

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
KATEDRA GEOINFORMATIKY A ÚZEMNÍHO
PLÁNOVÁNÍ

NEURČITOST MAP SOLÁRNÍHO POTENCIÁLU:
VLIV VSTUPNÍCH PARAMETRŮ MODELU
DIPLOMOVÁ PRÁCE

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

Diplomant: Bc. Petr Menšík

2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením Ing. Vítězslava Moudrého, Ph.D. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Praze 14. 4. 2015

.....



Česká zemědělská univerzita v Praze
Fakulta životního prostředí
Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Autor práce: Petr Menšík
Studijní program: Krajinné inženýrství
Obor: Krajinné inženýrství

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

Název práce: **Neurčitost map solárního potenciálu: Vliv vstupních parametrů modelu**

Název anglicky: **Uncertainty of solar potential maps: Influence of input parameters values**

Cíle práce:
- Rešerše existujících studií - shmutí, zda autoři uvádějí veškeré parametry modelu.
- Výpočet solárního potenciálu střech několika urbanizovaných území s různým nastavením modelu
- Zhodnocení vlivu parametrů modelu na výsledné solární mapy

Metodika: Solární energie je považována za jeden z nejuhodnějších 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 dat leteckého laserového skenování a vhodných nástrojů GIS. Řešitel zpracuje literární rešerši z oblasti modelování solárního potenciálu, přičemž se zaměří na použité nástroje, data a úplnost s jakou autoři uvádějí informace o použitých modelech. S využitím volně dostupných dat leteckého laserového skenování stanoví řešitel solární potenciál několika menších obcí a volbou různého nastavení modelu posoudí vliv jednotlivých parametrů na výsledné solární mapy.

Doporučený rozsah práce: 40 - 60 stran.

Klíčová slova: Formulace klíčových slov je úkolem autora.

Doporučené zdroje informací:

1. Brito, M. C., Gomes, N., Santos, T., and Tenedório, J. A., 2012. Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data. *Solar Energy*, 86(1), 283-288.
2. Fu, P. and Rich, P., M. 1999. Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. Proceedings of the 19th Annual ESRI User Conference, San Diego, USA, <http://www.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap867/p867.htm>.
3. 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.
4. Lukač, N., Žlaus, D., Seme, S., Žalik, B. and Štumberger, G., 2012. Rating of roofs surfaces regarding their solar potential and suitability for PV systems, based on LiDAR data. *Applied Energy*, 102, 803-812.
5. Tooke, T. R., Coops, N. C., Voogt, J. A. and Meitner, M. J., 2011. Tree structure influences on rooftop-received solar radiation. *Landscape and Urban Planning*, 102(2), 73-81.

Předběžný termín obhajoby: 2015/06 (červen)

Elektronicky schváleno: 23. 3. 2015
Ing. Petra Šimová, Ph.D.
Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno: 26. 3. 2015
prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.
Děkan

Abstrakt

Ideálním způsobem výroby energie z obnovitelných zdrojů v urbanizovaných územích jsou střešní fotovoltaické systémy. Všechny střechy ale nejsou vhodné pro jejich umístění. Solární potenciál střech je potřeba znát. Nástroje implementované do geografických informačních systémů umožňují solární potenciál modelovat, mezi nejpokročilejší a nejpoužívanější patří Solar Analyst. Tento model vyžaduje určitá vstupní data a nastavení parametrů, které ovlivňují výpočet a tím i výsledné solární mapy. Mnoho možností parametrizace modelu vede k neurčitosti jednotlivých solárních map. Cílem práce je analyzování vlivu jednotlivých parametrů na výsledky za účelem odhalit možnou míru neurčitosti solárních map prezentovaných autory odborné literatury. A dále usnadnit rozhodnutí ohledně parametrizace modelu při modelování solárního potenciálu pro další území. Výsledky ukazují, že některé parametry ovlivní výsledky zanedbatelně a některé zásadně a také, že by neměli být nastavovány nahodile. Tedy u solárních map prezentovaných v odborné literatuře by mělo být uvedeno zvolené nastavení parametrů, aby byly vhodné pro využití jako podklady pro aplikace střešních solárních systémů.

Klíčová slova

Sluneční záření, solární potenciál, střešní fotovoltaické systémy, Solar Analyst, parametry

Abstract

Rooftop photovoltaic systems are the ideal way to produce energy from renewable sources in urban areas. However, all roofs are not suitable for their placement. Solar potential of roofs should be known. Tools implemented in geographic information systems allow modeling solar potential, between the most advanced and most used belongs Solar Analyst. This model requires some input data and parameters affecting the calculation and thus the results in the form of solar maps. Many options parameterization of this model leads to uncertainty individual solar maps. The aim is to analyze the impact of different parameters on the results for the purpose to uncover the degree of uncertainty solar map presented by the authors of professional literature. A further facilitate decisions regarding the parameterization of the model in modeling the solar potential for further territory. The results indicates that some parameters affect the results negligibly and some significantly and also that they should not be set randomly. Thus, solar maps presented in the literature should include selected parameters, allowing them to be used as a basis for application rooftop solar systems.

