mraků a vektoru pohybu na základě porovnání po sobě jdoucích obrázků. Předpokladem je zachování jejich tvarové stálosti a optických vlastností.
- Poslední známý snímek oblohy je extrapolován pomocí odvozeného vektoru pohybu. Tím se získá odhad scény ve zjišťovaném rozsahu. Aby bylo možné výpočet provést, předpokládá se, že rychlost pohybu jednotlivých mraků je neměnná.
- Z namodelovaného výhledu podoby oblačnosti je odvozena předpověď slunečního ozáření.



Obrázek 3.3. Segmentace oblohy a detekce mraků na snímku sky-imageru [5]

Z hlediska zpracování obrazu lze CMV metody shrnout do dvou významných technik – porovnání bloků (blockmatching) a sledování optického toku (optical flow). Blokova shoda vyhledává výrazný soubor pixelů, tzv. blok, který se pokouší sledovat. Má schopnost využívat informace z více senzorů, čímž zvyšuje svoji odolnost vůči obrazovému šumu a změně jasu v rámci snímků. Blokové porovnání dokáže věrně předpovědět skutečný pohyb oblačnosti, pokud nezahrnuje roztahování mraků a jejich dělení na menší celky [6]. Modely optického toku poskytují odhad, jak jsou rozloženy zdánlivé rychlosti jasových bodů na snímcích [7].

■ 3.4.1 Sky-imager

Sky-imager, někdy též nazývaný all sky-imager (ASI) nebo total sky-imager (TSI), je zařízení určené k pozemnímu snímání oblohy. Detekuje typy a polohu mraků, v návaznosti umožňuje tvorbu předpovědi ozáření. Klíčovou součástí sky-imageru představuje typicky barevná kamera s čočkou ve tvaru rybího oka, která je obrácena směrem vzhůru k obloze. Díky širokoúhlému záběru tzv. rybího oka se daří zachytit celou pozorovatelnou sféru oblohy. Zařízení bývá dále doplněno o mikrokontrolér, který zajišťuje předzpracování obrazu a odeslání informace do centrálního výpočetního systému k určení vývoje ozáření. Minimální rozsah předzpracování zahrnuje úpravu snímku předdefinovanou maskou, která ze záběru odstraňuje části se statickými objekty. Sky-imager musí snímat oblohu s dostatečně krátkým časovým rozestupem, aby bylo sledování CMV adekvátně přesné.

Některé systémy nahrazují barevné snímkování infračervenou kamerou, která je však dražší, a proto se používá málo. U starších zařízení se také vyskytovalo uspořádání, kdy je snímkovácí kamera otočena směrem dolů. Pod sebou má polokulové zrcadlo, na kterém se odráží obraz oblohy, který je snímán. Tato koncepce má ale dvě nevýhody. Zaprvé je potřeba zrcadlo pravidelně čistit, zadruhé se na snímcích objevuje kamera a stativ, na kterém drží. Proto se na rozdíl od uspořádání s kamerou obrácenou vzhůru a čočkou ve tvaru rybího oka pozorovatel o část informace připravuje.

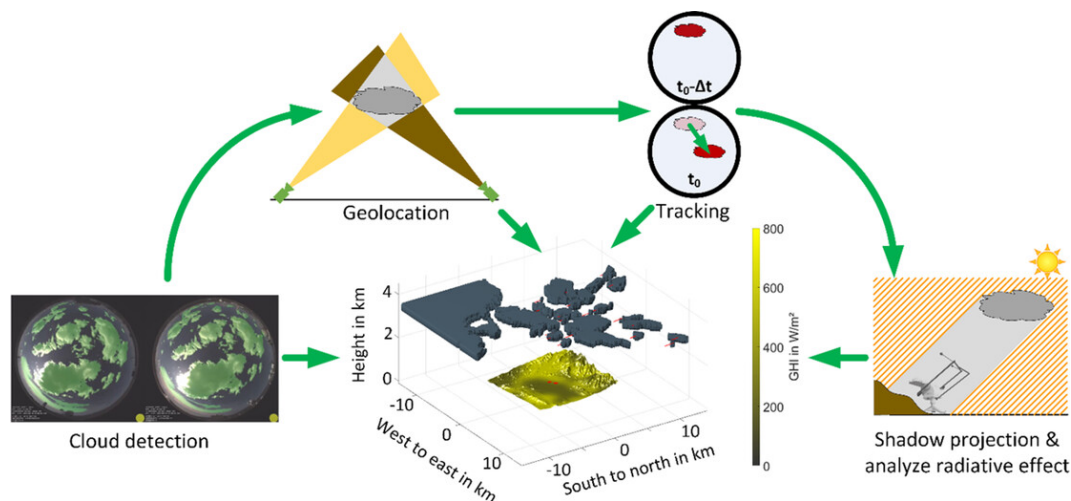
Specifickou obtíží pozemního snímkování oblohy je přeexponování obrazu v blízkosti slunečního kotouče, které znemožňuje použití dané oblasti. Existuje větší množství metod, které se snaží saturaci kompenzovat a nevyužitelnou část snímku minimalizovat. Přes všechnu snahu vždy zůstane jisté okolí slunce, které je ze zpracování třeba vyloučit, protože na něm nelze pohyb mraků efektivně sledovat.

Sky-imager dokáže detekovat změny ozáření s přesností na desítky metrů až jednotky kilometrů. Časový krok snímků bývá v desítkách sekund, aby se podařilo specifikovat náhlý nástup hrany zastínění. Maximální předpovědaná doba se výrazně odvíjí od vlastností oblačnosti (rychlost a výška mraků) a zorném poli sky-imageru. Typicky se uvádí v rozsahu 10 až 30 minut, setkal jsem se ale také s hodnotou 90 minut [8].

Předpověď ozáření s aplikací CMV odvozeného ze sky-imageru se řídí následujícími kroky [1]:

1. Pořízení série obrázků a identifikace míst, kde pixely představují oblačnost.
2. Odvození CMV
3. Geografická lokalizace zachycených mraků, případně určení jejich výšky.
4. Projekce stínů ze současného i budoucího rozložení oblačnosti na zemských povrch.
5. Vyhodnocení efektu, který mraky mají na procházející záření, a stanovení krátkodobé předpovědi ozáření.

Hlavním indikátorem pro detekci mraků na zachycených obrázcích bývá poměr červené a modré složky (RBR, red-to-blue ratio). Mraky vykazují vyšší RBR než čistá obloha, což je dáno rozptylem a pohlcováním kratších vlnových délek, ke kterému v nich dochází.



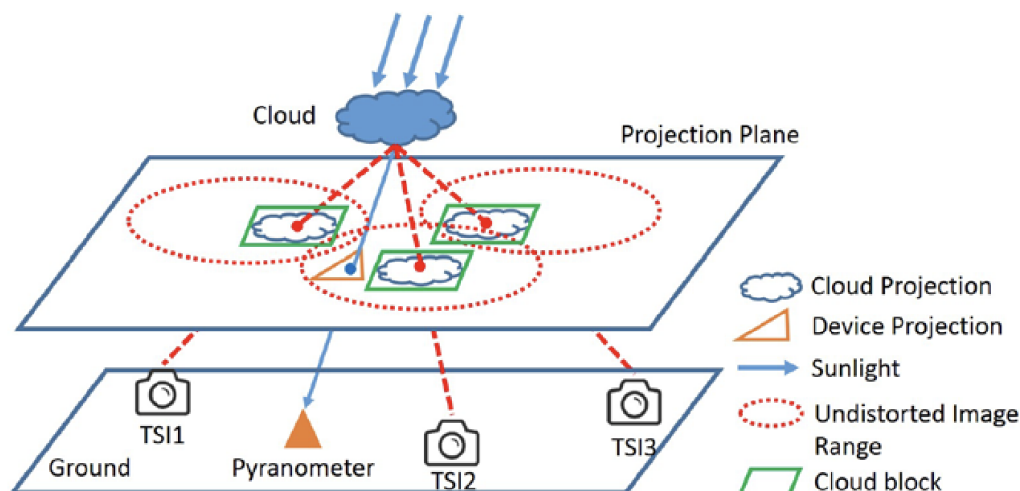
Obrázek 3.4. Diagram zpracování snímků sky-imageru – geolokace mraků [9]

V případě nowcast předpovědi se velmi často uplatňují metody strojového učení, jako jsou třeba neuronové sítě. Ty mohou být použity buď na jednotlivé kroky výše uvedeného postupu, nebo existují varianty, kdy běžný postup nahrazují. V takovém případě se sériím obrázků přímo přidělují hodnoty současného a budoucího celkového ozáření v místě instalace sky-imageru.

Rozdíl v předpovídání ozáření pro bod, v němž se nachází sky-imager, a aplikaci, která vyžaduje mapování stínů, spočívá v potřebě znalosti výšky sledovaných mraků. Zatímco pro samotné umístění není informace o výšce důležitá, protože se rychlost pohybu dá parametrizovat pomocí počtu pixelů za sekundu, v opačném případě hraje významnou roli. Rychlost a směr pohybu mraků pak totiž musí být vyjádřeny v metrech za sekundu, aby šel odvodit pohyb stínů. Výšku sledované oblačnosti nejde určit z jednoho pozorování sky-imagerem, proto je třeba přemýšlet nad postupy, jak tuto informaci do modelu doplnit. Dnes nejčastěji používanou technikou je odvození ze souběžného snímkování ze dvou a více sky-imagerů. Jako možnost se také nabízí satelitní modely odhadu nebo odvození z NWP předpovědi, obě tyto varianty mají ale malou přesnost. Existuje i speciální zařízení určené k měření výšky mraků – ceilometru, který obsahuje laser, nebo jiný výkonný světelný zdroj. Laserový ceilometr funguje na principu výpočtu dráhy, kterou paprsek urazí za čas, než se odražený vrátí zpět. Optický ceilometr se skládá ze zdroje a detektoru umístěných na různých místech, aby bylo možné výšku dopočítat pomocí triangulace. Obecně ceilometr vykazuje vyšší přesnost správného určení výšky než systém se dvěma sky-imagery. Jeho nevýhodou ale je, že měří vzdálenost spodního okraje oblačnosti jen přímo nad sebou. Nicméně mraky bývají v různých částech oblohy různě vysoko. Proto je jeho uplatnění omezené a na měření výšky oblačnosti pro účely předpovědi ozáření se spíš nehodí.

Kromě identifikace 3D obrazu oblačnosti spojení více sky-imagerů rozšiřuje oblast, pro kterou je krátkodobá předpověď tvořena. Rovněž se prodlužuje časový horizont prognózy a zvyšuje přesnost. Schematický obrázek 3.5 ilustruje příklad činnosti sítě tří sky-imagerů.

Na snímaném území poskytuje CMV předpověď ze sky-imageru lepší odhady ozáření než snímkování pomocí satelitů. Je možné získat přesnější časové i prostorové určení hranice oblačnosti. Také se daří namodelovat efekt jednotlivých mraků bližší skutečnosti. Proto se analýza snímků ze sky-imageru používá k vytváření knihoven typů oblačnosti

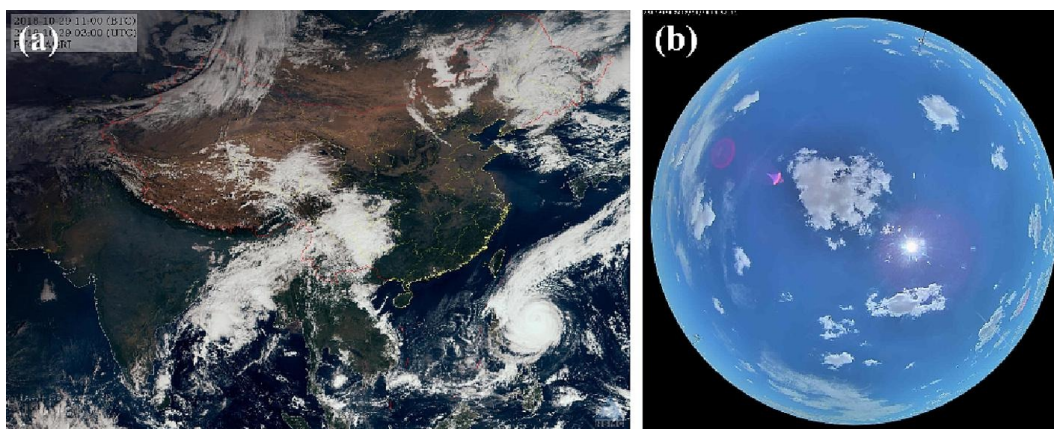


Obrázek 3.5. Použití více sky-imagerů – určení výšky a polohy oblačnosti [6]

a jejich vlivu na sluneční ozáření. Tvorba podobných databází je zásadní pro metody strojového učení.

