

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA APLIKOVANÉ GEOINFORMATIKY A ÚZEMNÍHO PLÁNOVÁNÍ

Porovnání solárního potenciálu vypočteného
modely GIS s výkonem solárních panelů na střeše
rodinného domu

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

Bakalant: Anna Beková

Praha 2017

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Anna Beková

Aplikovaná ekologie

Název práce

Porovnání solárního potenciálu vypočteného modely GIS s výkonem solárních panelů na střeše rodinného domu

Název anglicky

Comparison of GIS-based solar radiation estimates with solar panels measured output on a building roof

Cíle práce

Cílem práce je posoudit přesnost zvoleného algoritmu pro výpočet solárního potenciálu.

- Vytvoření modelu střechy budovy
- Výpočet solárního potenciálu modelové budovy
- Srovnání modelovaného potenciálu s měřeným výkonem panelů

Metodika

Solární energie je považována za jeden z nejvýhodnějších obnovitelných zdrojů, který má minimální negativní dopady na životní prostředí. Stanovení solárního potenciálu střech v urbanizovaném území je v posledních letech předmětem studia mnoha vědeckých prací. Zejména díky rostoucí dostupnosti přesných modelů terénu a vhodných nástrojů GIS. Řešitelka zpracuje literární rešerši z oblasti modelování solárního potenciálu, přičemž se zaměří na existující modely a kvalitu vstupních dat. Z měřených dat vytvoří digitální model střechy vybrané budovy a vypočítá její solární potenciál (např. s využitím algoritmu Area Solar Radiation). Vypočtené hodnoty srovná s dostupným měřením výkonu instalovaných solárních panelů.

Doporučený rozsah práce

30 – 40 stran

Klíčová slova

Formulace klíčových slov je úkolem autora.

Doporučené zdroje informací

- Dubayah, R., & Rich, P. M. (1995). Topographic solar radiation models for GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9(4), 405-419.
- Fogl, M., & Moudrý, V. (2016). Influence of vegetation canopies on solar potential in urban environments. *Applied Geography*, 66, 73-80.
- Freitas, S., Catita, C., Redweik, P., & Brito, M. C. (2015). Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 915-931.
- Kodysh, J. B., Omitaomu, O. A., Bhaduri, B. L., and Neish B. S., 2013. Methodology for estimating solar potential on multiple building rooftops for photovoltaic systems. *Sustainable Cities and Society* 8, 31-41.
- Sivek, M., Kavina, P., Jirásek, J. and Malečková, V., 2012. Czech Republic and indicative targets of the European Union for electricity generation from renewable sources. *Energy Policy* 44, 469-475.
- Zink, R., Camargo, L. R., Reidelstürz, P., & Dorner, W. (2015). Photogrammetric point clouds for GIS-based high-resolution estimation of solar radiation for roof-top solar systems. In *Surface Models for Geosciences* (pp. 293-305). Springer International Publishing.

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Elektronicky schváleno dne 5. 4. 2017

doc. Ing. Petra Šímová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 5. 4. 2017

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 17. 04. 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, pod vedením Ing. Vítězslava Moudrého, Ph.D., a že jsem uvedla veškeré literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

V Praze dne:

Podpis:

Poděkování

Děkuji Ing. Vítězslavu Moudrému, Ph.D za vedení mé bakalářské práce, za rady a konzultace. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Josefovi Novotnému za poskytnutí dat a podrobností o solární elektrárně a Ing. Janu Komárkovi za pomoc při náletu lokality. V neposlední řadě také rodině a přátelům, kteří mi poskytovali oporu.

Abstrakt

Sluneční záření je všudypřítomná a technologicky snadno využitelná forma energie. Existuje mnoho studií zabývajících se identifikací vhodných míst pro instalaci solárních systémů v zastavěném území. Málo z nich se ale věnovalo ověření modelovaného solárního potenciálu. Nejčastěji je k ověření přesnosti solárních modelů využíván pyranometr. Cílem této bakalářské práce je porovnání výsledků solárních modelů s elektrickou produkcí střešní fotovoltaické elektrárny ve Středočeském kraji. Digitální model střechy byl získán fotogrammetrií z fotografií shromážděných bezpilotním letounem. Množství solárního potenciálu bylo vypočteno modely Solar Analyst a r.sun. Studie prokázala, že oba modely odhad solárního potenciálu podhodnocují. Při práci se Solar Analyst je doporučeno specifikovat atmosférické parametry, neboť při jejich zanedbání dochází k vyššímu podhodnocení odhadu (10 % oproti 4.5 %). Naopak vlivem vstupujícího rozlišení nebyl model prakticky vůbec ovlivněn. Pro dosažení kompromisu mezi přesností a výpočetní dobou je doporučeno rozlišení 50 cm. V případě modelu r.sun použitého prostřednictvím databáze PVGIS se jednalo o podhodnocení 2.2 % pro parametry střechy a při optimalizaci sklonu a azimutu střechy dokonce o nadhodnocení 0.15%.

Klíčová slova: digitální model, fotovoltaický systém, SfM, Solar Analyst, PVGIS.

Abstract

Solar radiation is abundant and technologically available form of energy. Many studies focused on ways how to determine suitable places for installation of solar systems in urban zones. Only few of them verified the estimate with pyranometers. Aim of this bachelor thesis is to compare solar potential with electricity production from roof photovoltaic power plant in Central Bohemia in Czech Republic. Detailed digital elevation model (DEM) was generated thru photogrammetry which used photos derived by Unmanned Aerial Vehicle. Solar Analyst and r.sun models were used to calculate the amount of solar potential. Study proved that both solar models underestimate the solar potential. In case of Solar Analyst it is recommended to specify atmospheric parameters, because when default values are used, the undervaluation raise from 4.5 % to 10 %. Results also showed that Solar Analyst is not sensitive to resolution of the DEM. To reach a compromise between accuracy and computational time resolution of 50 cm is recommended. Model r.sun used through PVGIS undervalued solar potential significantly less, only by 2.2% for roof parameters and overvalued by 0.15% in case of their optimization.

Keywords: digital model, photovoltaic system, SfM, Solar Analyst, PVGIS.

Obsah

Seznam použitých zkratk a značek	8
1 Úvod	9
2 Cíle práce	10
3 Literární rešerše	11
3.1 Zdroje a spotřeba energie	11
3.2 Legislativa a podpora obnovitelných zdrojů	12
3.3 Sluneční záření	12
3.4 Modely solární radiace v prostředí GIS.....	14
3.4.1 Solar Analyst	14
3.4.2 r.sun	16
3.5 Zdroje prostorových informací	17
3.5.1 Fotogrammetrie	18
3.5.2 Structure from Motion	18
3.6 Stávající studie.....	19
4 Metodika	21
4.1 Charakteristika studijního území	21
4.2 Sběr a zpracování dat	22
4.3 Výpočet solárního potenciálu v prostředí ArcGIS	25
4.3.1 Atmosférické parametry	27
4.4 Výpočet solárního potenciálu serverem PVGIS	28
4.5 Elektrická produkce	30
4.6 Statistické zhodnocení	30
5 Výsledky	31
5.1 Výroba elektrické energie v zájmové oblasti	31
5.2 Vyhodnocení solárního potenciálu.....	32
5.2.1 Area Solar Radiation.....	32
5.2.2 PVGIS	34
5.1 Statistické zhodnocení	36
6 Diskuze.....	38
7 Závěr	40
Přehled literatury a použitých zdrojů	41
Seznam obrázků.....	44
Seznam tabulek.....	44

Seznam použitých zkratek a značek

ASR	Area Solar Radiation
DEM	Digital elevation model (digitální výškový model)
DMP	Digitální model povrchu
DMT	Digitální model terénu
FV	Fotovoltaický
GIS	Geografický informační systém
LIDAR	Light Detection And Ranging
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Národní úřad pro letectví a kosmonautiku)
NZÚ	Nová zelená úsporám
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
SfM	Structure from Motion
S-JTSK	Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální
WGS 84	World Geodetic System 1984 (Světový geodetický systém 1984)
∅	Průměr

1 Úvod

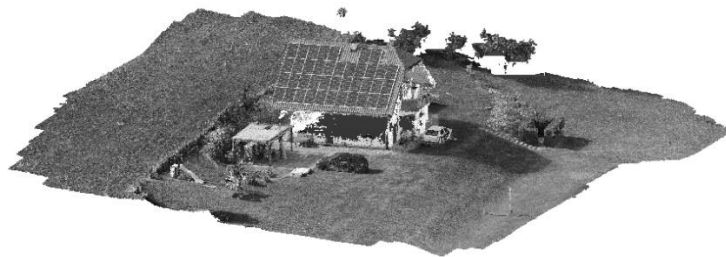
Světová spotřeba energie neustále roste, nového maxima opět dosáhla v posledním vyhodnoceném roce 2015 (British Petroleum, 2016). Stejně jako spotřeba energie, roste i počet obyvatel měst. Ty jsou v současné chvíli domovem téměř 80 % obyvatel Evropy, a proto je celková spotřeba elektrické energie koncentrována do měst (POLIS, 2012). Celkově jsou města zásobována 80 % světové elektrické energie a současně produkují přibližně 75 % celosvětových emisí uhlíku. To i přes to, že z celkového povrchu planety Země pokrývají pouze 3 % (UNEP, 2013).

Solární technologie je jednou z možností na výrobu lokální čisté energie (Agugiaro et al., 2012). Solární energie může být ve městě využita pasivně ve formě nízkoenergetických domů nebo aktivně díky solárním panelům. Lze rozlišit solární kolektory přeměňující solární energii na teplo a fotovoltaické (FV) systémy přeměňující solární energii na elektrickou energii (Marszal et al., 2011). Identifikace vhodných ploch v městských a venkovských oblastech hraje důležitou roli v plánování jak pro soukromého investora, tak i pro veřejnou komunitu. Fotovoltaické systémy musí být správně umístěny a orientovány v prostředí, aby maximálně využily potenciálu dané plochy (Agugiaro et al., 2012). Po celém světě proto vznikají mapy, založené na modelech pro výpočet solárního potenciálu ploch. Freitas et al. (2014) je rozdělují na modely výpočetní a modely počítačové. Aby bylo možné optimálně využít výhod solárních technologií, je důležité, aby prediktivní modely poskytovaly spolehlivé výsledky (Agugiaro et al., 2012).

Nejllepším přístupem k ověření výsledků modelu je použití pozemních dat buď z pyranometrů, tedy z přístrojů určených k měření globálního slunečního záření, nebo z instalovaných fotovoltaických systémů (Kodysh et al., 2013). Studie pro porovnání přesnosti výstupů modelů většinou využívají pyranometry (Agugiaro et al., 2012), (Fu et Rich, 1999), (Joint Research Centre, 2012), (Kodysh et al., 2013), (Ruiz-Arias et al., 2009). Studie evaluující výsledky modelů s FV panely, nebo hodnot FV panelů s pyranometry nebyly při zpracování literární rešerše nalezeny.