■ 3.4.2 Satelitní CMV předpověď

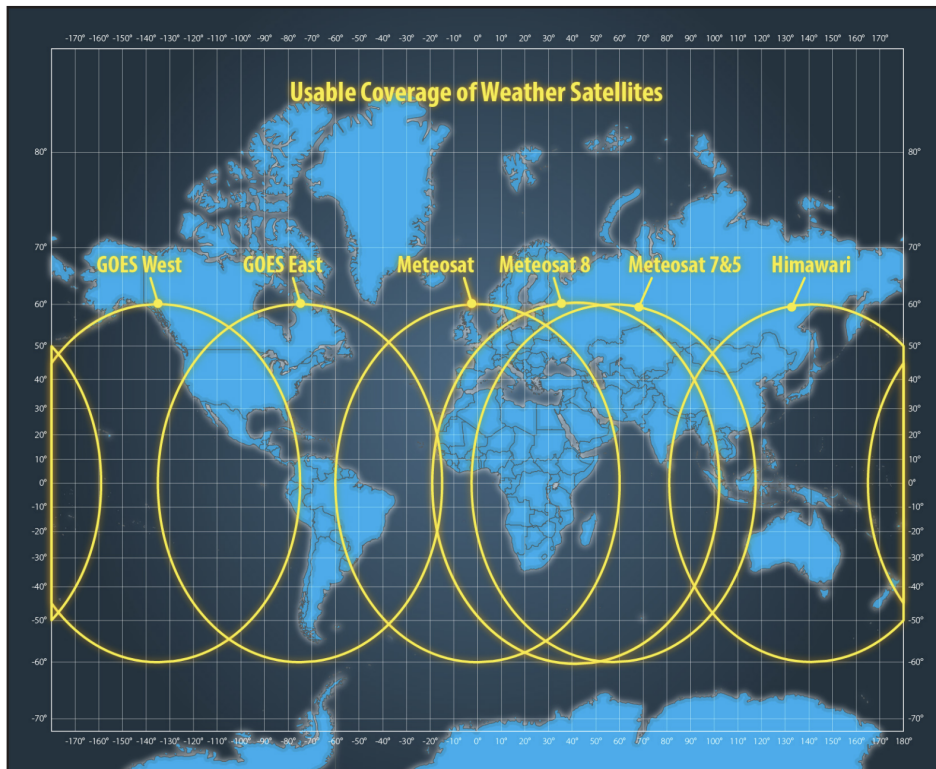
Druhou variantou předpovědi ozáření na základě vývoje oblačnosti je určení vektoru pohybu ze satelitního pozorování. Oproti sky-imageru se toto snímkování výrazně liší v předpovídané době, která dosahuje 4 až 6 hodin. Protože se běžná horizontální rychlost oblačnosti pohybuje v rozmezí 50–200 km/h, znamená to potřebu sledování velkého území. Toho lze dosáhnout právě pomocí snímkovací techniky umístěné na obíhajících satelitech. Vydané doporučení podle světové meteorologické organizace (WMO) uvádí ideální použití satelitní předpovědi s CMV na čas dopředu v rozsahu 30 minut až 6 hodin [8].



Obrázek 3.6. Snímky oblačnosti ze satelitního a pozemního sledování [10]

K získání kvalitní předpovědi je zapotřebí dlouhodobé soustavné snímání atmosféry. Parametry současných satelitních systémů také zásadně ovlivňují kvalitu předpovědi. Principiálně se považuje za důležité, aby bylo pro danou oblast dostupných několik snímků do hodiny. V tomto smyslu se pak uvádí, že pokrytí nowcast satelitní předpovědi zahrnuje většinu zeměkoule s výjimkou oblastí blízkých severnímu a jižnímu pólu. Důvodem k tomu je rozmístění a dráhy meteorologických družic.

Nejvýznamnějšími zdroji jsou geostacionární satelity. Jak už jejich název napovídá, jde o satelity obíhající nad rovníkem se stejnou úhlovou rychlostí jako Země, takže se při pohledu ze země zdá jejich poloha neměnná. Vývoj atmosféry sledují na území, které jim dovolí zakřivení Země. Oblast pokrytí dosahuje symetricky do 60° s.š. a 60° j.š. Existuje hned několik řad geostacionárních meteorologických družic podle lokality, kde operují. Vzájemně se tyto systémy doplňují a zaručují globální pokrytí. K nejdůležitějším patří americká série satelitů GOES a evropská Meteosat. Typické rozlišení, s jakým může být následně odvozena předpověď ozáření, se pohybuje v rozmezí 1–10 km a s časovým krokem 10–15 minut.



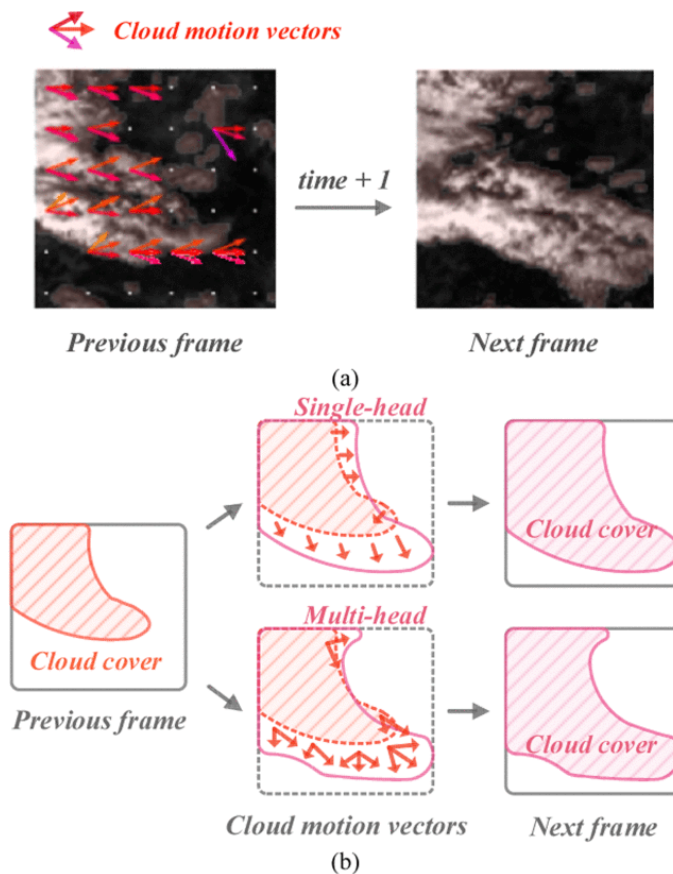
Obrázek 3.7. Oblasti pokrytí geostacionárních satelitů [1]

Pro oblasti, které se nacházejí mimo dosah pozorování geostacionárních satelitů, se snímkování provádí polárními družicemi. Jejich oběžná dráha je kolmá na rovinu rovníku, poskytují tak obraz oblačnosti v celé atmosféře. Na druhou stranu jejich dráha určuje i časové rozlišení, kdy zaručeně projdou nad každým místem jen jednou za den. Pro vyšší zeměpisné šířky se proto doporučuje zkombinovat snímkování z mnoha polárních satelitů, aby se dosáhlo dostatečného časového dělení.

Princip odvození CMV ze satelitních snímků vychází z porovnání po sobě jdoucích snímků. Obvykle se první rozdělí do zájmových oblastí v rozsahu cca 90x90 km. Takto zvolená oblast odpovídá dostatečné velikosti, aby se na ní dal sledovat posun neměnných shluků oblačnosti, a zároveň je dostatečně malá, aby šlo pohyb uvnitř popsat jedním vektorem. Dále se vypočtou střední rozdíly pixelů na následujícím snímku, a to pro posun v každém směru. Výsledný vektor pohybu zájmové oblasti se shoduje s posunutím s nejmenším rozdílem. Vektory pohybu jsou odvozeny pro všechny zájmové oblasti a nakonec se aplikují na poslední snímek v řadě, aby se vytvořil odhad budoucí podoby oblačnosti. Dříve než se nový obraz oblačnosti použije k výpočtu slunečního ozáření,

bývá zjemněn vyhlazovacím filtrem. Díky tomu se eliminuje vliv nahodilého výskytu malých mraků.

V poslední době se také vyskytují metody, které rozlišují v přístupu ke sledování mezi jednotlivými druhy mraků. Také se objevily návrhy na určení pohybu základního bodu ve více směrech. Schematicky tento přístup zachycuje obrázek 3.8.



Obrázek 3.8. Rozdíl v uvažování jednoho a více vektorů působících na jasový bod při výpočtu CMV [11]

3.5 Statistický přístup

Základní předpoklad statistického přístupu k předpovídání ozáření spočívá v myšlence, že charakteristické vzorce v pozorování z minula se budou opakovat i v budoucnu. V současné době se statistické metody z velké části orientují směrem strojového učení, nicméně se jde stále setkat i s klasickými způsoby analýzy časových řad. Statistický přístup může být podle zaměření rozdělen do dvou skupin. Buď odvozuje hodnoty ozáření pouze z analýzy dat místního měření, nebo cílí ke zlepšení výstupů ze satelitní předpovědi nebo NWP. Pro jakoukoliv statistickou metodu platí, že na ni má vliv správný výběr vstupních proměnných, a zároveň, že kvalitní měření na místě je nejlepším výchozím stavem pro každý model.

Prostá analýza časových řad měření může poskytovat předpověď s horizontem několika minut až hodin. Opírá se o vypočítané korelace v datech ozáření i oblačnosti. Pro krátký předpovídaný čas dosahuje menších chyb než NWP nebo předpověď na základě satelitního snímkování. S narůstajícím časem se začíná projevovat chaotické chování meteorologických jevů. Proto se snižuje podobnost aktuální datové série s časovou řadou,

z níž model vychází, a významně se snižuje přesnost. Na kvalitu má také vliv základní podobnost dosavadního měření s referenčním vývojem, z něhož se odvozuje předpověď. Z fyzikálního hlediska lze pak zhodnotit, že na rozdíl od jiných modelů prostá analýza časových řad měření silně závisí na povětrnostních podmínkách (stabilitě rozložení oblačnosti) a časoprostorovém rozlišení. Ve srovnávacích studiích s jinými přístupy bylo zjištěno, že naměřená data ozáření mají pro předpověď významný přínos přibližně do dvou hodin dopředu. V případě předpovědi se satelitním CMV se dokonce projevuje jejich převaha nad prostou statistickou analýzou už při 30 minutách až 2 hodinách, v závislosti na velikosti předpovídané plochy [1]. Sky-imager pochopitelně dosahuje přesnosti ještě vyšší, zároveň se obvykle bez místního měření ozáření neobejde.

U NWP metod a satelitních předpovědí se vždy objevuje nějaká statistická nebo systematická chyba, protože spočívají v určitém typu zjednodušení přírodních fyzikálních procesů. Při uplatnění zpětné vazby, kdy se v modelech zohlední porovnání historicky předpovídaného a měřeného ozáření, můžou být tyto chyby částečně odstraněny. Někdy se též statistické porovnání dat za uplynulé období používá ve dvou krocích, k odvození vlivu vstupních podmínek, které do původního modelu nebyly zahrnuty, a následně k úpravě modelu s touto informací. Pokud analýza měření složí ke zlepšování jiných modelů, užívá se pro to termín *post-processing* (*statistical post-processing*) nebo *MOS* (*model output statistics*).

Jedním z hlavních smyslů použití *MOS* je přizpůsobení výsledků předpovědi místním klimatickým a geografickým podmínkám. Specifický příklad tzv. *site adaptation* si vystačí i s krátkodobým měřením, aby se odpozoval místní stav ovlivňující ozáření a nastavily parametry. *Site adaptation* se nemusí dít pouze pomocí statistických metod, ale třeba i za přispění místního měření odvozujícího lokální situaci aerosolů (*AOD*). Dříve se termín *MOS* používal jen k vyjádření přímé úpravy ozáření v konečné fázi předpovědi. Postupně ale došlo k rozšíření významu a dnes se můžeme setkat i s tím, že označuje statistický přístup k úpravě dílčích proměnných uvnitř modelu.

Druhým příkladem statistického *post-processingu* je kombinování výstupů z více modelů. Jednu cestu zpřesňování předpovědi představuje obyčejné průměrování výsledků z různých modelů. Využívá předpokladu, že chyby jednotlivých modelů nemívají vždy stejný původ, a proto mezi nimi nevzniká dokonalá korelace. Postup se dá využít jen, pokud modely mají podobnou přesnost. Druhý, pokročilejší způsob si všímá silných a slabých stránek jednotlivých modelů za různých okolností. V kombinování se pak snaží podle očekávané povětrnostní situace jejich příspěvky přizpůsobit. Třetí oblast spočívá v nastavení správné součinnosti metod s různým časovým horizontem, od několika minut až po více dní. Zabývá se integrací všech přístupů, včetně místního měření, satelitního pozorování a NWP. Pravděpodobně nejjednodušší příklad z této oblasti je vážený průměr, kde se váhy zahrnutých metod optimalizují pro každý předpovědní horizont.