2 Cíle práce

Cílem této bakalářské práce je vytvořit digitální model střechy budovy a pomocí nástrojů geografického informačního systému vypočítat její solární potenciál. Modelovaný solární potenciál následně porovnat s naměřeným výkonem soukromé střešní fotovoltaické elektrárny ve Středočeském kraji a vyhodnotit použité solární modely. V následujících kapitolách je popsána základní charakteristika slunečního záření, modely solárního potenciálu a postupy použité k vyhodnocení cílů práce.



Prostorový model rodinného domu

3 Literární rešerše

3.1 Zdroje a spotřeba energie

Do Evropy je energie dovážena ze zemí mimo Evropskou unii a procento závislosti na těchto zemích je přes 50 % a stále roste. Proto je primárním zájmem Evropské rady úspora a lokální výroba energie. Pro rok 2020 si tedy Evropská Unie stanovila cíl 20 % zvýšení energetické účinnosti a 20 % podíl obnovitelných zdrojů na výrobě energie. Díky těmto opatřením by mělo dojít i ke splnění třetího cíle, kterým je 20 % snížení skleníkových plynů v porovnání s rokem 1990. V roce 2020 tyto snahy nekončí, naopak pro rok 2030 jsou stanovené ve formě 27–30 % energetické účinnosti, 27 % podílu obnovitelných zdrojů a 40 % redukci skleníkových plynů (Evropská rada, 2015).

Celosvětová výroba elektrické energie z obnovitelných zdrojů vzrostla v roce 2015 o 15.2 % a na celkové výrobě se tak podílela 6.7 %, což je více než trojnásobek hodnoty z období před deseti lety (v roce 2005 byla 2%). Nejvýznamnějším obnovitelným zdrojem po vodních elektrárnách zůstávají elektrárny větrné, které se na produkci elektřiny mezi zbylými obnovitelnými zdroji podílejí 52.2 %. Výroba elektřiny ze solárních elektráren vzrostla o 32.6 % a to zejména díky Číně, která tak překonala Spojené státy i Německo (British Petroleum, 2016).

V současné době solární energie tvoří jen velmi malou část vyrobené energie, ale jak uvádí Freitas et al. (2014), díky rychlému technologickému pokroku zařízení využívajících sluneční záření, klesající pořizovací ceně těchto zařízení a vzrůstajícímu pochopení společnosti bude využití solární radiace hrát důležitou roli v budoucnosti energetiky. Rozšíření evropského trhu s energií z obnovitelných zdrojů značně snížilo náklady na obnovitelné technologie, cena pořízení solárních panelů v posledních sedmi letech poklesla o 70 % (Evropská rada, 2015).

Jedním způsobem, jak získat obnovitelnou energii z dnešního městského prostředí je využití solárního potenciálu měst. Technologie solárních panelů dozrála a stala se technicky proveditelným zdrojem udržitelné energie v rámci rozsáhlých území (Wiginton et al., 2010). Samotné přijetí solárních technologií rychle roste, a to i díky solárním katastrálním mapám měst, které jsou často k dispozici on-line (Agugiaro et al., 2012).

3.2 Legislativa a podpora obnovitelných zdrojů

V návaznosti na cíle přijaté Evropskou unií zažádala Česká republika o snížení cílů a zavázala se dosáhnout 13 % výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů (MPO, 2010). Tento cíl ale splnila již v roce 2014 (Eurostat, 2016). I přes to, je důležité v podpoře obnovitelné energie setrvat. Mezi důvody uvádí Becchio et al. (2016) především předpovídaný nárůst obyvatel planety a předpokládané zhoršení globálního oteplování díky zvýšení znečištění atmosféry.

Česká republika podporuje rozvoj obnovitelných zdrojů prostřednictvím dotací v rámci balíčků Zelená úsporám již od roku 2009. Samotné pořízení solárních kolektorů a fotovoltaických systémů spadá do oblasti podpory C v programu Nová zelená úsporám (NZÚ). S jeho pomocí lze ušetřit náklady na pořízení, a tím i zkrátit dobu návratnosti investic. NZÚ poskytuje podporu rodinným a bytovým domům. V listopadu roku 2016 vláda schválila změnu programu, díky které budou nově moci o dotaci zažádat i veřejně budovy (MŽP, 2014).

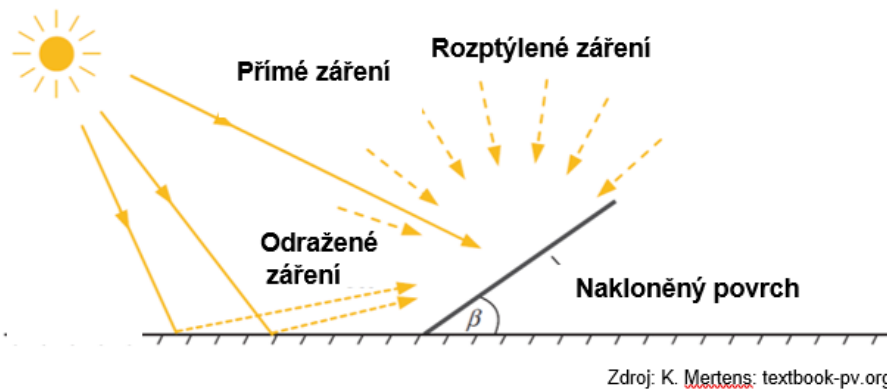
Dále v roce 2010 přijala Česká republika směrnici evropského parlamentu a rady 2010/31/EU o energetické náročnosti budov. Zavázala se zajistit, že po 31. 12. 2018 budou nové budovy využívané a vlastněné orgány veřejné moci budovami s téměř nulovou spotřebou energie a od 31. 12. 2020 budou všechny nové budovy budovami s téměř nulovou spotřebou energie (EU, 2010).

3.3 Sluneční záření

Sluneční záření dopadající na zemský povrch je výsledkem komplexních interakcí energie mezi atmosférou a povrchem. V celosvětovém měřítku jsou změny způsobeny geometrií Země a její rotací. Na lokální úrovni rozložení záření nejvíce ovlivňuje proměnlivost výšky, sklonu a orientace terénu. Dalším významným faktorem je zastínění okolními objekty. Různorodost povrchu určuje dynamiku krajinných procesů, například teploty vzduchu a půdy, vlhkost, sněhovou pokrývku, vypařování, fotosyntézu a další procesy, které mají přímý dopad na lidskou společnost. Přesná znalost distribuce solární radiace je podstatná pro různé aplikace, mimo jiné pro klimatologii, projektování staveb, ekologii, obhospodařování půdy a fotovoltaiku (Hofierka et Šúri, 2002).

Solární radiace pocházející ze Slunce je po průchodu atmosférou ovlivňována reliéfem terénu a vlastnostmi povrchu. Na povrchu může být zachycena v podobě

přímého, difúzního (rozptýleného) nebo odraženého slunečního záření, viz Obr. 1. Obecně platí, že přímé záření je největší složkou dopadajícího záření, zatímco odražené nejmenší (Fu et Rich, 1999).



Obr. 1 Složky slunečního záření, upraveno

Existuje mnoho pozemních meteorologických stanic zaznamenávajících sluneční záření v celé Evropě, nicméně pro využití jejich měření v prostorovém plánování je nutné aplikovat interpolační metody. V nepřístupných horských oblastech je možné jako zdroj informací o solární radiaci použít družicové snímky pro zlepšení kvality interpolace, nebo přímo hodnoty z meteorologických družic (např. Meteostat). Další technikou pro vytvoření prostorové databáze jsou modely slunečního záření integrované do geografických informačních systémů (Hofierka et Šúri, 2002).

Vyčíslení solárního potenciálu prostřednictvím solárních map je prvním krokem v zrychlení procesu výraznějšího využívání solární energie v městském prostředí. Solární mapy nebo solární katastry jsou výstupem GIS, který poskytuje informace o roční solární radiaci na povrchu budov (kWh/rok/m^2). Solární katastry jsou dostupné na internetu a většinou jsou doplněné podrobnostmi o možných výstupech fotovoltaických systémů či solárních kolektorů. Mnohá města již mají solární mapy svých ploch a slouží především ke dvěma účelům: k informování občanů o potenciálu jejich vlastních střech a jako nástroj městské správy pro rozhodování ohledně energetické politiky (Kanters et al., 2014).

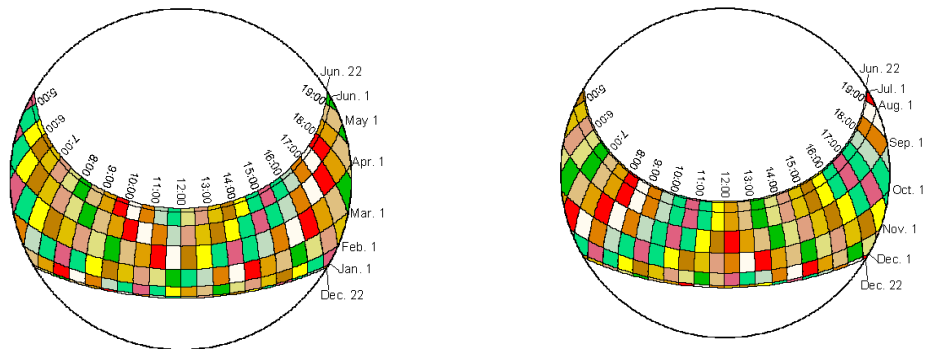
3.4 Modely solární radiace v prostředí GIS

Z důvodu velké místy heterogenity není možné pro tvorbu map solární radiace využít interpolaci a extrapolaci bodových dat. Prostorové modely solární radiace tedy poskytují ekonomicky efektivní prostředky pro pochopení prostorové a časové variace slunečního záření (Fu et Rich, 1999). Existuje mnoho způsobů, jak solární mapu vytvořit. Freitas et al. (2014) ve své práci uvádí 21 programových nástrojů, pomocí kterých je možné vypočítat hodnotu solární radiace. V této práci jsou uvedeny dva základní modely pro výpočet solární radiace, *Solar Analyst (ArcGIS)* a *r.sun (GRASS GIS, PVGIS)*.

3.4.1 Solar Analyst

Solar Analyst je model solární radiace navržený autory Fu et Rich (1999). Pro výpočet množství dopadajícího slunečního záření autoři navrhli hemisférický algoritmus viditelnosti, který při modelování zohledňuje zeměpisnou šířku, nadmořskou výšku, orientaci povrchu, sezónní změny úhlů dopadajících paprsků, zastínění a atmosférické podmínky. Pro získání hodnoty celkového množství slunečního záření model počítá přímé, difúzní a globální záření, ale i trvání přímého oslunění, sluneční mapu, mapu oblohy a viditelnou oblast.