Další uplatnění statistické postupy nachází při odvozování výstupních veličin, které nepatří přímo k výstupům základního modelu. Například ne všechny zdroje poskytují data přímého i celkového ozáření samostatně, což se někdy může hodit. Nicméně v této problematice se často uplatňuje následný výpočet přes fyzikální nebo empirické modely. V současné době je navíc obvykle žádanou veličinou *GHI*, které se u moderních zdrojů zpravidla objevuje. Proto měla tato oblast význam především v minulosti.

Kapitola 4

Vyjádření přesnosti předpovědi

Sluneční ozáření má specifické vlastnosti, kterými se odlišuje od ostatních meteorologických parametrů. Především se jedná o skutečnost, že ozáření se běžně velmi rychle a významně mění. Zároveň existuje řada pravidel, které ovlivňují krátkodobé i dlouhodobé chování. Zatímco v noci je intenzita nulová, přes den může dosahovat 1000 W/m^2 . V našich zeměpisných šířkách se též mění počet hodin dopadajícího slunečního záření. Proto by hodnocení modelů mělo rozdíly a zákonitosti v chování ozáření brát v úvahu. Současně by metrika přesnosti měla reagovat na smysl, s nímž předpověď vzniká. Za běžného provozu FVE například stejně velká relativní chyba předpovědi ráno, kdy je osvit malý, má mnohem menší negativní dopad než v poledne při plném osvitu. Platí proto, že lepší hodnocení poskytují absolutní vyjádření, nebo metriky, které dokážou zohlednit velikost měření. Takové se ve statistice nazývají závislé na měřítku. Metrika musí zůstat také jednoduchá a čitelná pro uživatele.

Další vlastností, která se u metrik sleduje, je jejich reakce na velké odchylky. V některých se totiž projeví více, jiné jejich význam nezdůrazňují. Záleží proto na užívání předpovědi, jestli má přednost sledování dlouhodobé odchylky, případně systematické chyby, nebo jde o četnost a velikost výkyvů přesnosti. Často lze také doporučit hodnocení pomocí více kritérií. Interpretace výsledků se pak odvíjí od vztahu, jaký metrika k velkým odchylkám a systematické chybě má. V případě předpovědi ozáření pro účely FVE záleží především na správném odhadu množství získané energie a denním profilu, na které musí vyjádření přesnosti reagovat.

Snaha je též zajistit, aby krátkodobá chyba měla na míru udávající přesnost jen omezený vliv. Občas totiž dochází k náhlým změnám počasí, například zformování a přechod ojedineleho mraku, které nelze zcela vyloučit. Přesto může být předpověď v jádru kvalitní a při udávání její přesnosti by ji to nemělo nad míru poškozovat.

Z obecných požadavků vyplývá rovněž přání, aby metrika podávala konzistentní výsledek. V ideálním případě by odpovídající výsledek vzešel z jakéhokoliv ročního období, dokonce i bez ohledu na to, jestli jde o slunečný nebo zatažený den. Protože se však přesnost předpovědi ozáření ve skutečnosti mění a roli hrají okrajové podmínky, úplné nezávislosti na sledovaném období nejde dosáhnout. Proto se doporučuje, aby k ověření přesnosti docházelo na co nejdélším období, které obsahuje řadu různých meteorologických stavů.

Běžně používaných metrik přesnosti v oblasti předpovědi existuje více než 40 [12]. Zde uvádím výběr, který vychází z podkladů [12–14]. Většina z nich má základ v okamžité odchylce:

$$e = x_{model} - x_{meas} \quad (1)$$

Kde x_{model} je předpovídaná hodnota a x_{meas} je měřená hodnota. Velikost odchylky se pochopitelně zjistí až ve chvíli, co známe skutečnou hodnotu x_{meas} . Pro posouzení kvality se však často používá soubor historických dat s již známými měřenými hodnotami. Kvůli snaze o jednoznačnost v práci zachovávám anglické názvy metrik.

4.1 RMSE (Root mean square error)

RMSE představuje statistické vyjádření přesnosti, které se při analýze souboru dat velmi často používá. Ve vědeckém prostředí patří k nejoblíbenějším. Výstupem je kladné číslo s rozměrem odvozeným od vstupní veličiny, u něhož se ztrácí ale fyzikální význam. Proto se RMSE těžko interpretuje a může být pro některé aplikace nevhodný. Další vlastnost, která využití omezuje, spočívá ve zvýrazňování dopadu velkých odchylek. Díky použité mocnině dochází totiž k váhování odchylek. Proto by v případě použití RMSE měl být výsledek ověřen metrikou, která k odchylkám přistupuje rovnoměrně. Z dalších vlastností RMSE vykazuje závislost na měřítku. V případě osvitů tedy přidává větší váhu slunečnějším hodinám. Vztažením k průměru z měření lze z RMSE získat relativní vyjádření.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{model,i} - x_{meas,i})^2} \quad (2)$$

4.2 MBE (Mean bias error) a MAE (Mean absolute error)

MBE odpovídá aritmetickému průměru odchylek predikce. Výsledná hodnota se svým významem shoduje s celkovou chybou odhadu získané energie za sledované období. Podle znaménka MBE udává, jestli odhad skutečné množství překročil nebo zůstal nižší. Zkoumání MBE může podat informaci o systematické chybě modelu.

V případě MAE se jedná o aritmetický průměr z absolutních hodnot odchylek, které zprostředkovává informaci o průměrné vzdálenosti mezi predikovanou a skutečnou hodnotou. Vzhledem k tomu, že v případě MAE nezáleží na směru odchylky, bude vždy nabývat vyšších hodnot než metrika MBE. Výběr mezi MAE a MBE záleží na konkrétní situaci, jestli je spíše potřeba sledovat, jak přesně se předpověď trefuje v každém čase, nebo souhrnné porovnání s měřením za ucelený interval. Můžou se také dobře doplňovat při komplexnějších úlohách.

Na rozdíl od RMSE jsou obě metriky méně citlivé na velké odchylky. Vykazují naopak snahu odchylku vyhladit. Souběžně jsou také závislé na měřítku, na rozdíl od RMSE ale pouze lineárně. Aby se upozadil vliv změny osvitů v průběhu dne, vyplatí se jejich výpočet přes širší časový interval, den však představuje minimum. Z obou lze rovněž vytvořit relativní variantu, pokud se vydělí průměrem z měření přes zkoumaný interval.

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{model,i} - x_{meas,i}) \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_{model,i} - x_{meas,i}| \quad (4)$$

4.3 MrE (Mean relative error) a MrAE (Mean relative absolute error)

Jedná se o zprůměrovaná vyjádření relativních odchylek rE a rAE, čímž se umožní jejich použití na větším souboru dat. Postup, kdy se odchylka převádí na relativní podobu v každém časovém okamžiku samostatně, vede nadhodnocení chyby při nízkých stavech měření. Navíc vysoká závislost na aktuální situaci odporuje obecným požadavkům na metriku. Pro veličinu typu slunečního ozáření, které definuje velký rozptyl hodnot, jsou proto MrE a MrAE prakticky nepoužitelné. Stejně se chová i oblíbenější metrika MAPE (Mean absolute percentage error), která se od MrAE liší jen převedením na procenta [12].

$$MrE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(x_{model,i} - x_{meas,i})}{x_{meas,i}} \quad (5)$$

$$MrAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|x_{model,i} - x_{meas,i}|}{x_{meas,i}} \quad (6)$$

Kapitola 5

Praktická část

V praktické části diplomové práce jsem se zabýval analýzou předpovědi ozáření PV Forecast, kvantifikováním jejího přínosu a návrhy pro další zpřesnění. V souladu s uvedenými poznatky byla k hodnocení odchylek použita kritéria MBE (mean bias error) a MAE (mean absolute error). Při uvádění výsledků postupuji ve shodě s podkladem [14] a do hodnocení zahrnuji pouze dobu denního svitu, tj. s nenulovým měřeným ozářením. Pokud záleží jen na porovnání zkoumaných variant mezi sebou, často metriky omezují na zájmové období, ve kterém se výsledky předpovědí rozcházejí.

5.1 PV Forecast

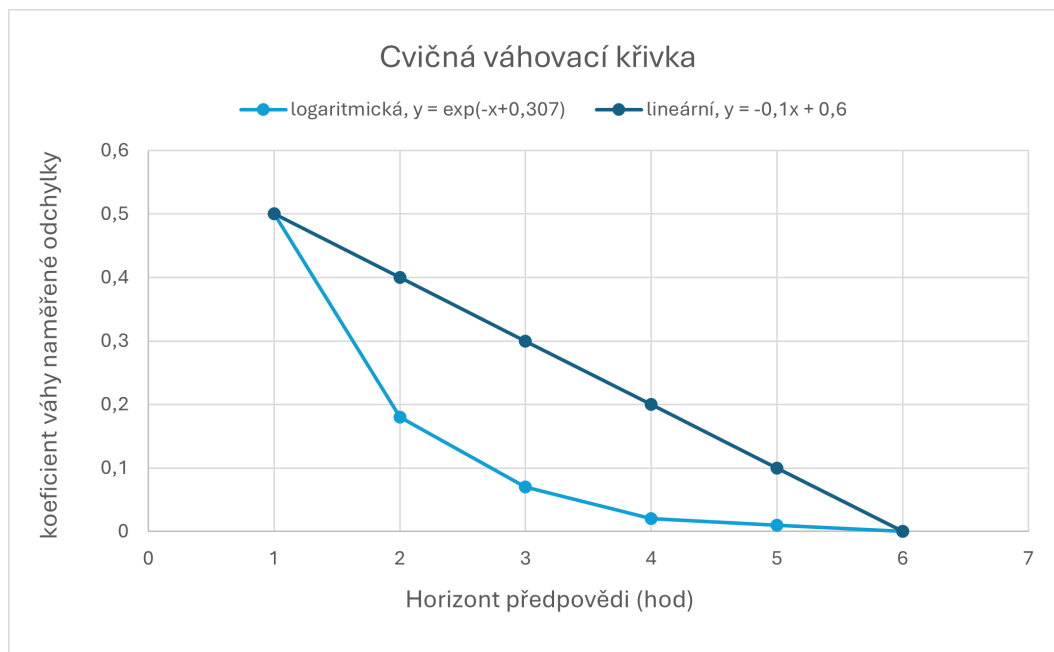
PV Forecast je místně specifická předpověď osvitu tvořená v Univerzitním centru energeticky efektivních budov UCEEB. Předpověď pokrývá svým rozsahem Českou republiku. Odhad ozáření nabízí až na 5 dní dopředu. Model intenzity slunečního ozáření vychází především z globální předpovědi Národního úřadu pro oceán a atmosféru NOAA, ale dokáže pracovat i s dalšími NWP zdroji. K následnému zlepšení předpovědi PV Forecast využívá strojové učení, neuronové sítě a další zpřesňující parametry. Na základě predikce osvitu PV Forecast nabízí výpočet produkce energie pro FVE v dané lokalitě.

5.2 Nowcast z místního měření

Statistické zpracování místního měření patří k technicky nejjednodušším způsobům nowcastingu. Na rozdíl od sledování pohybu mraků neobsahuje snímkovací zařízení a ukládání datově náročných obrázků. Výpočet také probíhá přímo bez mezikroků v podobě určování vektoru CMV a projekce oblačnosti na povrch. Zásadní vliv má pouze dostupnost předpovědi a kvalitního místního měření.

Cílem provedené analýzy nasbíraných dat je stanovení koeficientů křivky, která zohledňuje zmenšující se závislost mezi měřeními v době tvorby nowcastu a vývojem osvitu v narůstajícím časovém horizontu. Vypočtené váhové koeficienty jsou uplatněny k úpravě krátkodobé předpovědi podle aktuální odchylky měření. K následnému ověření přínosu procesu slouží porovnání odchylek původní nezměněné předpovědi a vytvořeného nowcastu. Zdroj dat představují časové řady předpovědi a místního měření pro areál Fenix v Jeseníku. K dispozici byl soubor hodnot od začátku roku 2022 do října 2023, který je přílohou této práce. Použití dlouhodobých dat měření a předpovědi zajišťuje dostatečnou obecnost prezentovaných výsledků. PV Forecast v základní verzi vydává aktualizovanou predikci vždy po jednom dni, data uložená v souboru tedy odpovídají předpovědi na den dopředu.

Vzhledem k očekávané době nowcastu na maximálně 4 až 6 hodin a poklesu závislosti mezi měřeními hodnotami ozáření s narůstajícím časem, byly vydefinovány cvičné váhové křivky pro tvorbu nowcast předpovědi. Představují totiž nástroj, jak si dopředu ověřit očekávané chování nowcastu, které závisí na procesu tvorby a kvalitě základní



Obrázek 5.1. Cvičné váhovací křivky pro nowcast z měřeného osvitu

Časový horizont od měření	Váha pro zohlednění měřené odchylky	
	Lineární	Logaritmická
1 hod	0,5	0,50
2 hod	0,4	0,18
3 hod	0,3	0,07
4 hod	0,2	0,02
5 hod	0,1	0,01
6 hod	0	0

Tabulka 5.1. Koeficienty cvičných váhovacích křivek.

předpovědi. Cvičné koeficienty pro násobení měřené odchylky vychází z lineární a logaritmické klesající funkce, která v horizontu jedné hodiny dosáhne váhy 50 %, jak ukazuje graf 5.1. Konkrétní číselné hodnoty koeficientů jsou uvedeny v následující tabulce.

5.2.1 Určení času pro nowcasting

Prvotní záměr na tvorbu nowcastu představoval zpracování brzkých ranních měření, aby se podle jejich odchylky předpověď na den upravila. Nicméně se ukázalo, že odchylky krátce po rozednění často dosahují mnohem větších hodnot než samo měření. Získaný poměr k tvorbě nové sady predikovaného ozáření pak přes určité tlumení může svojí velikostí zkoumání závislosti znemožnit. Proto jsem se věnoval zkoumání doby, pro kterou má význam nowcast tvořit.

Abyste práce vložená do výpočtu vyplatila, musí nowcast dosahovat prokazatelně lepších výsledků než původní předpověď. Zároveň se stačí věnovat času a hodnotám ozáření, které ovlivní energetické chování systému. Na jedné straně tedy zůstává snaha zpřesnit předpovídaný vývoj od prvních ranních pozorování, na opačném konci dne by korekce měla zasáhnout alespoň hodiny s plným očekávaným dopadajícím zářením. Na vypočítaných metrikách přesnosti MAE a MBE zaznamenaných v tabulce 5.2 je možné

si všimnout, že přibližně od 14 hodin už nowcast přesnost významně nezlepšuje. Přitom korekce předpovědi pro většinu dne už byla tou dobou určitě vytvořena. Navrhují proto v pozdějších časech nowcast nezpracovávat, ačkoli zcela přesné určení by jistě záviselo i na ročním období a vlivu prodlužujících se dní.

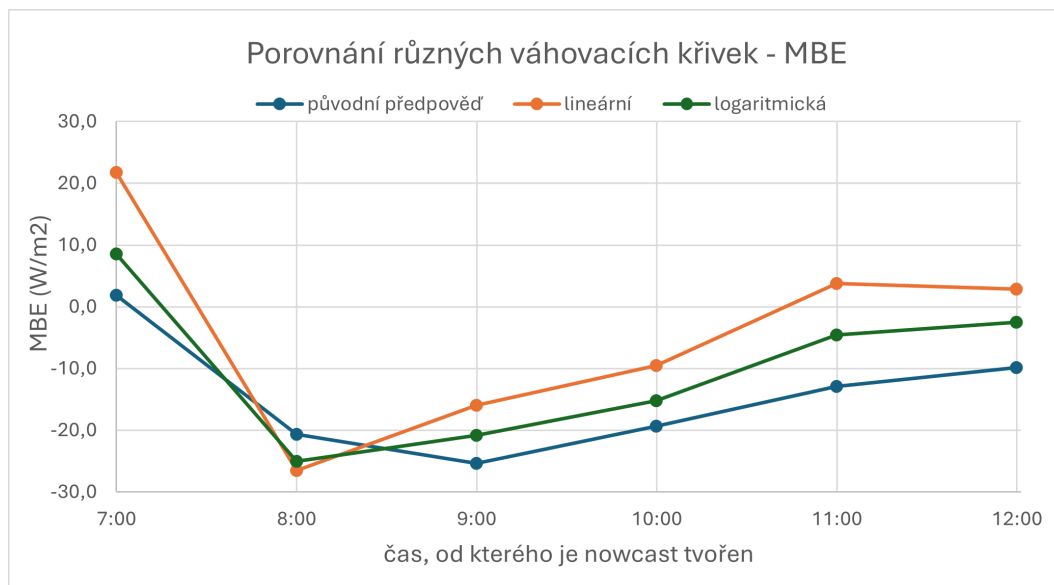
Počátek nowcastu	Základní předpověď		Lineární křivka		Logaritmická křivka	
	MBE (W/m ²)	MAE (W/m ²)	MBE (W/m ²)	MAE (W/m ²)	MBE (W/m ²)	MAE (W/m ²)
7:00	1,9	128,6	21,8	137,5	8,6	125,4
8:00	-20,7	129,3	-26,5	119,6	-25,0	120,7
9:00	-25,3	130,4	-16,0	127,8	-20,8	127,4
10:00	-19,3	127,9	-9,5	111,4	-15,2	115,4
11:00	-12,9	116,6	3,8	102,0	-4,5	103,8
12:00	-9,8	102,0	2,9	87,6	-2,5	90,2
13:00	-10,8	86,3	-3,2	72,2	-6,2	75,3
14:00	-17,5	72,1	-15,6	60,8	-16,5	62,9
15:00	-25,8	56,3	-26,6	48,3	-26,7	49,1

Tabulka 5.2. Určení času pro tvorbu nowcastu – metriky MAE a MBE.

5.2.2 Ověření použití nowcastu během dne na cvičných křivkách

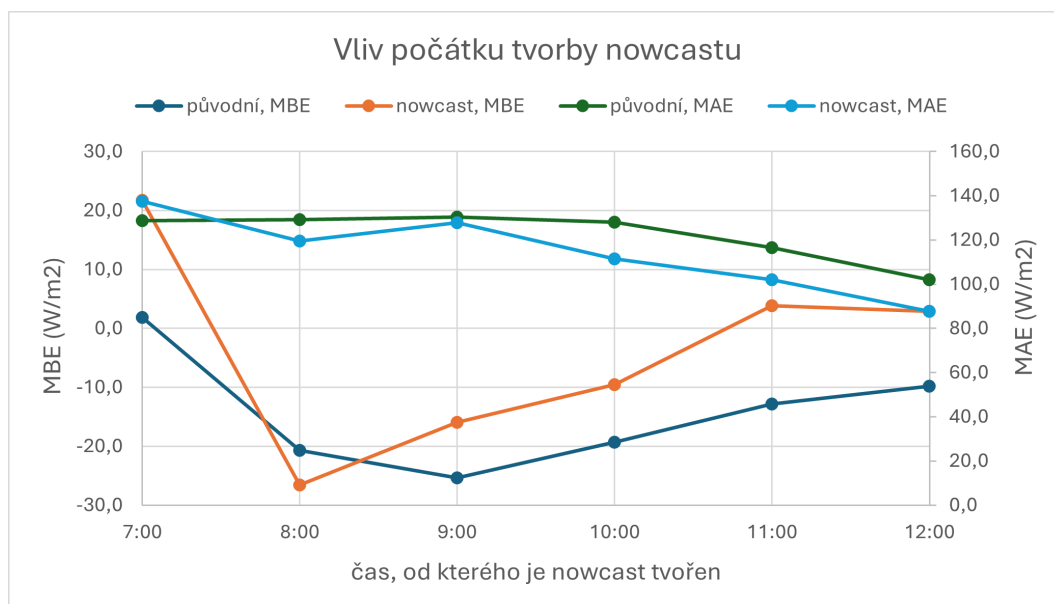
Pro přehlednější ilustraci výsledků jsem se zaměřil na čas do 12 hodin. Nowcast vytvořený v tomto období pokrývá rozsah s největší mírou ozáření. Současně přináší největší užitek a zlepšení přesnosti. Ve stanoveném intervalu bylo provedeno ověření, jak se nowcast chová na cvičných křivkách. Na grafu 5.2 lze sledovat porovnání metriky MBE obou křivek a výchozí předpovědi. Je nutné upozornit, že zde prezentované výsledky MBE slouží pouze k porovnání jednotlivých variant mezi sebou. Vztahují se totiž vždy jen na následujících 5 hodin od času tvorby nowcast předpovědi, což odpovídá předpokládanému horizontu. Například do metriky pro 7 hodin ráno tak byly zahrnuty hodnoty ozáření v rozmezí od 8:00 do 12:00. Výsledky MBE proto nelze srovnávat napříč jednotlivými časy.

Z prezentovaných výsledků je zřejmé, že nowcast na základě měření a dopočítané odchylky vychází líp než původní předpověď až od určitého okamžiku. Důvodem jsou právě velké ranní odchylky k poměru předpovídaných úrovní ozáření, které se během dne zmírní. Vliv může mít také postupující doba od poslední aktualizace původní předpovědi, tedy půlnoci, nicméně relativní nepřesnost ranních hodnot tuto vlastnost zcela zastíní. Také si lze povšimnout, že z navržených cvičných váhovacích křivek ve většině případů dopadá lépe lineární varianta. Nicméně pravý průběh násobení bude z dat odvozen samostatně.



Obrázek 5.2. Porovnání výsledků cvičného nowcastu a základní předpovědi.

Na grafu 5.3 pro úplnost uvádím společné hodnocení metrik MAE a MBE pro lineární váhovací křivku. K úplnému zhodnocení kvality předpovědi bude totiž vždy potřeba sledovat obě tyto metriky, které vyjadřují jak průměrnou odchylku (MAE), tak i chybu v celkovém odhadu (MBE). Jak je na grafu vidět, závěry těchto metrik se při výběru z různých variant předpovědi můžou ve výjimečných případech lišit. V takovém případě lze předpovědi považovat za srovnatelné, respektive záleží na stanoveném účelu, který parametr je rozhodující.



Obrázek 5.3. Porovnání přesnosti základní předpovědi a lineární verze nowcastu – metriky MAE a MBE.

5.2.3 Váhovací křivka nowcastu

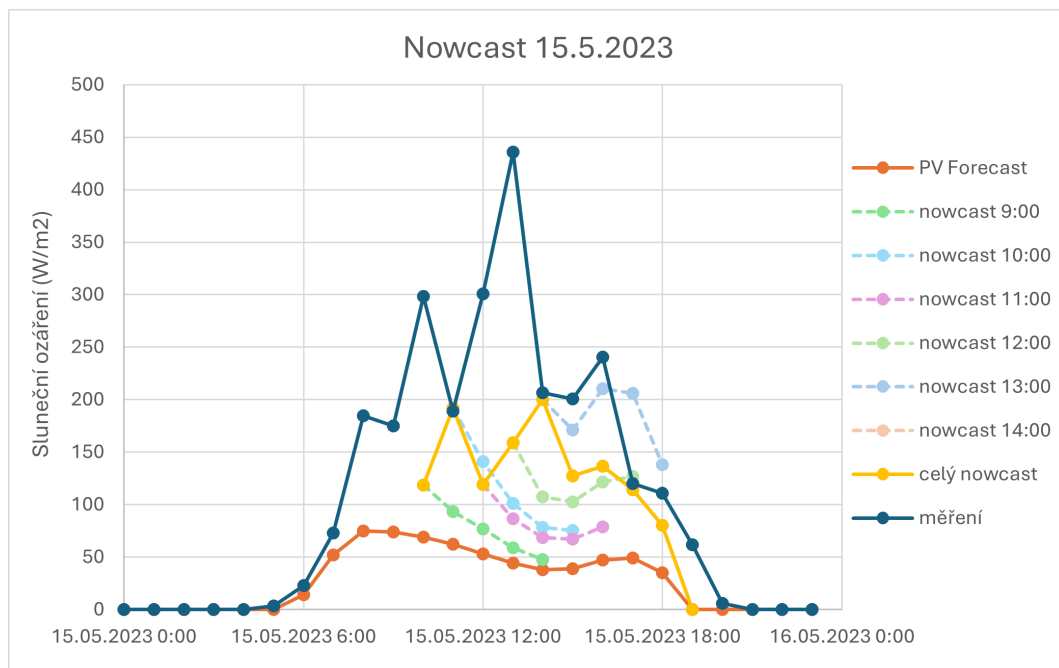
K přesnému určení váhovací křivky byl napsán skript v programovacím jazyce Python, který je přílohou této práce (příloha 2). Vadnutí charakterizuje pomocí násobících koeficientů pro každý čas z použitého horizontu 5 hodin. Program pružně reaguje na zvolený čas, od něhož nowcast začíná, a uzpůsobuje mu generovanou křivku. V tabulce 5.3 uvádím vypočítané koeficienty v rozmezí tvorby od 9:00 do 14:00.