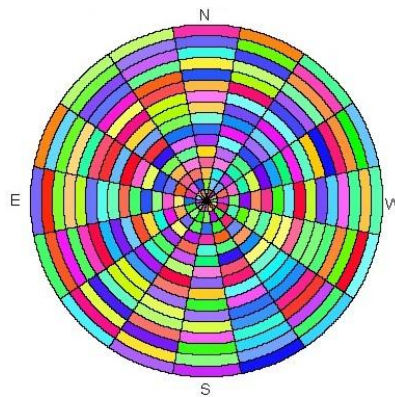
Jako první krok je z digitálního výškového modelu generována vzhůru vyhlížející polokoule viditelné oblasti (typu fotografie ve stylu rybího oka) pro každou buňku rastru. Viditelná oblast je úhlová distribuce obstrukcí oblohy. Dále je počítáno přímé sluneční záření. To přichází ze všech stran oblohy a v modelu je reprezentováno sluneční mapou ve tvaru polokoule odpovídající polokouli viditelné oblasti. Ta představuje pohyb slunce po obloze v průběhu dne a ročního období. Model vytváří jednu sluneční mapu pro období mezi zimním a letním slunovratem (22. prosince až 22. června) a jednu pro období mezi letním a zimním slunovratem (22. června až 22. prosince), viz Obr. 2. Každý sektor mapy je vyplněn jedinečným identifikačním číslem, pro které je vypočítána hodnota azimutu a zenitu v těžišti sektoru a doba trvání. Celkové přímé sluneční záření je součtem přímého slunečního záření ze všech sektorů slunečních map (Fu et Rich, 1999).



Obr. 2 Roční sluneční mapy

pro oblast nacházející se na 39° severní zeměpisné šířky za použití půlhodinového denního kroku a měsíčního kroku v průběhu roku (Fu et Rich, 1999)

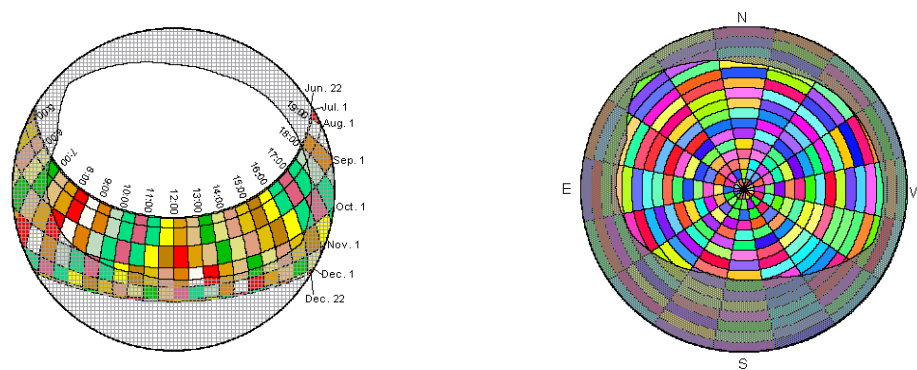
Na rozdíl od přímého záření může difúzní přicházet ze všech směrů oblohy. Proto model při jeho výpočtu rozděluje oblohu do série úseků, které jsou definované sektory zenitu a azimutu, viz Obr. 3. Každý sektor je opět vyplněn jedinečným identifikačním číslem, pro který je vypočítaný úhel zenitu a azimutu v těžišti úseku (Fu et Rich, 1999).



Obr. 3 Mapa oblohy

se sektory definovanými 16-ti oddíly zenitu a 16-ti oddíly azimutu (Fu et Rich, 1999)

Následujícím krokem je překrytí viditelné oblasti se sluneční mapou a mapou oblohy, viz Obr. 4.



Obr. 4 Kombinace sluneční mapy s viditelnou oblastí (vlevo) a mapy oblohy s viditelnou oblastí (vpravo), (Fu et Rich, 1999)

Pro každý sektor sluneční mapy, který není zcela zakryt, je vypočtena solární radiace. Globální záření se vypočte jako součet přímého a difúzního záření všech sektorů. Výše uvedené procesy se opakují pro každé místo na topografickém povrchu, a je tak vytvořen rastr solární radiace (Wh/m^2) pro celou studovanou oblast (Fu et Rich, 1999).

Pro modelování slunečního záření v prostředí ArcGIS od společnosti ESRI lze využít sady nástrojů Solar Radiation Tool, obsahující tři nástroje. Jedná se o *Area Solar Radiation*, *Point Solar Radiation* a *Solar Radiation Graphics*. Hlavním vstupním parametrem nástroje *Area Solar Radiation* je digitální model terénu. Dále je nutné zadat rozlišení mapy oblohy a časový krok (denní či hodinové intervaly, určitý den nebo rok), denní a hodinový interval pro výpočet sluneční mapy a mapy oblohy, počet výpočetních směrů, počet zenitových a azimutových oddílů, typ difúzního modelu a atmosférické parametry propustnosti a difúzního podílu.

3.4.2 r.sun

Model r.sun je založený na práci Hofierka (1997) a byl vytvořen pro využití v prostředí GRASS GIS. Výhodou modelu je schopnost odhadu solárního potenciálu pro velké rozlohy. Model odhaduje globální záření za jasné oblohy na základě součtu přímého, rozptýleného a odraženého záření. Od ostatních modelů se nejvíce liší pojetím rozptýleného záření.

Projektem Evropské unie je online aplikace Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), který na evropském území dosahuje rozlišení 1 km.

Jedná se o kalkulátor solární a fotovoltaické energie pro Evropu a od roku 2014 také Afriku a Asii, který je veřejně dostupný na adrese <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>. S jeho pomocí lze odhadnout množství dopadajícího slunečního záření na základě meteorologických dat jak z družic, tak z pozemních měření. Po výběru lokality (ať už pomocí adresy nebo GPS souřadnic místa) je zobrazena solární databáze, kterou lze v případě zájmu změnit za starší verzi. PVGIS nabízí výpočet denní a měsíční solární radiace místa a také množství vyprodukované elektrické energie fotovoltaickým systémem. PVGIS využívá modelu solárního záření r.sun (Joint Research Centre, 2012). Pomocí PVGIS je možné získat data solární radiace pro libovolné oblasti i v rámci České republiky.

3.5 Zdroje prostorových informací

Základními vstupy do procesu plánování krajiny i souvisejících lidských činností jsou lokalizované informace. Jejich význam neustále roste stejně jako rychlost, s kterou je možné je získat. Jejich aktuálnost, komplexnost, dlouhodobost a kvalita výrazně ovlivňuje pořizovací cenu. Intenzivní rozvoj tedy zaznamenávají obory, které primárně data získávají a obory umožňující analýzu vedoucí k optimálnímu rozhodnutí. To zajišťují informační systémy známé jako GIS, které mají různé stupně přesnosti s ohledem na to, k čemu se používají. Geodézie a kartografie má hlavní tři zdroje polohových informací s odpovídající přesností. Prvním jsou základní geodetické metody, tedy mapování a měření za použití totálních stanic, GPS apod. s přesností cm a vyšší. Dalším je fotogrammetrie letecká, pozemní a družicová s přesností cm a dm a třetím je dálkový průzkum Země družicový i letecký s přesností dm, m a km (Pavelka, 2009).

Zink et al. (2015) ve své práci porovnávají přesnost při použití dostupných dat pocházejících z laserového skenování (LIDAR) a dat získaných použitím fotogrammetrie za pomoci bezpilotních letounů. Došel k závěru, že v případě potřeby vyššího rozlišení, než jaké je možné získat z LIDAR, je fotogrammetrie smysluplnou alternativou. Uvádí, že pomocí fotogrammetrie je možné získat digitální model terénu o mnohonásobně vyšší přesnosti. Současně ale poukazuje na vyšší náklady, skladovací kapacity a delší čas výpočtu. Proto je vždy nutné najít vhodný kompromis.

V této práci bylo pro dosažení vysoké přesnosti využito metody letecké fotogrammetrie. Ta je nutná pro tvorbu výškového modelu terénu a následně pro odhad solárního potenciálu povrchu (Kodysh et al., 2013; Freitas et al., 2015).

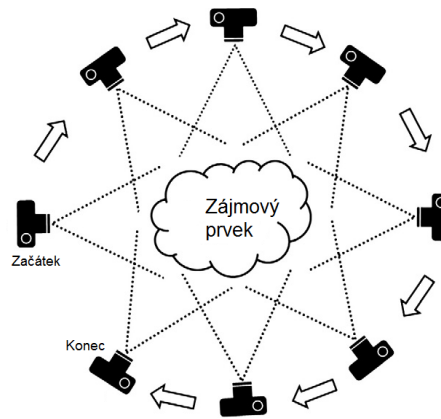
3.5.1 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je vědní obor geodézie a kartografie, který se zabývá zpracováním informací získaných o objektech měření z fotografií. Po pořízení fotografických záznamů dochází k zpětnému odhadování trojrozměrné struktury.

Výsledným produktem fotogrammetrie je prostorově umístěné bodové mračno, které zobrazuje model zájmové lokality. Důležitým parametrem dat je hustota skenování, která závisí na výšce a rychlosti letu, frekvenci skeneru a počtu a velikosti překryvů letových pásů nad daným územím. Čím je hustota vyšší, tím je zpravidla výsledek lepší pro interpretaci dat (Pícek, 2014). Podtypem fotogrammetrie, kterým byly v této práci data zpracována, je metoda Structure from Motion (SfM).

3.5.2 Structure from Motion

Structure from Motion je algoritmus usnadňující tvorbu podrobných topografických modelů z fotografií shromážděných bezpilotními letouny (James et al., 2017). Metoda má nízké vstupní náklady, nenáročnou obsluhu, je velmi efektivní a poskytuje data s vysokou přesností. Často je využívána v nepřístupných oblastech. Vychází z klasické fotogrammetrie, ale místo jednoho páru shodných bodů využívá více překrývajících se fotografií. Od běžné fotogrammetrie se liší tím, že geometrie scény, pozice kamery a orientace je řešena automaticky bez nutnosti předchozí specifikace sítě bodů, které mají známé prostorové umístění. To je možné použitím vysokého počtu opakování. Přístup je nejvhodnější pro sady snímků s vysokým stupněm překrytí, které zachycují trojrozměrnou strukturu objektů z různých směrů, nebo jak již název napovídá, obrázky odvozené od pohybujícího se snímače (Westoby et al., 2012), viz Obr. 5.



Obr. 5 Schéma metody SfM (Westoby et al, 2012), upraveno

Jako pohybuující se snímač jsou v současnosti velmi často využívány bezpilotní letouny. James et al. (2017) uvádí, že současné bezpilotní letouny nejsou vybaveny dostatečně kvalitní přesností globálního družicového polohového systému, a proto není možné využít pozici kamery k přesnému zaměření lokality. Vytvořené bodové mračno proto nemá geografický souřadnicový systém a není začleněno do reálného prostorového světa. Pro jeho zapojení je nutné provést georeferencování bodového mračna pomocí pozemních kontrolních bodů (Westoby et al., 2012).