Pro úplnost doplňuji, že byla navržena též varianta, kdy se násobená odchylka a křivka váhování vypočítávaly z průměru měření za poslední 3 intervaly. Avšak tento postup nedosahoval lepších výsledků než uzpůsobení váhovací křivky příslušné hodině. Proto se dále pracovalo s výše uvedenou variantou výpočtu uloženou v příloze 2.

Časový horizont (hod)	Koeficienty váhování pro nowcast z odchylky měření					
	od 9 h	od 10 h	od 11 h	od 12 h	od 13 h	od 14 h
1	0,53	0,63	0,61	0,56	0,48	0,51
2	0,37	0,50	0,47	0,39	0,38	0,43
3	0,33	0,39	0,39	0,35	0,39	0,30
4	0,25	0,32	0,35	0,34	0,36	0,29
5	0,19	0,28	0,33	0,34	0,33	0,16

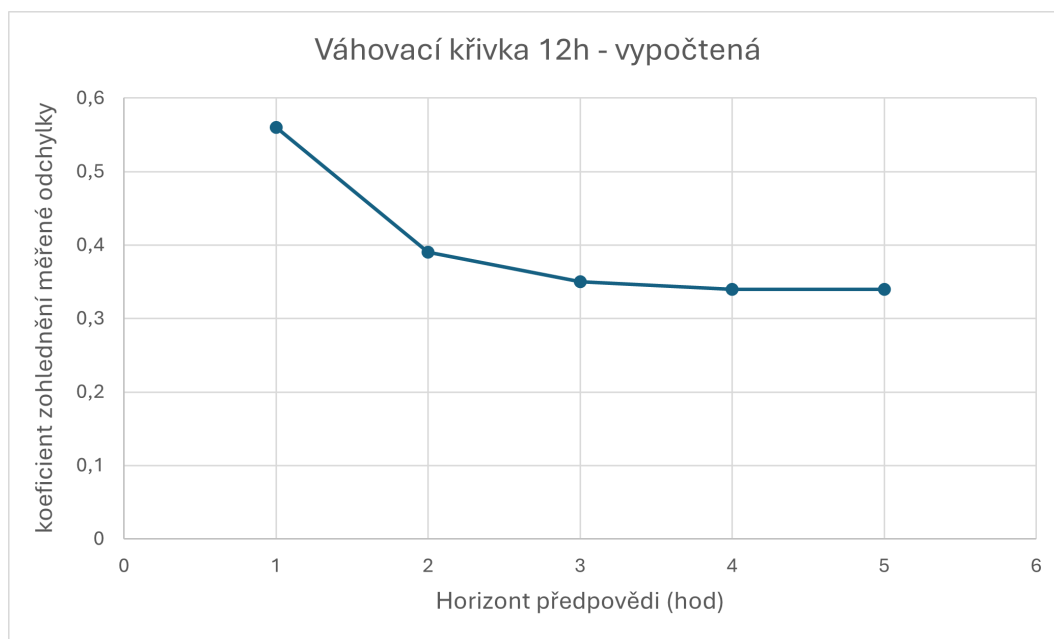
Tabulka 5.3. Koeficienty váhování pro nowcast 9–14h.

Výsledná podoba nowcastu uzpůsobuje po každé hodině svůj výhled podle nově predikovaných hodnot. Do doby vydání dalšího odhadu se pracuje s posledním očekávaným průběhem. Jak může vypadat celodenní vývoj zachycuje graf 5.4 na příkladu 15.5.2023.



Obrázek 5.4. Tvorba nowcast předpovědi 15.5.2023.

K další ilustraci vlastností tvořeného nowcastu pomůže, pokud se zaměříme na jeden čas předpovídání. Já jsem si pro tento účel vybral údaje pro výpočet prováděný v poledne, kdy se přesnost pohybuje v oblasti svého maxima. Současně jde o důležitý okamžik, kdy se plánuje energetické chování v druhé půlce dne. Násobící činitele ke vzniku krátkodobé předpovědi z měření osvitu ve 12 hodin prezentuje křivka na grafu 5.5.



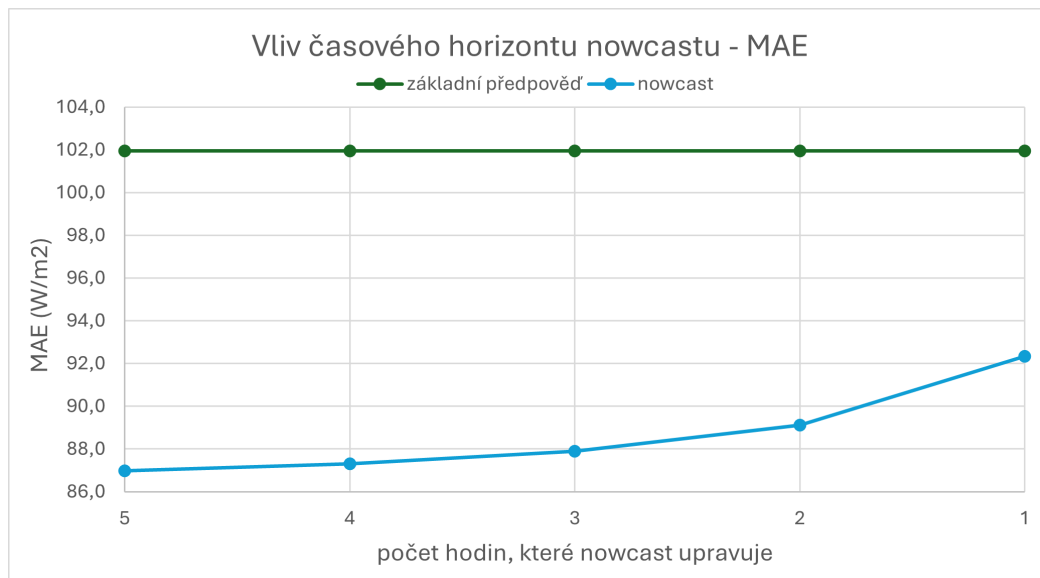
Obrázek 5.5. Váhovací křivka pro nowcast tvořený ve 12h.

Představený program má za cíl určit koeficienty, které minimalizují průměrnou odchylku nowcastu od následného měření. K úplnému dosažení kvality nově generované předpovědi patří i minimální chyba v celkovém odhadu. Jak se ukázalo, v tomto ohledu je možné váhovací křivku nastavit lépe. Zároveň jsem se dosud nezabýval otázkou ideální délky nowcast výhledu. Proto bylo ozkoušeno horizont zkracovat a ve zbylých časech brát hodnoty původní nezměněné předpovědi. Tím se zaručí stejný rozsah souboru dat, aby šly varianty mezi sebou porovnat. Výsledky až do výhledu nowcastu pouze na jednu hodinu prezentuje tabulka 5.4. Potvrdilo se, že průměrná odchylka vyjádřená pomocí MAE roste se zkracujícím se dosahem nowcastu. Kdyby tomu tak nebylo, měl by navržený program sám vyhodnotit, že nejlepší koeficient pro pozdější hodiny je nulový. Nicméně nárůst MAE není významný, z čehož lze usuzovat, že nowcast v pozdějších časech přispívá ke zlepšení kvality předpovědi jen malým dílem. Naopak celková chyba odhadu v podání MBE až do 2 hodin s krátkým se dosahem klesá. Neexistuje jasné rozložení, jak posoudit význam kritérií MAE a MBE na úkor sebe, protože to závisí na parametrech přidruženého energetického řízení. Vzhledem k tomu, že pokles u MBE je do velikosti významnější a že přínos delšího nowcastu ani z hlediska MAE není značný, osobně bych se přikláněl k preferování nowcastu v kratším časovém rozsahu. Každopádně z výsledků vychází, že na kvalitu nowcastu má vliv především přesnost v prvních dvou hodinách.

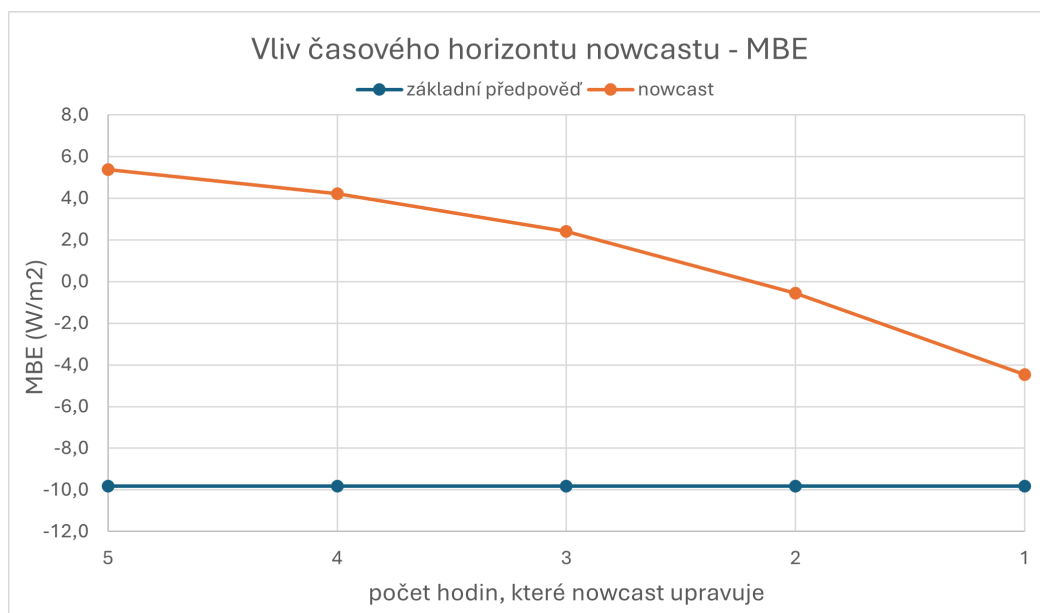
Pro lepší přehled uvádím rovněž grafy 5.6 a 5.7, které závislost MAE a MBE na zkracujícím se délce nowcastu ilustrují.

Počet ovlivněných hodin	Základní předpověď		Nowcast	
	MBE (W/m ²)	MAE (W/m ²)	MBE (W/m ²)	MAE (W/m ²)
5	-9,8	102,0	5,4	87,0
4	-9,8	102,0	4,2	87,3
3	-9,8	102,0	2,4	87,9
2	-9,8	102,0	-0,6	89,1
1	-9,8	102,0	-4,5	92,3

Tabulka 5.4. Vliv časového horizontu na celkovou přesnost předpovědi.



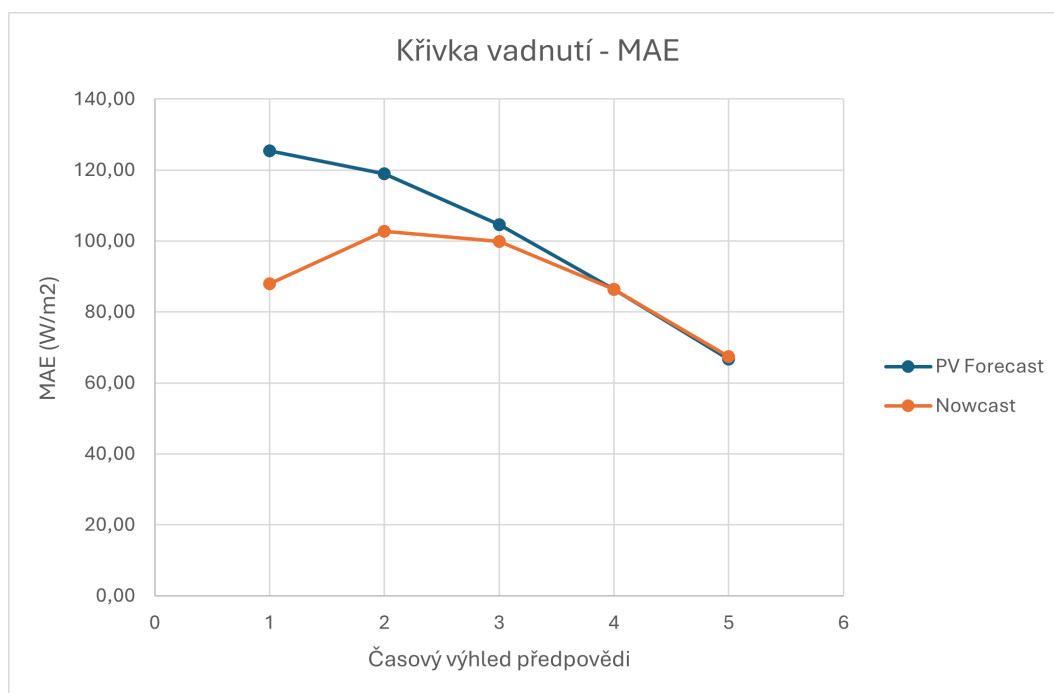
Obrázek 5.6. Nowcast 12h – závislost MAE se zkracujícím se horizontem.