3.6 Stávající studie

Porovnání modelovaného solárního potenciálu s reálným měřením provedl Ruiz-Arias et al. (2009). Analýza byla provedena v komplexním terénu Národního parku Sierra Nevada ve Španělsku. Autoři zhodnotili výstup čtyř modelů solární radiace, Solar Analyst, r.sun, SRAD a Solei-32. Pro práci s rozsáhlým územím zvolili rozlišení výškového modelu terénu 20 a 100 metrů. Pro každé rozlišení digitálního modelu a pro každý model byly odhady porovnány s hodnotami naměřenými 14-ti radiometrickými stanicemi, kde byla zaznamenávána teplota a globální radiace. Závěrem Ruiz-Arias et al. (2009) zhodnotili, že Solar Analyst obecně podhodnocuje pozorované denní ozáření, nejvíce pro dny, kdy je propustnost oblohy nižší než 0.3 (zamračeno, viz kapitola 4.3.1). S nárůstem propustnosti se zvyšuje i odhad solární radiace. Při jasných dnech s indexem propustnosti nad 0.6 dokonce došlo k odhadu vyšších hodnot, než jaké byly zaznamenány měřením. Autoři uvádí, že podhodnocení při zatažené obloze může být způsobeno nižší spolehlivostí odhadu rozptýleného záření. Naopak odhad modelu r.sun dosáhl shody s naměřenými

hodnotami s nízkým podhodnocením. K odlišnému závěru dospěli autoři Agugiaro et al. (2012) při studii v alpské oblasti na severovýchodě Itálie. V kraji Trento porovnali odhadovaný solární potenciál modelem r.sun s hodnotami z pyranometrů a zhodnotili, že roční radiaci model přeceňuje přibližně 39%. Ruiz- Arias et al. (2009) také zhodnotili citlivost modelu na rozlišení digitálního modelu terénu (DMT). Solar Analyst byl zhodnocen jako nejméně citlivý, nejcitlivěji reagoval na změnu rozlišení model r.sun.

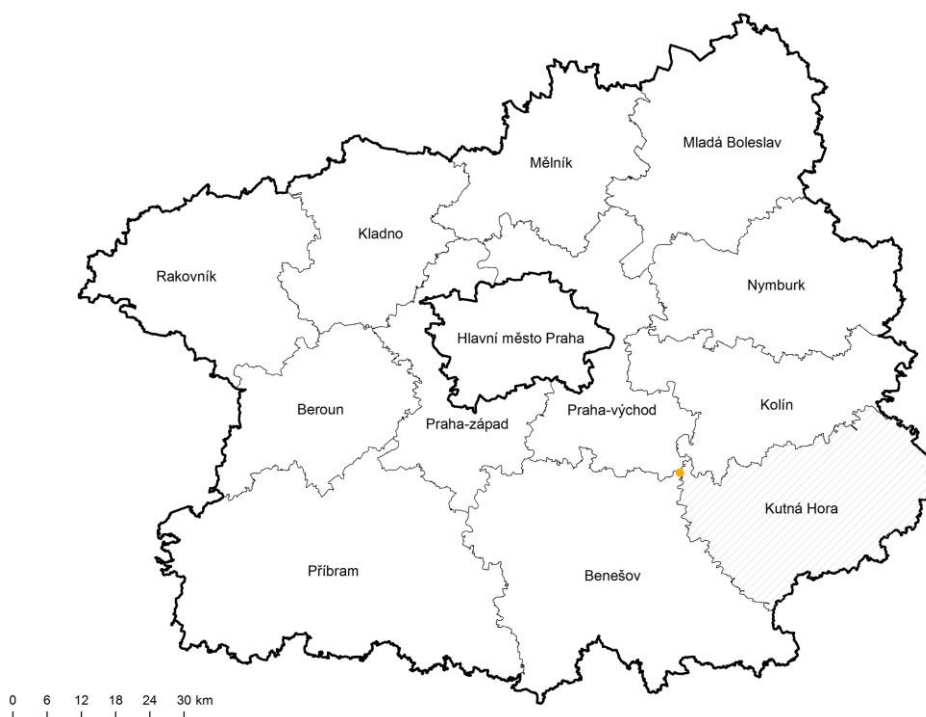
Zink et al (2015) provedli analýzu rozlišení digitálních modelů pro účely odhadu potenciálu střešních solárních systémů. Autoři uvádí, že rozlišení 1 metr není dostačující, protože nedokáže zobrazit potřebné střešní prvky. Při rozlišení 1 cm, 7.5 cm, 10 cm and 25 cm bylo dosaženo podobných odhadů elektrické produkce, a proto doporučují použít rozlišení 25 cm. To je dostačující pro zohlednění všech malých střešních objektů, které jsou relevantní pro odhad slunečního záření a současně je rozlišení ideální pro dosažení rovnováhy mezi mírou detailu a výpočetními požadavky.

4 Metodika

V této kapitole je popsána lokalita studie a provedené kroky, vedoucí k vyhodnocení cílů práce.

4.1 Charakteristika studijního území

Modelová oblast se nachází v obci Úžice, v katastrálním území Mělník nad Sázavou. Je součástí okresu Kutná Hora a spadá do Středočeského kraje, viz Obr. 6.



Obr. 6 Studijní lokalita

Konkrétně se jedná o plochu střechy rodinného domu, na které je umístěno 40 fotovoltaických panelů typu *Siliken 60P6L 230 Wp* o celkovém výkonu 9,2 kWp. Maximální efektivita FV panelů je 14.17%. Výkon FV panelů je ze stejnosměrného napětí transformován dvěma střídači typu SolarMax 6000S na střídavé napětí 2x230V, 50Hz, které je automaticky nafázováno k hlavní síti. FV panely jsou propojeny ve 4 větvích kabely H07RN-F 1x6. Tento systém tvoří soukromou solární

elektrárnu, která byla zapojena do sítě ČEZ Distribuce a.s. na konci července roku 2009. Od té doby je na vlastním elektroměru měsíčně zaznamenávána výroba elektrické energie.

4.2 Sběr a zpracování dat

Pro vyhodnocení solárního potenciálu plochy v prostředí ArcGIS je nutné vytvořit digitální model povrchu (DMP). Pro získání dat potřebných pro tvorbu DMP dané oblasti byla zvolena metoda letecké fotogrammetrie. V této práci bylo k nalétnutí oblasti použito bezpilotní letadlo *Robodrone Kingfisher*, viz Obr. 7. Zaměření proběhlo 11. 7. 2016. Podrobnosti o použitém typu bezpilotního letounu a digitální kamery zobrazuje Tab. 1.



Obr. 7 Fotografie náletu zájmové oblasti

Typ bezpilotního letadla	<u>hexakoptéra Robodrone Kingfisher</u>
Max MTOM [kg]	10
Max výdrž [min]	45
Max dosah [km]	15
Max rychlost [km/h]	40
Rozměry trupu [mm]	1200 x 1400 x 220
Odolnost větru [m/s]	<8 (28.8km/h)
Servisní intervaly [hrs]	50 / 100
Max dostup [m]	1000 AGL
Příprava ke vzletu [min]	<5
Operační teplota	-10 ~ + 400C
Použitá kamera	Sony CyberShot DSC-RX100 II
Rozlišení [Mpx]	20,2
Optický zoom	3,6x
Velikost displeje	3"

Tab. 1 Technická data bezpilotního letounu a fotoaparátu
 Informace o bezpilotním letounu dostupná na www.robodrone.com/kingfisher

Letový plán byl vytvořen v softwaru Mission Planner 1.3.41 a relativní výška náletu byla 25 metrů. Nasnímané fotografie byly upraveny v programu Agisoft PhotoScan. 1.2.6. Celkem bylo vybráno 247 ostrých fotek, které zabraly zájmové území. Program pomocí funkce *Align Photos* identifikoval překrývající se fotografie a vytvořil z nich bodové mračno. Následně byla data pomocí funkce *Build Dense Cloud* dohuštěna, kdy program pomocí interpolace doplnil chybějící body na základě bodů okolních, viz Obr. 8. Dohuštěné bodové mračno zájmové oblasti obsahovalo 10 895 940 bodů.



Obr. 8 Zobrazení point cloudu programem Trimble Real Works Viewer 10.2
a) prvotní bodové mračno, b) dohuštěné bodové mračno

Nasnímané fotografie jsou bez geografického určení z důvodu nedostatečné přesnosti GPS přijímačů. Aby nedošlo k chybnému určení místa zaměření, bylo použito statického pozemního zaměření bodů pomocí geodetického přijímače typu *Leica GPS 1200*. Na lokalitě byly zaměřeny souřadnice vybraných bodů objektů, jako roh domu, roh garáže, roh studny atd. Celkem bylo určeno 12 vlíčovacích bodů v souřadnicovém systému WGS84, viz Obr. 9. Ty byly použity pro georeferencování vzniklého bodového mračna. Data byla poté exportována ve dvou formátech, souboru .laz a v podobě digitálního modelu.

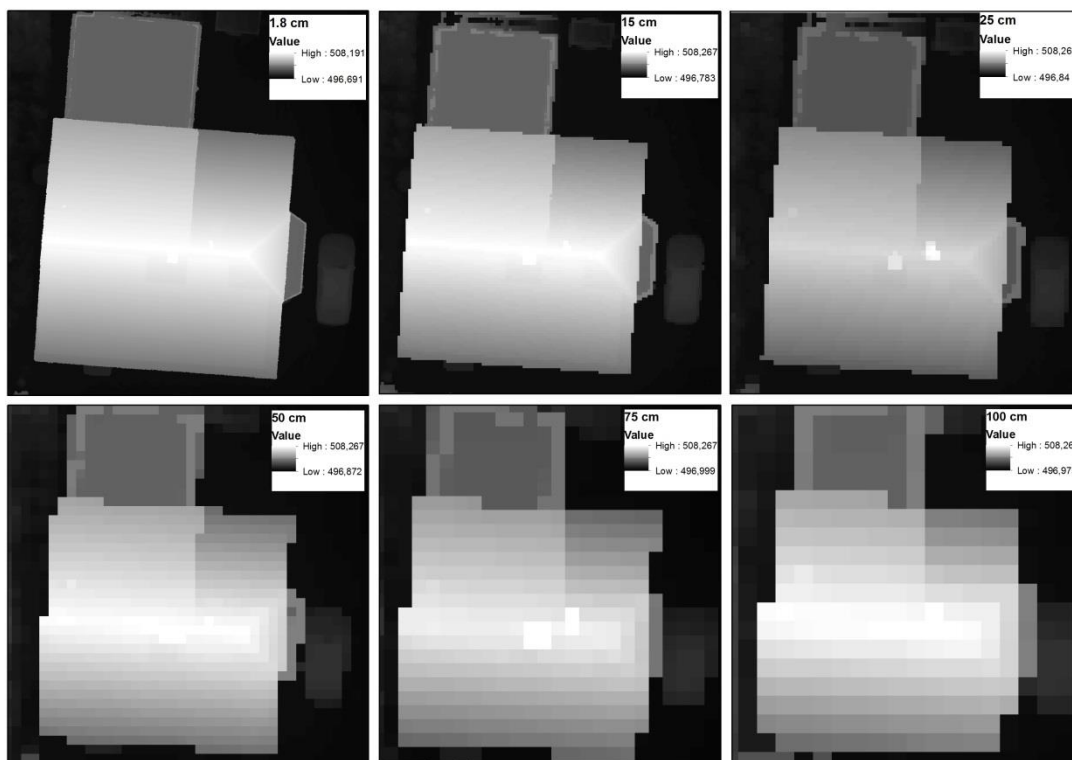


Obr. 9 Studijní oblasti s pozemními kontrolními body

Získaná data byla zpracována v programu ArcMap 10.3. Dalším krokem bylo převedení digitálního modelu do souřadnicového systému S-JTSK pomocí nástroje *Project*. Kvůli úspoře času byla zájmová oblast oříznuta nástrojem *Clip* na těsné okolí domu. To bylo možné díky absenci vysokých stromů v blízkosti domu a dalších prvků, které by mohly způsobit zastínění. Následně byl digitální model zpracován v různém rozlišení.

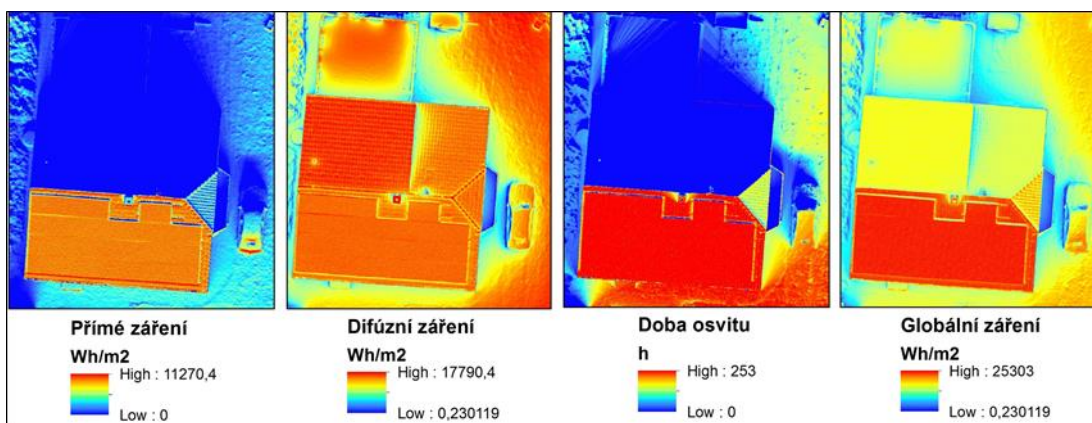
4.3 Výpočet solárního potenciálu v prostředí ArcGIS

V této práci byl využit nástroj *Area Solar Radiation (ASR)*. Jak je uvedeno v kapitole 3.4.1 hlavním vstupním parametrem nástroje je digitální výškový model. Ten byl vytvořen pomocí funkce *Aggregate* v rozlišení 1.8 cm, 7.4 cm, 15 cm, 25 cm, 50 cm, 75 cm a 100 cm, viz Obr. 10.



Obr. 10 Použité rozlišení digitálních modelů na zájmové lokalitě

Výstupem nástroje ASR jsou rastry solárního záření. Jak je uvedeno v kapitole 3.4.1, model Solar Analyst počítá přímé záření (Wh/m^2), rozptýlené záření (Wh/m^2) a dobu přímého osvětlení (h). Následně vypočtené hodnoty spojí a vytvoří výstupní rastr globálního záření (Wh/m^2), viz Obr. 11.



Obr. 11 Příklad výstupního rastru pro měsíc leden roku 2015

Pro získání odhadu energetického zisku plochy solárních panelů byla z výstupního rastru globálního záření pomocí nástroje *Extract by Mask* vyjmuta část střechy, kde se solární panely nachází. Z této plochy byla vybrána průměrná hodnota ozáření (Wh/m²).

V prvním kroku byl testován vliv rozlišení DMP na vypočítaný solární potenciál. Modelovaný odhad byl vytvořen ve všech uvedených rozlišeních pro každý měsíc v roce za využití časového kroku *Multiple days in a year*, kdy byl zvolen první den měsíce jako *Start day* a poslední jako *End day*. Denní a hodinový interval pro výpočet sluneční mapy a mapy oblohy byly ponechány ve výchozím nastavení 14-ti dnů a 0.5 hodiny.

V následujícím kroku byly zvoleny čtyři scénáře ASR 1 - 4 pro porovnání vlivu nastavení nástroje na modelovaný solární potenciál. Scénáře se lišily rozlišením mapy oblohy (*Sky size*), počtem výpočetních směrů (*Calculation direction*), počtem zenitových a azimutových oddílů (*Zenith/azimuth division*) a nastavením atmosférických parametrů. Ve všech případech byl ponechán typ difúzního modelu *uniform sky*. Popis nastavení dle jednotlivých scénářů viz Tab. 2.

	ASR 1	ASR 2	ASR 3	ASR 4
Sky size	200	200	512	512
Calculation direction	32	32	64	64
Zenith division	8	8	32	32
Azimuth division	8	8	32	32
Diffuse proportion	0.3	PVGIS	0.3	PVGIS
Transmittivity	0.5	NASA	0.5	NASA

Tab. 2 Nastavení nástroje ASR dle jednotlivých scénářů

4.3.1 Atmosférické parametry

Výše zmíněné atmosférické parametry, které je možné v nastavení nástroje upravovat jsou dva. Prvním je difúzní podíl (*diffuse proportion*) představující část globálního záření, která je tvořena rozptýleným zářením. Parametr nabývá hodnot od 0 do 1. Defaultní nastavení nástroje je pro jasnou oblohu a odpovídá hodnotě 0.3. Při dohledávání způsobů zisku přesných hodnot byla nalezena možnost využití veřejně dostupné databáze PVGIS. Ta umožňuje získat měsíční hodnoty difúzního podílu poměrem difúzního a globálního ozáření (*Dif./global radiation*). Použité

hodnoty difúzního podílu ze serveru PVGIS byly prokázány za dostatečně přesné v diplomové práci Bambulové (2013).

Druhým atmosférickým parametrem je propustnost (*transmittivity*). Ta představuje množství slunečního záření, které projde atmosférou a dopadne na zemský povrch. I tento parametr nabývá hodnot od 0 do 1. Hodnota nula znamená, že atmosférou záření neprojde a hodnota jedna, že jí projde veškeré záření. Výchozí hodnota modelu je nastavena na 0.5. Při hledání způsobů, jak zjistit přesnou hodnotu pro studijní oblast byla objevena možnost využití indexu průhlednosti (*clearness index*). Jeho hodnoty jsou veřejně dostupné na stránkách Národního úřadu pro letectví a kosmonautiku (NASA) <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip@larc.nasa.gov>. Pro studijní oblast byla jejich měsíční hodnota vypočtená zprůměrováním dostupných dat z let 1995-2005. Hodnoty pro jednotlivé měsíce jsou zobrazeny v Tab. 3.

Parametr/měsíc	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	Rok
Difúzní podíl	0.75	0.67	0.59	0.5	0.52	0.54	0.52	0.48	0.56	0.62	0.71	0.75	0.55
Propustnost	0.41	0.44	0.43	0.45	0.46	0.43	0.42	0.47	0.41	0.36	0.33	0.37	0.42

Tab. 3 Měsíční hodnoty použitých atmosférických parametrů

4.4 Výpočet solárního potenciálu serverem PVGIS

Pro zhodnocení přesnosti modelu r.sun byla využita online aplikace PVGIS. Pro její využití bylo nutné zadat několik vstupních parametrů. Nejprve souřadnice požadované oblasti, podle které systém vyhodnotí, odkud má čerpat data atmosférických parametrů. Dále je možné vybrat typ technologie fotovoltaického systému (*Crystalline Silicone / CIS / CdTe / Unknown, Other*). V této práci byla zvolena první možnost z důvodu solárních panelů typu Siliken 60P6L 230 Wp. Dalším důležitým prvkem je maximální nainstalovaná hodnota výkonu FV systému. V tomto případě se jedná o 9.2 kWh (viz kapitola 4.1). Solární panely se nachází na střeše rodinného domu, a proto byla zvolena možnost *building integrated*. Střecha rodinného domu má sklon 49° a je umístěna jižním směrem (azimuth = 0). Další parametry nebyly upravovány. Server počítal s odhadnutými ztrátami v důsledku

teploty a nízkého ozáření 12.2 % (za použití místní teploty okolí převzatou ze solární databáze PVGIS-CMSAF) a odhadnutými ztrátami 2.9 % z důvodu úhlové odrazivosti světla od povrchu panelů. Tyto ztráty server vypočte pro každou lokalitu a nelze je ovlivnit. K výše zmíněným ztrátám se ještě přidají odhadované ztráty systému, které je možné upravit. Tyto ztráty ovlivňují odhad elektrické produkce, ale nemají vliv na průměrnou měsíční ani denní hodnotu globálního záření.

Nastavení vstupních parametrů bylo porovnáno prostřednictvím dvou postupů. V prvním byl použit sklon a azimut dle parametrů střechy na studijní oblasti a ve druhém byla využita možnost *optimalizovat sklon a azimut*. Poté server provedl výpočet s hodnotou sklonu 33° a azimutem -3°. Nastavení parametrů v prvním kroku viz Obr. 12. Při uvedeném postupu vypočítal server pro každý měsíc denní a měsíční průměrné hodnoty výroby elektrické energie (kWh), a také denní a měsíční průměrný úhrn globálního záření (kWh/m²). Pro účely této práce byly vybrány hodnoty měsíčního průměrného úhrnu globálního záření (kWh/m²).