Obrázek 5.7. Nowcast 12h – závislost MBE se zkracujícím se horizontem.

5.2.4 Vadnutí přesnosti

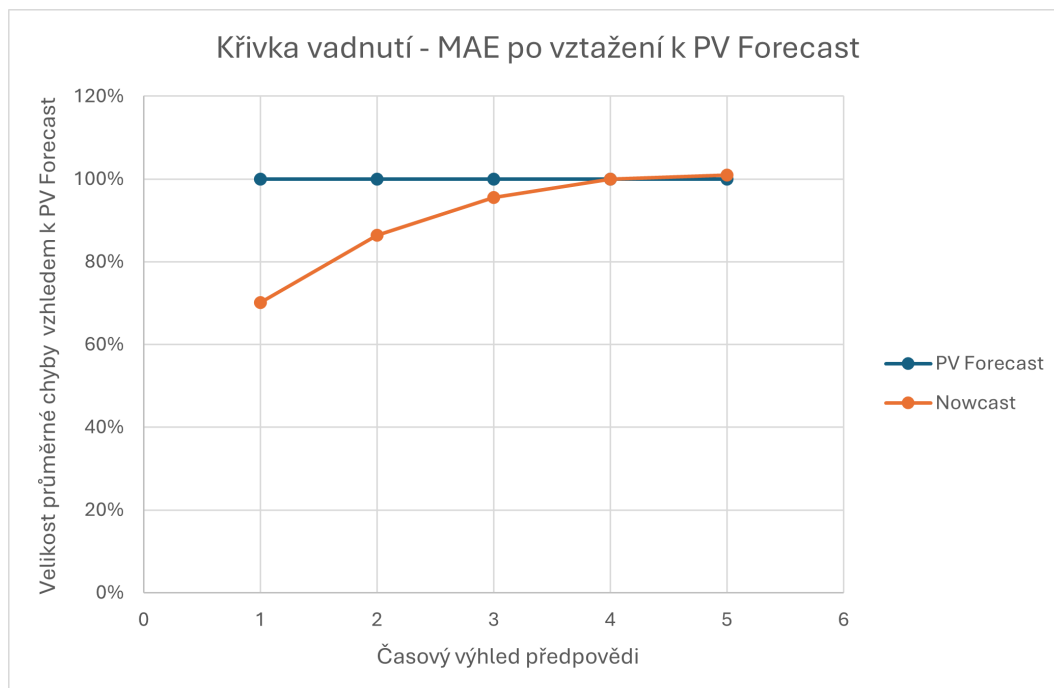
Nakonec bylo ověřeno vadnutí přesnosti v celém rozsahu produkovaných krátkodobých předpovědí. Na rozdíl od výše uvedeného rozboru pro jednu křivku zde byla použita pouze metrika MAE. Vadnutí lze rozumět jako snižování přesnosti odhadu se zvětšujícím se časovým výhledem, a tedy menší závislostí budoucího ozáření na současném měření. Jednotlivé časové horizonty jsou proto hodnoceny odděleně napříč všemi váhovacími křivkami. V příloze 3 se nalézá napsaný program, který dokáže míru odchylky v jednotlivých výhledech spočítat. Pro správné porozumění se jistě hodí porovnání se základní předpovědí PV Forecast. Na grafu 5.8 je vidět vývoj průměrné odchylky s narůstajícím počtem hodin od momentu předpovídání.



Obrázek 5.8. Vadnutí nowcastu – nárůst chyby se vzdáleností předpovídání momentu.

Proměnná chyba, která navíc se vzdáleností klesá, je způsobena omezením tvorby nowcastu na interval 9–14 hodin. Do horizontu 5 hodin pak v součtu spadne mnohem více menších odchylek, protože i hodnoty ozáření jsou nízké. Naopak výhled na 1 hodinu vychází na časy blízké poledni, kdy je možné očekávat nejvyšší hodnoty ozáření. Přesto lze sledovat, že nowcast v prvních okamžicích dopadá lépe, chyba se zmenšuje, zatímco na konci své platnosti už dosahuje shodných výsledků se základní předpovědí. Přibližování přesnosti k PV Forecast může být částečně způsobeno snižujícími se koeficienty váhovacích křivek, to by však nikdy nevedlo k naprostému sloučení.

Aby se vliv klesajícího osvětlení eliminoval, vztáhl jsem vypočtené vadnutí k odchylce základní předpovědi. Pro každý časový horizont tak vznikl poměr, kde 100 % chyba odpovídá kvalitě PV Forecast. Z níže uvedeného grafu 5.9 je zřejmé, že nowcast z měření na 4 a více hodin dopředu už předpověď nevylepší.



Obrázek 5.9. Vadnutí nowcastu vzhledem k přesnosti PV Forecast.

5.3 Ekonomický přínos

Predikce výkonu PV Forecast pomáhá energetickému řízení budov s domovní instalací FV zdroje, které zpravidla obsahují akumulční stanici. Ta je dodávána spolu s nezbytnou řídicí elektronikou. V kombinaci s dynamickou cenou elektrické energie může přesnost predikce ovlivňovat míru ekonomického přínosu řídicího systému.

Cílem následující analýzy je zhodnotit vliv přesnosti predikce na ekonomiku systému v kontextu různých typů koncových spotřebitelů a fotovoltaických systémů. Pro větší obecnost byly vybrány 3 odlišné domácnosti z hlediska spotřeby, typu a výkonu FV instalace. Každá z budov je označena místem, kde se nachází, a číslem, pod kterým je vedena v databázi PV Forecast. Dále doplňuji informace o celkové roční spotřebě, instalovaném výkonu, sklonu a azimutu panelů.

Označení	Celková spotřeba	Instalovaný výkon (kWp)	Sklon	Azimut
Omice id 7	14 MWh/rok	5 / 5 / 5,4	22°/22°/15°	80°/260°/350°
Jeseník id 9	19 MWh/rok	4 / 2 / 2	35°	45°/133°/316°
Jeseník id 61	11 MWh/rok	8,2 / 1,6	45°/20°	345°

Tabulka 5.5. Přehled hodnocených budov.

Dům Omice id 7 je postavený v pasivním standardu, svůj chod nechává značně podřízen funkcionalitě energetického systému. Část střešní FV instalace je v kombinaci orientací východ–západ, čímž jde naproti souběhu výroby a spotřeby generované energie.

Příklad s označením Jeseník id 9 lze považovat za celkem klasický, ale plně elektrifikovaný rodinný dům, čemuž odpovídá vyšší roční spotřeba. Fotovoltaický systém byl podřízen estetickému hledisku, byly zvoleny fotovoltaické střešní tašky odpovídající konceptu BIPV (Building-integrated photovoltaics). Tzv. solární tašky zatím nedosahují účinnosti běžných FV panelů.

Dům Jeseník id 61 pak představuje plně elektrifikovanou domácnost se střední roční spotřebou. Střešní fotovoltaická instalace má orientaci na jih.

Všechny zmíněné budovy jsou vybaveny akumulční stanicí typu HES (Home Energy Storage) o kapacitě 40 kWh. Ta integruje fotovoltaický střídač a nadřazené prediktivní řízení, které umožňuje v závislosti na aktuálních operativních podmínkách a dynamickém signálu ceny elektrické energie nabíjení baterie, kompenzaci spotřeby a dodávku energie do sítě. Základní rozvrh řízení probíhá v hodinových krocích.

V analýze porovnávám ekonomický důsledek řízení podle předpovědi PV Forecast a navrženého nowcastu. Dále sleduji, jaký vliv by měla předpověď, kdyby byla naprosto přesná. V takovém případě jsou vstupem simulace naměřená data. Pro srovnání přikládám i výsledek, který odpovídá převzatému měření z předchozího dne. Poslední varianta odpovídá referenci, která se používá k hodnocení předpovědních modelů. Neukáže sice celý přínos predikce, protože sama představuje do jisté míry také předpověď, ale každý složitější model by měl dosahovat lepších výsledků.

Výpočet finančních toků byl proveden v simulačním programu, který má UCEEB za tímto účelem k dispozici. Analyzovaným stavem byly podmínky pro rok 2023, kterým zároveň odpovídalo měření a predikce. Na následujících obrázcích s výsledky (5.10 – 5.12) uvádím simulovanou výši faktur za jednotlivé měsíce.

Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Reference (den zpět)	7 846 Kč	6 352 Kč	3 855 Kč	3 039 Kč	764 Kč	422 Kč	726 Kč	622 Kč	414 Kč	2 572 Kč	4 790 Kč	5 824 Kč
PV Forecast	7 868 Kč	6 404 Kč	3 840 Kč	3 000 Kč	799 Kč	454 Kč	749 Kč	619 Kč	428 Kč	2 604 Kč	4 733 Kč	5 846 Kč
Nowcast	7 809 Kč	6 369 Kč	3 840 Kč	3 007 Kč	744 Kč	450 Kč	725 Kč	597 Kč	422 Kč	2 546 Kč	4 737 Kč	5 855 Kč
Přesná předpověď	7 794 Kč	6 341 Kč	3 823 Kč	2 991 Kč	758 Kč	412 Kč	723 Kč	602 Kč	398 Kč	2 495 Kč	4 741 Kč	5 844 Kč

Obrázek 5.10. Omnice id 7 – částky za elektrickou energii dle simulace.

Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Reference (den zpět)	14 788 Kč	13 761 Kč	8 978 Kč	7 174 Kč	1 199 Kč	2 515 Kč	1 458 Kč	2 473 Kč	2 387 Kč	3 921 Kč	7 172 Kč	11 104 Kč
PV Forecast	14 818 Kč	13 756 Kč	8 948 Kč	7 181 Kč	1 160 Kč	2 524 Kč	1 457 Kč	2 475 Kč	2 375 Kč	3 946 Kč	7 188 Kč	11 091 Kč
Nowcast	14 806 Kč	13 755 Kč	8 939 Kč	7 182 Kč	1 164 Kč	2 515 Kč	1 457 Kč	2 473 Kč	2 375 Kč	3 916 Kč	7 179 Kč	11 098 Kč
Přesná předpověď	14 784 Kč	13 761 Kč	8 955 Kč	7 176 Kč	1 142 Kč	2 514 Kč	1 456 Kč	2 469 Kč	2 376 Kč	3 910 Kč	7 181 Kč	11 081 Kč

Obrázek 5.11. Jeseník id 9 – částky za elektrickou energii dle simulace.

Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Reference (den zpět)	9 194 Kč	6 695 Kč	2 246 Kč	1 805 Kč	97 Kč	-1 580 Kč	-1 733 Kč	-1 679 Kč	-1 895 Kč	-642 Kč	2 798 Kč	5 310 Kč
PV Forecast	9 341 Kč	6 527 Kč	2 302 Kč	1 591 Kč	107 Kč	-1 590 Kč	-1 730 Kč	-1 595 Kč	-1 915 Kč	-791 Kč	2 949 Kč	5 345 Kč
Nowcast	9 218 Kč	6 598 Kč	2 155 Kč	1 561 Kč	60 Kč	-1 617 Kč	-1 747 Kč	-1 628 Kč	-1 891 Kč	-801 Kč	2 767 Kč	5 338 Kč
Přesná předpověď	9 084 Kč	6 544 Kč	2 150 Kč	1 533 Kč	16 Kč	-1 618 Kč	-1 730 Kč	-1 669 Kč	-1 921 Kč	-879 Kč	2 737 Kč	5 278 Kč

Obrázek 5.12. Jeseník id 61 – částky za elektrickou energii dle simulace.

Pro lepší ilustraci přidávám rozdíl v částkách při řízení podle jednotlivých variant. Rozdíl v platbách forecast—nowcast představuje úsporu, která nastane aplikací navrženého nowcastu. Rozdíl nowcast—measured dále vyčísluje ztráty, které zůstanou kvůli nepřesnosti předpovědi. Výsledky jsou zachyceny do tabulek na obrázcích 5.13 – 5.15. Klíčový údaj, jak nowcast ovlivní faktury za elektřinu prezentuji rovněž formou grafu.

Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Celkem
reference – forecast	-22 Kč	-52 Kč	15 Kč	39 Kč	-35 Kč	-32 Kč	-23 Kč	3 Kč	-13 Kč	-31 Kč	57 Kč	-21 Kč	-116 Kč
forecast – nowcast	60 Kč	35 Kč	0 Kč	-7 Kč	55 Kč	4 Kč	23 Kč	22 Kč	6 Kč	58 Kč	-4 Kč	-10 Kč	242 Kč
nowcast – measured	15 Kč	28 Kč	18 Kč	16 Kč	-14 Kč	38 Kč	2 Kč	-4 Kč	24 Kč	51 Kč	-3 Kč	12 Kč	181 Kč

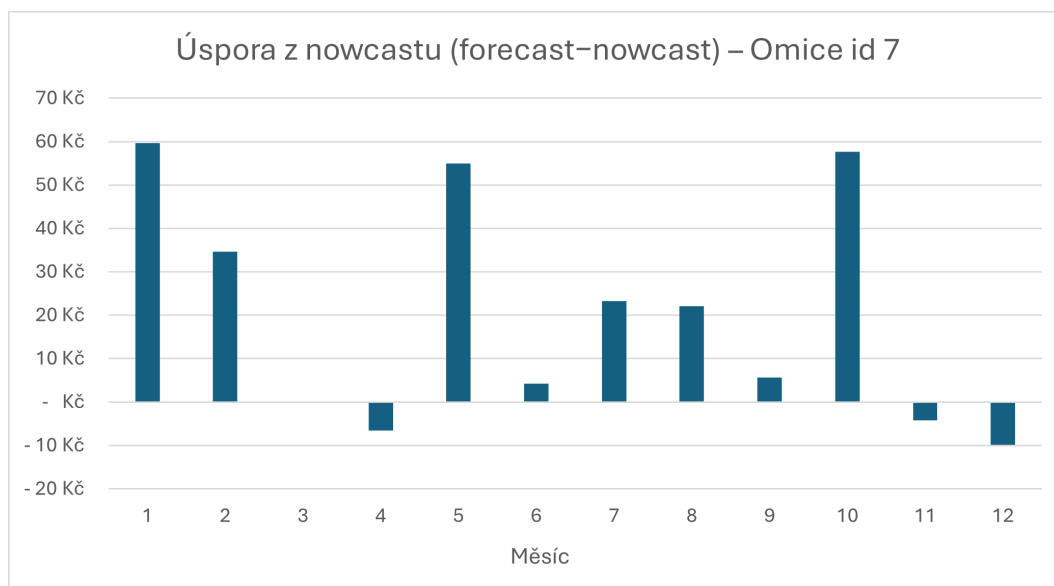
Obrázek 5.13. Omice id 7 – rozdíl v platbách při řízení podle uvedených předpovědí.

Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Celkem
reference – forecast	-30 Kč	4 Kč	30 Kč	-7 Kč	39 Kč	-8 Kč	2 Kč	-2 Kč	12 Kč	-25 Kč	-16 Kč	14 Kč	12 Kč
forecast – nowcast	12 Kč	1 Kč	9 Kč	-2 Kč	-4 Kč	9 Kč	-0 Kč	2 Kč	0 Kč	30 Kč	9 Kč	-8 Kč	59 Kč
nowcast – measured	22 Kč	-6 Kč	-16 Kč	6 Kč	22 Kč	1 Kč	0 Kč	4 Kč	-1 Kč	5 Kč	-2 Kč	18 Kč	53 Kč

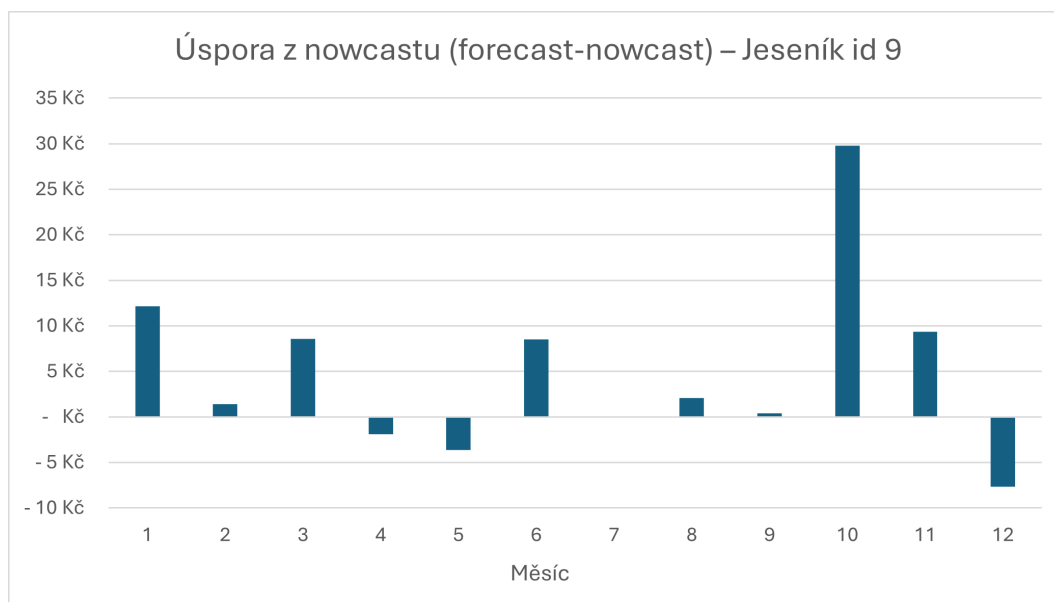
Obrázek 5.14. Jeseník id 9 – rozdíl v platbách při řízení podle uvedených předpovědí.

Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Celkem
reference – forecast	-147 Kč	168 Kč	-56 Kč	214 Kč	-10 Kč	10 Kč	-3 Kč	-84 Kč	19 Kč	149 Kč	-151 Kč	-35 Kč	76 Kč
forecast – nowcast	122 Kč	-71 Kč	147 Kč	30 Kč	47 Kč	27 Kč	16 Kč	33 Kč	-23 Kč	10 Kč	182 Kč	8 Kč	527 Kč
nowcast – measured	134 Kč	54 Kč	5 Kč	28 Kč	45 Kč	1 Kč	-17 Kč	41 Kč	29 Kč	78 Kč	30 Kč	60 Kč	489 Kč

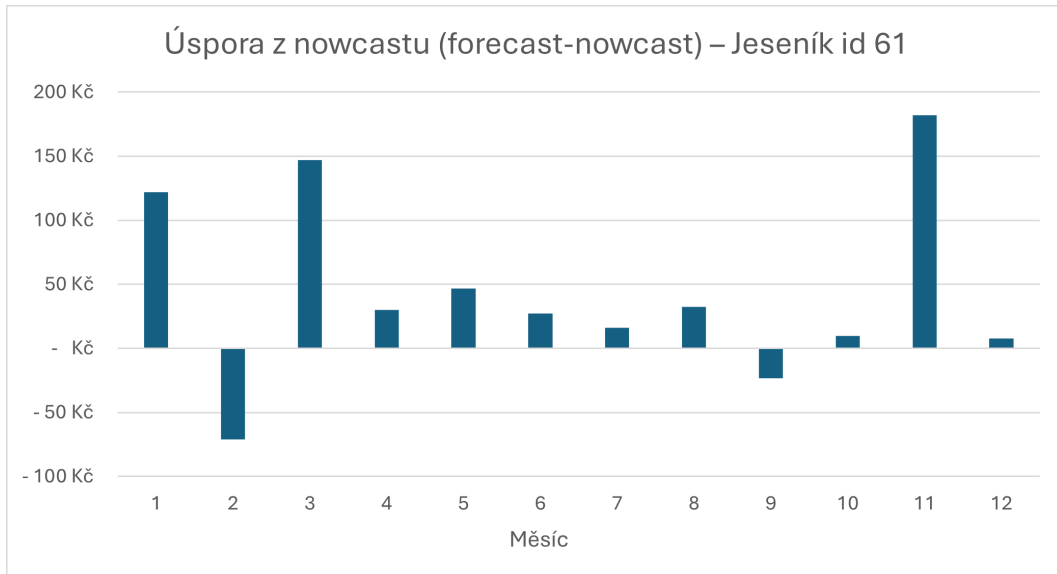
Obrázek 5.15. Jeseník id 61 – rozdíl v platbách při řízení podle uvedených předpovědí.



Obrázek 5.16. Ekonomický přínos nowcastu (Omice id 7).



Obrázek 5.17. Ekonomický přínos nowcastu (Jeseník id 9).



Obrázek 5.18. Ekonomický přínos nowcastu (Jeseník id 61).

Jak je z výsledků simulace patrné, vliv přesnosti předpovědi osvitu se pohybuje v poměrně malých částkách. Přínos nowcastu proto dosahuje řádu stokorun, ačkoli dokáže snížit ztráty zapříčiněné nepřesnostmi predikce přibližně o polovinu ve všech případech. Souvisí to i s velikostí baterie, která má oproti srovnatelným instalacím prováděným jinými společnostmi relativně velkou kapacitu. Řízení se také opírá o očekávanou spotřebu a cenu energie na trhu, zatímco predikce výkonu má jen dílčí vliv.

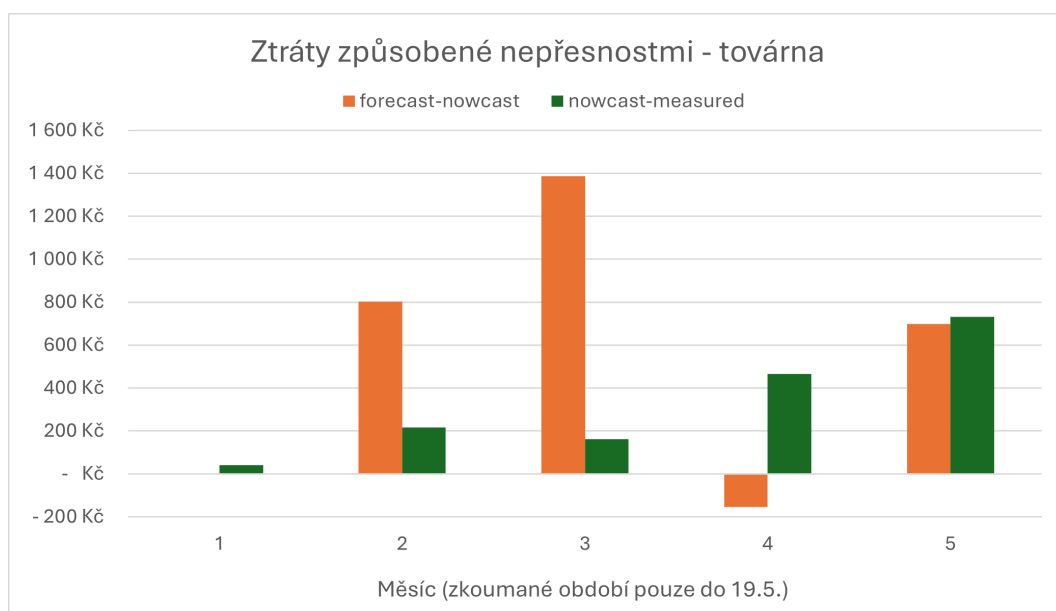
Lze si povšimnout, že varianta řízení podle nowcastu dopadá v některých případech líp než řízení podle přesné předpovědi, která odpovídá měření. Tento nesoulad s největší pravděpodobností vzniká v důsledku neurčitosti ceny energie, která zůstává uskladněna v baterii na konci predikčního okna. Každopádně v součtu za celé období platí, že se nowcast výsledku přesné předpovědi osvitu nevyrovná.

Při pohledu na výsledky budov jasně vyplývá, že u domu s velkou spotřebou a slabší FVE je vliv kvality předpovědi na finanční přínos menší než ve zbylých dvou případech. Predikce výkonu pak totiž není pro plánování energetických režimů tak významná. Ani zavedení nowcastu proto zásadní benefit nepřidá, nepřinesla by ho dokonce ani dokonalá předpověď.

Analýzu dále rozšiřuji o průmyslový objekt, který slibuje větší úspory, než je tomu v případě uvedených rodinných domů. Zároveň poslouží k ověření důsledku nowcastu, pokud je proveden přímo na predikci výkonu, nikoliv osvitu. Simulace se realizuje na průmyslovém areálu v Jeseníku, data z chodu jsou však k dispozici pouze od ledna 2024. Proto může být výpočet do jisté míry neobjektivní, jelikož nezahrnuje celý průběh roku. Podnik měl za sledované období spotřebu 750 MWh, v zajištění dodávek elektřiny mu pomáhá FVE o instalovaném výkonu 800 kWp a bateriové úložiště o kapacitě přesahující 2MWh. V následující tabulce uvádím kromě výsledků simulace i zpracované rozdíly srovnávaných variant.

Měsíc	1	2	3	4	5 (do 19.5.)	Celkem
PV Forecast	624 414 Kč	420 587 Kč	314 047 Kč	207 933 Kč	29 130 Kč	1 596 112 Kč
Nowcast	624 411 Kč	419 784 Kč	312 661 Kč	208 087 Kč	28 432 Kč	1 593 374 Kč
Přesná predikce	624 372 Kč	419 568 Kč	312 500 Kč	207 621 Kč	27 701 Kč	1 591 763 Kč
forecast – nowcast	3 Kč	803 Kč	1 386 Kč	-154 Kč	699 Kč	2 737 Kč
nowcast – measured	39 Kč	215 Kč	161 Kč	466 Kč	730 Kč	1 612 Kč

Obrázek 5.19. Simulace ekonomického přínosu pro průmyslový areál.