The screenshot shows the PVGIS web interface. At the top, there are logos for JRC and CM SAF, and the title 'Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps'. Below the logos is a search bar with the text 'e.g. "Ispra, Italy" or "45.256N, 16.9589E"'. To the right of the search bar, the cursor position is shown as 49.894, 14.911 and the selected position as 49.893, 14.911. Below the search bar, there are fields for 'Latitude:' and 'Longitude:'. To the right of these fields is a 'Go to lat/lon' button. Below the search bar and fields is a map of Europe with a red pin indicating the selected location. The map is labeled 'Mapa' and 'Satelitní'. Below the map, there are buttons for 'Solar radiation', 'Temperature', and 'Other maps'. To the right of the map is a detailed configuration panel for 'Performance of Grid-connected PV'. The configuration panel includes the following options: 'Radiation database: Climate-SAF PVGIS', 'PV technology: Crystalline silicon', 'Installed peak PV power: 9.2 kWp', 'Estimated system losses [0;100]: 14 %', 'Fixed mounting options: Mounting position: Building integrated', 'Slope [0;90]: 49 °', 'Azimuth [-180;180]: 0 °', 'Tracking options: Vertical axis, Inclined axis, 2-axis tracking', 'Output options: Show graphs, Show horizon, Web page, Text file, PDF'. A 'Calculate' button is located at the bottom of the configuration panel.

Obr. 12 Nastavení při využití modelu r.sun v rámci online databáze PVGIS

4.5 Elektrická produkce

Pro získání výsledné hodnoty odhadované elektrické produkce FV systému z obou modelů byl použit následující vztah

$$E = R_{Glo} \cdot A \cdot \eta$$

, kde

R_{Glo} – průměrná hodnota globálního záření (kWh/m²),

A – plocha solárních panelů (m²)

η – účinnost panelů

Konkrétně se jednalo o plochu střechy pokrytou FV panely 56 m² a účinnost FV panelů 14,17 %.

4.6 Statistické zhodnocení

Výstupy modelů byly porovnány v prostředí statistického programu RStudio pomocí párového t-testu, kdy do analýzy vstupoval odhad modelu a průměrné naměřené hodnoty.

5 Výsledky

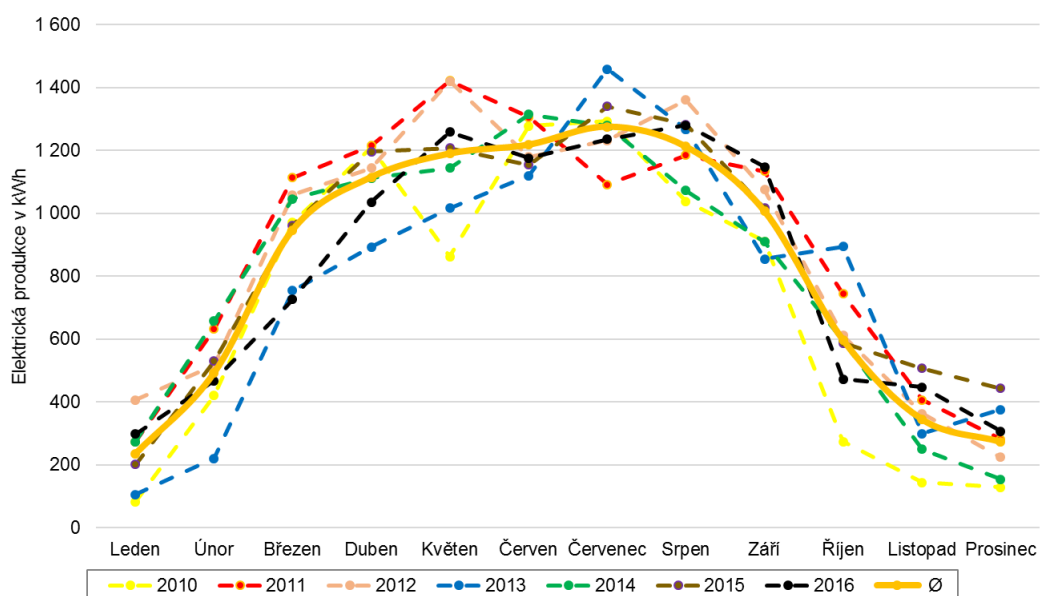
5.1 Výroba elektrické energie v zájmové oblasti

V této práci byly pro porovnání použity hodnoty výkonu FV panelů od ledna roku 2010 do prosince roku 2016. V Tab. 4 jsou uvedeny jednotlivé hodnoty výroby elektrické energie FV panely v kWh na střeše rodinného domu v obci Úžice.

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Ø
leden	83	274	406	105	274	201	298	234
únor	420	632	516	220	657	529	467	492
březen	970	1 113	1058	754	1045	962	726	947
duben	1 210	1 215	1144	893	1112	1196	1035	1115
květen	862	1 422	1420	1016	1144	1208	1259	1190
červen	1 278	1 305	1180	1120	1315	1154	1175	1218
červenec	1 293	1 091	1231	1459	1279	1340	1236	1276
srpen	1 038	1 184	1360	1267	1073	1282	1280	1212
září	910	1 134	1075	855	909	1016	1147	1007
říjen	274	744	611	894	595	587	472	597
listopad	143	406	363	299	249	507	447	345
prosinec	128	281	224	376	154	443	307	273
Celkem	8 609	10 801	10 588	9 258	9 806	10 425	9 849	9 905

Tab. 4 Elektrická produkce FV panely v zájmové oblasti

Pro názornost grafické zobrazení, viz Obr. 13.



Obr. 13 Grafické znázornění elektrické produkce v zájmové oblasti

5.2 Vyhodnocení solárního potenciálu

5.2.1 Area Solar Radiation

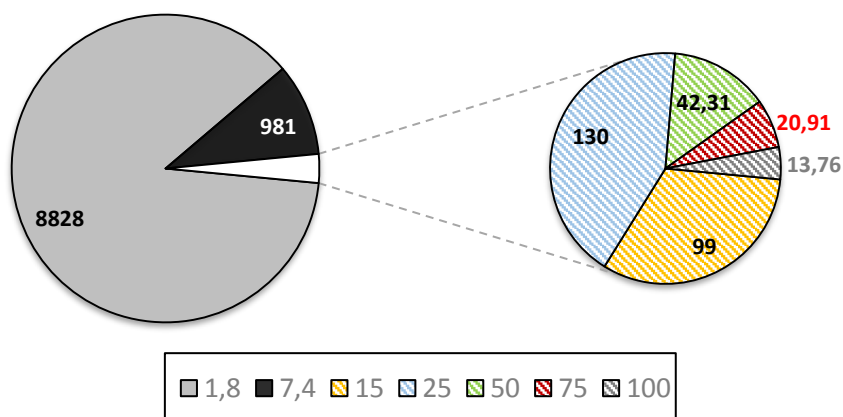
V prvním kroku byl porovnán vliv vstupního rozlišení na výslednou hodnotu modelované elektrické produkce. V každém měsíci se odhad produkce pro jednotlivá rozlišení mírně lišil, avšak v případě rozlišení 1.8 cm došlo k celkově největšímu podhodnocení výroby. Pro rozlišení 7.4 cm, 15 cm, 25 cm, 50 cm, 75 cm a 100 cm se modelovaná produkce měnila maximálně o 6 kWh (v měsíci červnu). Směrodatná odchylka odhadované elektrické produkce pro uvedená rozlišení (kromě 1.8 cm) je uvedeno v Tab. 5 v prvním sloupci.

	Směrodatná odchylka odhadnutého výkonu FV panelů	Směrodatná odchylka elektrické produkce FV panelů
leden	0.16	105.16
únor	0.46	135.52
březen	1.04	139.55
duben	1.83	108.31
květen	4.73	189.66
červen	5.96	73.26
červenec	3.28	104.01
srpen	2.89	110.09
září	0.36	108.59
říjen	0.44	181.29
listopad	0.28	115.16
prosinec	0.19	105.77

Tab. 5 Porovnání vlivu rozlišení na odhad výkonu FV panelů (kWh)

V tabulce lze pozorovat výše zmíněný trend, tedy že i při velkém rozdílu mezi testovanými rozlišeními dosahovala směrodatná odchylka odhadovaného výkonu nízkých hodnot. Při porovnání těchto hodnot se směrodatnou odchylkou výkonu FV panelů v zájmové lokalitě v letech 2010 - 2016 byl významný vliv rozlišení vyloučen. Meziroční změny atmosférických podmínek ovlivňují vypočtené množství solárního potenciálu výrazně více než přesnost rozlišení vstupního digitálního výškového modelu.

Doba výpočtu pro jednotlivá rozlišení se velmi lišila, viz Obr. 14. Z důvodu úspory času bylo na základě zhodnocení vlivu rozlišení rozhodnuto použít pro následující analýzu rozlišení 50 cm.



Obr. 14 Grafické znázornění doby výpočtu (s) ASR 4 pro všechna rozlišení

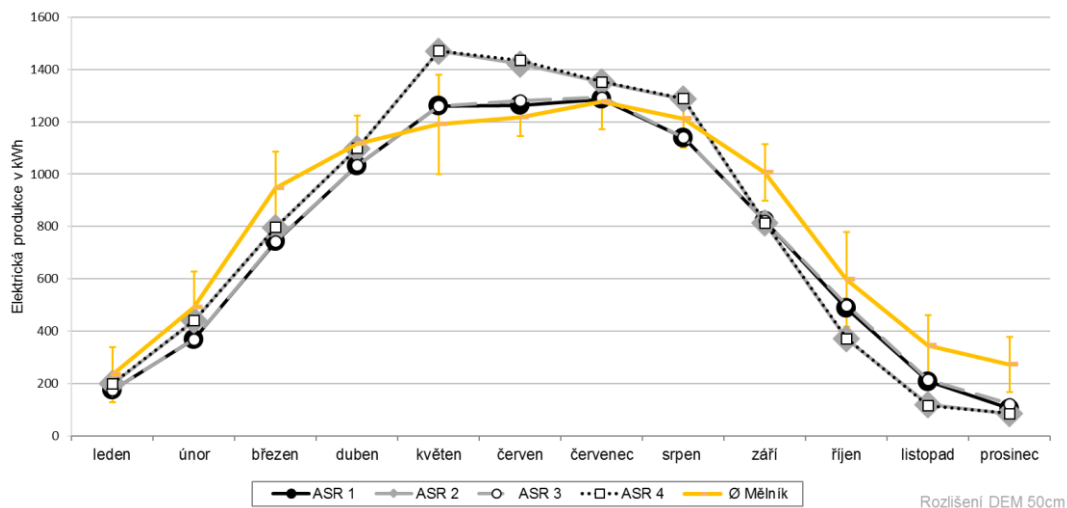
Následujícím krokem bylo zhodnocení nastavení nástroje ASR pomocí čtyř scénářů, viz kapitola 4.3. Výsledné hodnoty scénářů jsou uvedeny v Tab. 6 ve sloupcích ASR 1-4.