Obrázek 5.20. Finanční ztráty způsobené nepřesnostmi nowcast předpovědi, zlepšení oproti PV Forecast.

V případě takto velkého areálu už ztráty způsobené nepřesnostmi předpovědi výkonu dosahují řádu tisíců Kč. Snížení těchto ztrát, kterého je možné dosáhnout nowcastem, se stále drží nad 50 %. Zároveň škody kvůli nedokonalostem predikce představují jen malý díl z celkových nákladů na elektřinu. Vycházejí na méně než 1 % faktury, zatímco v případě domu s označením Jeseník id 61 to bylo například 2,5 %. Přesto lze považovat tento případ oproti rodinným domům za zajímavější, protože se stává zpřesňování predikce v podobě nowcastu návratným. Navíc lze softwarový postup snadno replikovat.

Na všech zkoumaných lokalitách se nacházela poměrně velká akumulční zařízení, což vychází z konceptu dodávaného řešení. Domnívám se, že kvalita předpovědi osvitu by dosáhla většího vlivu v případě, že by kapacita baterie byla nižší. Docházelo by pak rychleji k jejímu naplnění, a proto by více záleželo na správném načasování jejího nabíjení a vybití. V případě uplatnění nowcastu by šlo sledovat větší přínos ze snížení ztrát způsobených nepřesnostmi.

Kapitola 6

Závěr

V této práci jsem se zabýval předpovědí slunečního ozáření pro účely fotovoltaických systémů. Hlavní pozornost byla věnována krátkodobé předpovědi, tzv. nowcastingu, která upravuje jen několik hodin dopředu. Součástí práce je navržený nowcast systém z měřeného osvitu pro předpověď PV Forecast. Python skript na výpočet násobících koeficientů odchylky měření je uložen v příloze této práce.

Z analýzy nowcastu vyplynulo, že má smysl jej tvořit jen v rozmezí 9–14 hod. Odchylka v dřívějších ranních hodinách totiž dosahuje příliš velkých hodnot, než aby šlo jejím násobením získat relevantní úpravu předpovědi pro další hodiny. Naopak později večer se po velkou část roku trvání osvitu neočekává, případně jsou hodnoty malé a těžko odhadnutelné.

Rovněž byla zkoumána ztráta přesnosti s narůstajícím horizontem nowcastu. Program na výpočet křivky vadnutí tvoří přílohu této práce. Ukázalo se, že největší význam má nowcast na první dvě hodiny. Od výhledu 4 hodin dál už základní předpověď, z které vychází, nezlepšuje, a proto se jeho tvorba nevyplatí.

V další části jsem se věnoval ekonomickému přínosu předpovědi při energetickém řízení. Simulace byla provedena na třech rodinných domech lišících se z hlediska spotřeby, typu a kvality FV systému, a následně rozšířena o průmyslový areál s větší instalací FVE. Ztráty, které vzniknou vlivem nepřesností predikce, jsou poměrně malé. V případě rodinných domů se pohybují v řádu stokorun za rok, u velkého areálu se pak jedná o tisíce. Aplikace nowcastu snižuje tyto ztráty přibližně o 50 % bez ohledu na výkon FV systému a jeho celkový vliv na energetické řízení budovy.

V případě průmyslového podniku bylo vyzkoušeno použít nowcast přímo na predikci výkonu FV zdroje. Ověřil se tak dopad, který má přepočtený z osvitu. Jeho součástí je i správný odhad účinnosti konverze v jednotlivých krocích a přizpůsobení lokálním podmínkám včetně zastínění. Nicméně se nezdá, že by provedení nowcastu přímo na predikovaném výkonu mělo lepší účinek.

Všechna zkoumaná místa disponují poměrně velkými akumulacími stanicemi, což vychází z konceptu dodávaného řešení. Domnívám se, že ekonomický vliv přesnosti předpovědi by byl výraznější, kdyby kapacita úložiště byla nižší, a tak došlo rychleji k jeho naplnění. Omezení také pramení z režimů, v nichž se odehrává energetické řízení. Zároveň do výpočtu určitou nejistotu vnáší zbytková energie uložená v baterii na konci predikčního okna, jejíž cena se v čase dynamicky mění.

V práci se nepodařilo charakterizovat váhovací křivku pro krátkodobou předpověď ze sky-imageru. Důvodem byla chybějící data o jeho provozu. Principiálně by se však dal využít postup navržený pro nowcast z měřeného osvitu a Python skript na výpočet váhovacích koeficientů, který je přílohou této práce.

V budoucnu by bylo vhodné ověřit vliv předpovědi na budovách, které mají vzhledem k vlastní spotřebě menší kapacitu akumulacího zařízení. Současně by se mělo rozšířit sledování u průmyslového areálu na delší časový úsek a optimálně do simulace zařadit i další objekty výrazné z hlediska výkonu FV zdroje.

Literatura

- [1] SENGUPTA, Manajit, Aron HABTE, Stefan WILBERT, Christian GUEYMARD a Jan REMUND. *Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications: Third Edition*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5D00-77635, 2021. Dostupné na <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/77635.pdf>.
- [2] MATUŠKA, Tomáš. *Solární zařízení v příkladech. Stavitel*. Praha: Grada, 2013. ISBN 978-80-247-3525-2.
- [3] DULLEMOND, Cornelis P. *Basics of radiation transfer theory*. Zentrum für Astronomie, Beobachtende Astronomie (MKEP5), Lectures, cit. 05/2024. Dostupné na https://www.ita.uni-heidelberg.de/~dullemond/lectures/obsastro_2010/Chapter_RadTrans.pdf.
- [4] *Irradiance and Weather Data: How Solcast generates irradiance and weather data* [Solcast]. Dostupné na <https://solcast.com/irradiance-data-methodology>. cit. 05/2024.
- [5] *Sky-Imager* [PV Forecast, UCEEB]. Dostupné na <https://wp2.pvforecast.cz/sky-imager/>. cit. 05/2024.
- [6] HAUPT, Sue Ellen. *A Public-Private-Acadmic Partnership to Advance Solar Power Forecasting*. The National Center for Atmospheric Research, United States, 2016. Dostupné na DOI 10.2172/1408392. Dostupné na <https://www.osti.gov/biblio/1408392/>.
- [7] *Optical flow* [Wikipedia, The Free Encyclopedia]. Dostupné na https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Optical_flow&oldid=1219146222. cit. 05/2024.
- [8] KRISHNAN, Naveen, K. Ravi KUMAR a Chandrapal Singh INDA. How solar radiation forecasting impacts the utilization of solar energy: A critical review. *Journal of Cleaner Production*. 2023, ročník 388, s. 135860. ISSN 0959-6526. Dostupné na DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135860>.
- [9] NOURI, Bijan, Niklas BLUM, Stefan WILBERT a Luis F. ZARZALEJO. A Hybrid Solar Irradiance Nowcasting Approach: Combining All Sky Imager Systems and Persistence Irradiance Models for Increased Accuracy. *Solar RRL*. 2022, ročník 6, s. 2100442. Dostupné na DOI <https://doi.org/10.1002/solr.202100442>.
- [10] SONG, Jifeng, Zixuan YAN, Yisen NIU, Lianglin ZOU a Xilong LIN. Cloud detection method based on clear sky background under multiple weather conditions. *Solar Energy*. 2023, ročník 255, s. 1-11. ISSN 0038-092X. Dostupné na DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.03.026>.
- [11] CHENG, Lilin, Haixiang ZANG, Anupam TRIVEDI, Dipti SRINIVASAN, Tao DING, Zhinong WEI a Guoqiang SUN. Prediction of Non-Stationary Multi-Head Cloud Motion Vectors for Intra-Hourly Satellite-Derived Solar Power Forecasting. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2024, ročník 39, č. 2, s. 4010-4019. Dostupné na DOI 10.1109/TPWRS.2023.3284559.

- [12] BOTCHKAREV, Alexei. Performance Metrics (Error Measures) in Machine Learning Regression, Forecasting and Prognostics: Properties and Typology. *ArXiv*. 2018, č. abs/1809.03006. Dostupné na DOI <https://doi.org/10.48550/arXiv.1809.03006>. Dostupné na <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1809/1809.03006.pdf>.
- [13] DAVID, Mathieu, Hadja DIAGNE a Philippe LAURET. Outputs and error indicators for solar forecasting models. 2012. Dostupné na https://www.researchgate.net/publication/281418177_Outputs_and_error_indicators_for_solar_forecasting_models.
- [14] LORENZ, Elke, Jan REMUND, Stefan MÜLLER, Wolfgang TRAUNMÜLLER, Gerald STEINMAURER, D. POZO-VAZQUEZ, Jose RUIZ-ARIAS, Vicente LARA FANEGO, L. SANTIGOSA, Martín GASTÓN, Christian KURZ, Luis MARTÍN POMARES a Carlos GEIJO. Benchmarking of different approaches to forecast solar irradiance. *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. 2009. Dostupné na https://www.researchgate.net/publication/267953152_Benchmarking_of_different_approaches_to_forecast_solar_irradiance.
- [15] ZHANG, Jie, Bri-Mathias HODGE, Siyuan LU, Hendrik F. HAMANN, Brad LEHMAN, Joseph SIMMONS, Edwin CAMPOS, Venkat BANUNARAYANAN, Jon BLACK a John TEDESCO. Baseline and target values for regional and point PV power forecasts: Toward improved solar forecasting. *Solar Energy*. 2015, ročník 122, s. 804-819. ISSN 0038-092X. Dostupné na DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.09.047>.
- [16] *optical depth* [Oxford Reference]. Dostupné na <https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110810105528809>. cit. 05/2024.
- [17] PASCHOTTA, R. *Optical Thickness* [RP Photonics Encyclopedia]. Dostupné na DOI 10.61835/wb8. Dostupné na https://www.rp-photonics.com/optical_thickness.html. cit. 05/2024.
- [18] LYU, Baolei, Yang CHEN, Yuqiu GUAN, Tianlei GAO a Jun LIU. Estimating Geo-Referenced Cloud-Base Height With Whole-Sky Imagers. *Earth and Space Science*. 2021, ročník 8, s. e2019EA000944. Dostupné na DOI <https://doi.org/10.1029/2019EA000944>.
- [19] *Ceilmeter* [Wikipedia, The Free Encyclopedia]. Dostupné na <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ceilmeter&oldid=1188213632>. cit. 05/2024.
- [20] KUHN, Pascal, Bijan NOURI, Stefan WILBERT, Christoph PRAHL, Nora KOZONEK, Thomas SCHMIDT, Zeyad YASSER, Lourdes RAMIREZ, Luis ZARZALEJO, Angela MEYER, Laurent VUILLEUMIER, Detlev HEINEMANN, Philippe BLANC a Robert PITZ-PAAL. Validation of an all-sky imager-based nowcasting system for industrial PV plants. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2018, ročník 26, č. 8, s. 608-621. Dostupné na DOI <https://doi.org/10.1002/pip.2968>.
- [21] WOLF, Petr. Předpověď výroby fotovoltaických systémů. *TZB-info*. 2017. Dostupné na <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/15928-predpoved-vyroby-fotovoltaickych-systemu>.
- [22] CIPRA, Tomáš. *Analýza časových řad s aplikacemi v ekonomii*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1986.
- [23] VANDEPUT, Nicolas. Forecast KPIs: RMSE, MAE, MAPE and Bias. *Towards Data Science*. 2019. Dostupné na <https://towardsdatascience.com/forecast-kpi-rmse-mae-mape-bias-cdc5703d242d>.
- [24] MANU, Joseph. Forecast Error Measures: Understanding them through experiments. *Towards Data Science*. 2020. Dostupné na <https://towardsdatascience.com/forecast-error-measures-understanding-them-through-experiments>.

com/forecast-error-measures-understanding-them-through-experiments-da7ddcb0b035.

- [25] BAMBUŠEK, Zbyněk. *Zpřesnění predikce slunečního osvětlení pomocí umělých neuronových sítí. Diplomová práce*. Praha: ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 2017. Dostupné na <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/76537/F3-DP-2017-Bambusek-Zbynek-PredOsvitu.pdf>.
- [26] WILLMOTT, Cort J. a Kenji MATSUURA. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*. Inter-Research Science Center, 2005, ročník 30, č. 1, s. 79–82. ISSN 0936577X, 16161572. Dostupné na <http://www.jstor.org/stable/24869236>.