Výkon FV panelů	ASR 1	ASR 2	ASR 3	ASR 4	Ø Mělník
leden	175.50	198.94	175.61	199.74	234.00
únor	369.03	440.76	369.24	441.44	492.00
březen	743.20	796.63	743.62	797.72	947.00
duben	1033.49	1098.57	1034.05	1099.71	1115.00
květen	1260.64	1469.86	1260.95	1471.20	1190.00
červen	1263.91	1421.31	1281.79	1435.86	1218.00
červenec	1287.14	1351.73	1292.87	1352.92	1276.00
srpen	1140.45	1286.68	1140.99	1289.04	1212.00
září	820.94	813.68	821.40	814.66	1007.00
říjen	487.29	370.78	498.91	371.29	597.00
listopad	208.17	119.23	215.00	114.93	345.00
prosinec	103.82	84.06	122.23	85.35	273.00
Celkem	8894	9452	8957	9474	9906

Tab. 6 Modelovaný výkon elektrické energie (kWh) dle jednotlivých scénářů

Z tabulky je patrné, že změna rozlišení sluneční mapy, mapy oblohy a výpočetních směrů ovlivnila vypočtené množství solární radiace minimálně. Měsíční hodnoty při vyšším rozlišení vycházely při ponechání výchozího nastavení atmosférických parametrů průměrně o 5.3 kWh vyšší, při změně atmosférických

parametrů o 1.8 kWh vyšší. Největší vliv měla změna atmosférických parametrů, viz Obr. 15.



Obr. 15 Grafické znázornění modelovaných scénářů ASR

Při změně atmosférických parametrů pro každý měsíc došlo k výraznému nahodnocení výroby elektrické energie v měsíci květnu a červnu. V říjnu, listopadu a prosinci zase došlo k silnému podhodnocení dat. Celkově se však odhad elektrické produkce jednotlivých měsíců ve scénáři ASR 2 a ASR 4 nejvíce blížil naměřeným hodnotám.

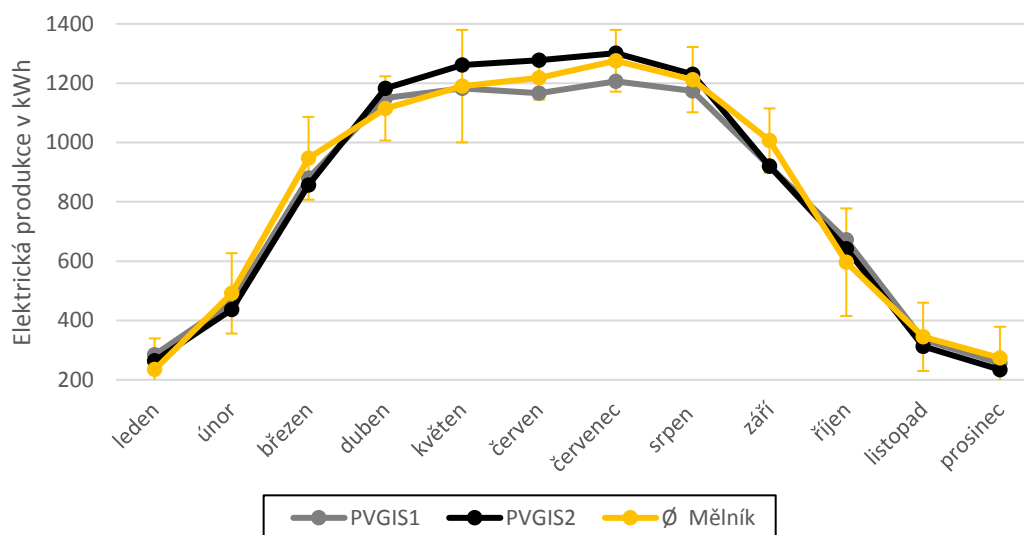
5.2.2 PVGIS

Modelované hodnoty měsíční výroby elektrické energie získané dle vztahu uvedeném v kapitole 4.5 jsou zobrazeny v následující tabulce (Tab. 7) ve sloupcích PVGIS1-2.

Měsíc	PVGIS1	PVGIS2	Ø Mělník
leden	284	264	234
únor	462	437	492
březen	881	857	947
duben	1151	1182	1115
květen	1182	1262	1190
červen	1166	1278	1218
červenec	1206	1301	1276
srpen	1174	1230	1212
září	920	920	1007
říjen	672	642	597
listopad	336	313	345
prosinec	256	234	273
Celkem	9691	9921	9905

Tab. 7 Porovnání odhadu elektrické produkce dle serveru PVGIS

Jak je patrné z Tab. 7, jsou odhady vypočtené serverem ve všech měsících velmi blízké průměrnému měsíčnímu výkonu FV panelů, viz Obr. 16.



Obr. 16 Grafické znázornění porovnání odhadu výroby elektrické energie ze serveru PVGIS s naměřenými hodnotami

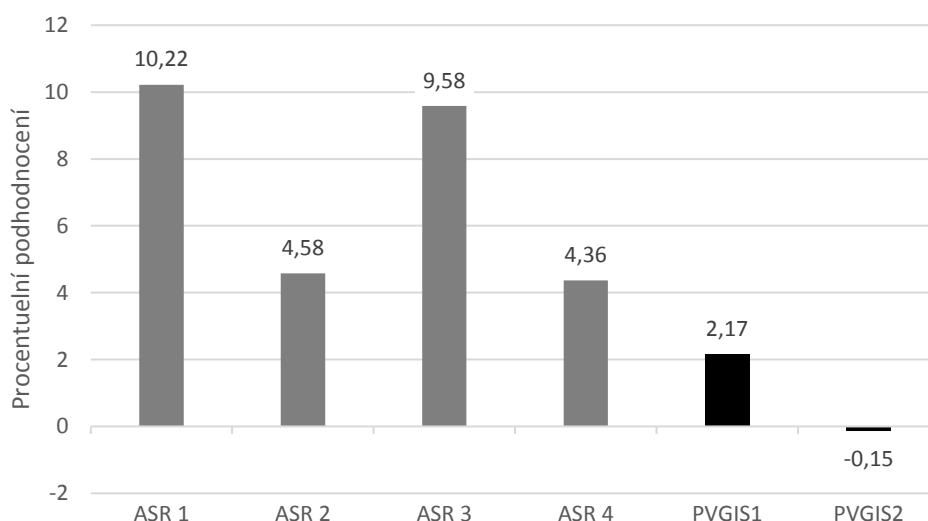
5.1 Statistické zhodnocení

Modelované odhady elektrické produkce byly porovnány s průměrem naměřených hodnot pomocí párového t-testu, viz Tab. 8. Statisticky významný rozdíl byl zjištěn pro ASR 1 a ASR 3. Při změně atmosférických parametrů ve scénářích ASR 2 a ASR 4 se odhadovaná výroba blížila výrobě naměřené a nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl, stejně jako u obou odhadů PVGIS.

	Hodnota testovací statistiky	p-hodnota
ASR 1	-3.27410	0.007411
ASR 2	-0.77315	0.455700
ASR 3	-3.03950	0.011260
ASR 4	-0.72558	0.483200
PVGIS 1	-1.23490	0.242600
PVGIS 2	0.07142	0.944300

Tab. 8 Výsledky párového t-testu

Z porovnání odhadů modelů je patrné, že bližších hodnot nabývají hodnoty získané ze serveru PVGIS. V případě všech scénářů modelu Solar Analyst dochází k ročnímu podhodnocení, viz Obr. 17.



Obr. 17 Grafické znázornění ročního podhodnocení odhadů

V případě modelu Solar Analyst došlo k téměř polovičnímu snížení podhodnocení při změně atmosférických parametrů pro každý měsíc (z cca 10 % na cca 4.5 %). Roční hodnoty byly získány sečtením odhadované měsíční produkce získané změnou atmosférických parametrů pro každý měsíc. Dále byla testována možnost výpočtu solárního potenciálu pro celý rok s roční hodnotou atmosférických parametrů, viz Tab. 3. Bylo zhodnoceno, že při zvolení nastavení nástroje podle scénáře ASR 4 model vypočítal množství roční solárního potenciálu podobně jako v případě součtu měsíčních odhadů, ale dosáhl lehce nižšího podhodnocení (4%).

Při využití databáze PVGIS s modelem r.sun byly získány velmi blízké hodnoty od nízkého podhodnocení 2.2 % k nadhodnocení 0.15 %. Dále byly porovnány hodnoty měsíční průměrné výroby elektrické energie (kWh) ze serveru PVGIS, kdy server počítá defaultně se ztrátami systému čtrnáct procent a výkon podhodnocuje (o 17%), pouze při zadání nulových ztrát se blížil hodnotě PVGIS1 (1.6%).

6 Diskuze

Pro výpočet solárního potenciálu byly použity dva modely. V prvním případě se jednalo o nástroj Area Solar Radiation, u kterého byl nejprve posouzen vliv rozlišení. Pro vyhodnocení bylo nutné vytvořit digitální model povrchu. Pro jeho získání byla zvolena fotogrammetrická metoda Structure from Motion a fotografie byly zpracovány v programu Agisoft PhotoScan. Westoby et al. (2012) zhodnotili metodu SfM jako levný, účinný a flexibilní přístup k zachycení komplexní topografie. V této práci se metoda osvědčila a byl získán digitální model střechy s vysokou přesností. Stěny domu ale nebyly z důvodu překrytí střechou při přeletu dostatečně nasnímané, viz Obr. 8. Pro vyhodnocení solárního potenciálu na povrchu fasád by bylo nutné nalétnutí a zpracování dat přehodnotit.

Bodové mračno bylo z programu Agisoft PhotoScan vyexportováno v podobně digitálního výškového modelu a ten byl v prostředí ArcGIS převeden do rozlišení 1.8 cm, 7.4 cm, 15 cm, 25 cm, 50 cm, 75 cm a 100 cm. Bylo zhodnoceno, že rozlišení na modelovaný odhad významný vliv nemá, a že meziroční změny atmosférických podmínek ovlivňují vypočtené množství solárního potenciálu výrazně více než přesnost vstupního digitálního modelu povrchu. Ke shodnému závěru dospěli i Ruiz-Arias et al. (2009), kteří při porovnání citlivosti modelů na rozlišení DMT zhodnotili, že Solar Analyst je vstupujícím rozlišením málo ovlivněný. Jediný případ, kdy došlo v této práci k mírně odlišnému odhadu, bylo při nejnižším rozlišení 1.8 cm, kdy model solárního potenciálu nejvíce podhodnotil. Dle Zink et al. (2015) je to způsobeno tím, že vysoká přesnost rozlišení způsobuje falešné odhady sklonitosti, a proto autoři doporučují práci s rozlišením alespoň 25 cm. Doba výpočtu se pro jednotlivá rozlišení velmi lišila, ale testované rozlišení modelovaný solární potenciál prakticky neovlivnilo. Dostačující přesnosti k identifikaci prvků střechy lze dosáhnout i s rozlišením 50 cm, které je z hlediska výpočetního času málo náročné a je vhodným kompromisem.

Půlmetrové rozlišení bylo využito pro vyhodnocení vlivu vstupního nastavení nástroje ASR dle čtyř scénářů. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při upřesnění atmosférických parametrů, ale i v tom případě došlo k celkovému podhodnocení roční elektrické produkce o cca 4 %. Tomu odpovídá závěr studie Ruiz-Arias et al. (2009), kteří při porovnání modelovaného solárního potenciálu s hodnotami z pyranometrů vyhodnotili, že Solar Analyst obecně podhodnocuje pozorované ozáření. Dále uvádí, že na rozdíl od Solar Analyst, odhad modelu r.sun dosáhne shody s naměřenými hodnotami s nízkým podhodnocením. To je v souladu

s výsledky této práce, kdy byl využit model r.sun v rámci serveru PVGIS a dosáhl od 2.2 % podhodnocení k 0.15 % nadhodnocení. Při využití měsíční průměrné výroby elektrické energie (kWh) vypočítané serverem PVGIS je doporučeno zadat nulové ztráty systému místo výchozích čtrnácti procentních.

Odhad PVGIS dosáhl velmi dobré shody s hodnotami naměřenými fotovoltaickými panely a zájemci o instalaci střešních solárních systémů může server poskytnout konkrétní představu o možnostech využití střechy domu a usnadnit proces rozhodování. Nicméně je limitován rozlišením 1 km. Model Solar Analyst celkově podhodnotil elektrickou produkci, ale i přes to dosáhl dobrých výsledků a je vhodný pro modelování solárního potenciálu. V zastavěném území bude díky podrobnějšímu digitálnímu modelu lépe reagovat na okolní zastínění a pravděpodobně dosáhne přesnějších výsledků. Hlavní výhodou modelu Solar Analyst je vytvoření rastru slunečního záření, s jehož pomocí je snadné určit vhodné plochy k instalaci solárních systémů.

Návratnost investice na studijním území je odhadována na 10 let. Krátkému časovému úseku vděčí majitel střešní elektrárny vhodné orientaci a sklonu střechy díky promyšlenému plánování při stavbě domu a včasné investici. Firma Siliken vyrábějící solární panely typu 60P6L 230 Wp zaručuje alespoň 90 % minimálního výstupního výkonu poskytnutého FV panely po dobu 10-ti let, a poté alespoň 80 % minimálního výstupního výkonu po dobu 25-ti let. V průběhu sledovaných sedmi let nedošlo k výraznému poklesu elektrické výroby.

7 Závěr

Odhad solárních modelů byl ověřen pomocí naměřených hodnot elektrické produkce fotovoltaických panelů instalovaných na střeše rodinného domu ve Středočeském kraji. Digitální model povrchu byl vytvořen pomocí fotogrammetrické metody SfM v programu Agisoft PhotoScan a následně byl zpracován v prostředí ArcGIS. Při testování vlivu vstupního rozlišení na modelovaný odhad byla zjištěna minimální citlivost modelu Solar Analyst a pro dosažení kompromisu mezi přesností modelu a výpočetním časem je doporučeno pracovat s rozlišením 50 cm.

Studie prokázala, že oba modely odhad solárního potenciálu podhodnocují. Pro model Solar Analyst byly zhodnoceny čtyři scénáře lišící se nastavením nástroje Area Solar Radiation. Při výchozím nastavení atmosférických parametrů se jednalo o cca 10 % podhodnocení a při změně atmosférických parametrů o cca 4.5 %. Je proto doporučeno s atmosférickými parametry pracovat. V případě modelu r.sun použitého prostřednictvím databáze PVGIS se jednalo o nižší podhodnocení, konkrétně o 2.2 % pro parametry střechy a při optimalizaci sklonu a azimutu střechy dokonce o nadhodnocení 0.15 %.

Celkově dosáhly testované modely dobrých výsledků a jsou vhodné pro odhad solárního potenciálu. Server PVGIS je ideální pro vypočtení množství solárního potenciálu a je snadno využitelný běžným uživatelem internetu. Nespornou výhodou serveru PVGIS je využití zabudované databáze klimatu a prakticky nulové náklady. Práce s nástrojem Area Solar Radiation je složitější a časově náročnější, ale v případě dostupného digitálního modelu povrchu s dostatečnou přesností je pro uživatele znalého prostředí ArcGIS bezproblémová. Díky tvorbě rastru slunečního záření je snadné identifikovat vhodné plochy k instalaci solárních systémů, a nástroj je proto vhodný k tvorbě solárních katastrů měst. Závěry této práce jsou založené na analýze uvedeného studijního území a k jejich ověření je nutné studii provést na dalších lokalitách.

Přehled literatury a použitých zdrojů

- Agugiaro G., Nex F., Remondino F., De Filippi F., Droghetti S. et Furlanello C., 2012:** Solar radiation estimation on building roofs and web-based solar cadastre. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume I-2*, 1049–1076.
- Bambulová I., 2013:** Analýza využitelnosti solární energie v městské zástavbě. *Diplomová práce*, Praha, ČVUT, 2013.
- Becchio C., Corgnati S.P., Delmastro C., Fabi V. et Lombardi P., 2016:** The role of nearly-zero energy buildings in the transition towards Post-Carbon Cities. *Sustainable Cities and Society*, vol. 27, 324–337.
- British Petroleum, 2016:** *Statistical Review of World Energy*.
- EU, 2010:** Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU o energetické náročnosti budov (přepřevzetí).
- Eurostat, 2016:** Renewable energy in the EU Share of renewables in energy consumption in the EU rose further to 16% in 2014, online: <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/7155577/8-10022016-AP-EN.pdf/38bf822f-8adf-4e54-b9c6-87b342ead339>, cit.: 22.2.2017.
- Evropská rada, 2015:** Politiky Evropské unie: Energetika.
- Freitas S., Catita C., Redweik P. et Brito M.C., 2014:** Modelling solar potential in the urban environment: State of the art review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 915-931.
- Fu, P. et Rich P.M., 1999:** Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales, Proceedings of the Nineteenth Annual ESRI User Conference.
- Hofierka J. et Šúri M., 2002:** The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. *In Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference*.
- James M.R., Robson S., d'Oleire-Oltmanns S. et Niethammer U., 2017:** Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology*, 280, 51-66.

- Joint Research Centre, 2012:** Solar radiation (Europe) in PVGIS. *JRC' s Institute for Energy and Transport - PVGIS - European Commission*. Online: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/solres/solrespvgis.htm>, cit.:16. 10 2016.
- Kanters J., Wall M. et Kjellsson E., 2014:** The solar map as a knowledge base for solar energy use. 48, 1597 – 1606.
- Kodysh J. B., Omitaomu O. A., Bhaduri B. L. et Neish B. S., 2013:** Methodology for estimating solar potential on multiple building rooftops for photovoltaic systems. *Sustainable Cities and Society*, 8, 31–41.
- Marszal A.J., Heiselberg P., Bourrelle J.S., Musall E., Voss K., Sartori I. et Napolitano A., 2011:** Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*, 971-979.
- MPO, 2010:** Národní akční plán České republiky pro energii z obnovitelných zdrojů. Online:<https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/42577/47632/568798/priloha001.pdf>, cit. 20.9.2016.
- MŽP, 2014:** Nová zelená úsporám. Online: <http://www.novazelenausporam.cz/>, cit.: 18.8.2016.
- Pavelka K., 2009:** *Fotogrametrie 1*. Praha, ČVUT.
- Picek J., 2014:** Vizualizace digitálních modelů reliéfu vytvořených z dat leteckého laserového skenování. *Bakalářská práce*, Praha, UK, 2014.
- POLIS, 2012:** Identification and mobilisation of solar potentials via local strategies. Online: https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/polis_guidelines_english_en.pdf, cit.:14.8 2016.
- Ruiz-Arias J. A., Tovar-Pescador J. , Pozo-Vázquez D. et Alsamamra H., 2009:** A comparative analysis of DEM-based models to estimate the solar radiation in mountainous terrain, 1049–1076.
- UNEP, 2013:** Cities and buildings UNEP initiatives and projects. *UNEP- DTIE*, online: http://energies2050.org/wp-content/uploads/2013/09/2013-06-UNEP-Cities-and-buildings-activities_16-pages-GB.pdf, cit.: 15. 08 2016.
- Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J. et Reynolds J.M., 2012:** Structure from Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314.

Wiginton L.K., Nguyen H.T. et Pearce J.M, 2010: Quantifying rooftop solar photovoltaic potential for regional renewable. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34, 345–357.

Zink R., Camargo L. R. et Reidelstürz P., 2015: Photogrammetric Point Clouds for GIS-Based High-Resolution Estimation of Solar Radiation for Roof-Top Solar Systems. *Springer International Publishing*, 293-305.

Seznam obrázků

Obr. 1	Složky slunečního záření, upraveno	13
Obr. 2	Roční sluneční mapy	15
Obr. 3	Mapa oblohy	15
Obr. 4	Kombinace sluneční mapy s viditelnou oblastí (vlevo) a mapy oblohy s viditelnou oblastí (vpravo), (Fu et Rich, 1999)	16
Obr. 5	Schéma metody SfM (Westoby et al, 2012), upraveno	19
Obr. 6	Studijní lokalita	21
Obr. 7	Fotografie náletu zájmové oblasti	22
Obr. 8	Zobrazení point cloudu programem Trimble Real Works Viewer 10.2...24	
Obr. 9	Studijní oblasti s pozemními kontrolními body	25
Obr. 10	Použité rozlišení digitálních modelů na zájmové lokalitě	26
Obr. 11	Příklad výstupního rastru pro měsíc leden roku 2015	26
Obr. 12	Nastavení při využití modelu r.sun v rámci online databáze PVGIS	29
Obr. 13	Grafické znázornění elektrické produkce v zájmové oblasti	31
Obr. 14	Grafické znázornění doby výpočtu (s) ASR 4 pro všechna rozlišení	33
Obr. 15	Grafické znázornění modelovaných scénářů ASR	34
Obr. 16	Grafické znázornění porovnání odhadu výroby elektrické energie ze serveru PVGIS s naměřenými hodnotami	35
Obr. 17	Grafické znázornění ročního podhodnocení odhadů	36

Seznam tabulek

Tab. 1	Technická data bezpilotního letounu a fotoaparátu	23
Tab. 2	Nastavení nástroje ASR dle jednotlivých scénářů	27
Tab. 3	Měsíční hodnoty použitých atmosférických parametrů	28
Tab. 4	Elektrické produkce FV panely v zájmové oblasti	31
Tab. 5	Porovnání vlivu rozlišení na odhad výkonu FV panelů (kWh)	32
Tab. 6	Modelovaný výnos elektrické energie (kWh) dle jednotlivých scénářů ..33	
Tab. 7	Porovnání odhadu elektrické produkce dle serveru PVGIS	35
Tab. 8	Výsledky párového t-testu	36