Keywords

Solar radiation, solar potential, roof photovoltaic systems, Solar Analyst, parameters

Obsah

1	Úvod.....	7
1.1	Formulace cílů práce.....	9
2	Literární rešerše	10
2.1	Dopadající záření	10
2.1.1	Faktory ovlivňující množství dopadajícího záření	10
2.1.2	Způsoby predikce dopadajícího záření	14
2.2	Solar Analyst	16
2.2.1	Výpočet slunečního záření	19
2.2.2	Parametry modelu	23
2.2.3	Odhad vlivu nastavení parametrů	28
2.2.4	Parametry ke zkoumání	29
2.3	Nastavení parametrů autory odborné literatury	30
3	Metodika	32
3.1	Vstupní data.....	32
3.1.1	Topografie	32
3.1.2	Atmosféra	33
3.2	Zvolený postup a nastavení parametrů	34
3.2.1	Příprava dat	34
3.2.2	Nastavení parametrů	34
3.2.3	Hodnocení výsledků	36
4	Výsledky.....	38
4.1	Scénář 1.....	38
4.1.1	Vizuální vyhodnocení	38
4.1.2	Statistické vyhodnocení.....	40
4.2	Scénář 2.....	41
4.2.1	Vizuální vyhodnocení	41
4.2.2	Statistické vyhodnocení	43
4.3	Scénář 3.....	44
4.3.1	Vizuální hodnocení	44
4.3.2	Statistické hodnocení	46

4.4	Scénář 4.....	47
4.4.1	Vizuální hodnocení.....	47
4.4.2	Statistické vyhodnocení.....	50
5	Mapa solárního potenciálu pro vybraná území.....	52
6	Diskuse.....	54
6.1	Zvolený postup.....	54
6.2	Vliv parametrů.....	54
6.2.1	scénář 1.....	54
6.2.2	Scénář 2.....	55
6.2.3	Scénář 3.....	55
6.2.4	Scénář 4.....	55
6.2.5	Celkové vyhodnocení.....	56
6.3	Srovnání výsledků s naměřenými daty.....	57
6.4	Srovnání výsledků s odbornou literaturou.....	57
7	Závěr.....	60
8	Zdroje.....	61

1 Úvod

Během posledních dvou století došlo k významnému zvýšení tempa růstu světové populace a úrovně industrializace společnosti, což se projevuje dramatickým růstem poptávky po energiích, která je uspokojována spalováním fosilních paliv. Intenzivní využívání těchto zdrojů je doprovázeno negativními dopady na životní prostředí. Alternativou výroby energie z fosilních paliv je výroba využitím obnovitelných zdrojů, která se v dnešní době postupně dostává do popředí zájmu z důvodu minimální zátěže životního prostředí, její nevyčerpatelnosti a rostoucí ekonomické efektivity. Vyřešení otázky zásobování lidské populace energií a potlačení negativních dopadů na životní prostředí při její výrobě a využívání, je ve 21. století největší výzvou pro lidstvo (Aguayo, 2013).

Mnoho měst ve světě si v současnosti postupně osvojuje politiku udržitelného rozvoje, včetně podpory využívání čisté energie získané z obnovitelných zdrojů, s cílem snížit závislost měst na fosilních zdrojích a směřovat jejich vývoj k vlastní energetické soběstačnosti. V prostředí urbanizovaného území je možné efektivně využít především energii slunečního záření zachycenou prostřednictvím fotovoltaických panelů, které je možné instalovat přímo na střechy či části jednotlivých budov. Výhody této technologie spočívají v dostatečně nízkých uživatelských a investičních nárocích pro většinu domácností a v minimálních prostorových nárocích. Další předností je možnost spotřebovat energii v místě výroby a tím eliminovat ztráty při přenosu do vzdáleného místa. Vysoká úroveň využití střešních ploch jednotlivých budov pro výrobu solární energie pak může urbanizovaná území včetně komerčních a průmyslových zón transformovat na malé solární elektrárny (Kodysh, et al., 2013; Santos, et al., 2014).

Všechny střechy ale nedisponují solárním potenciálem dostatečným pro efektivní výrobu energie pomocí fotovoltaických panelů. Solární potenciál závisí na zdánlivém pohybu Slunce po obloze a vlastnostech atmosféry. V urbanizovaném a členitém území hraje velkou roli také efekt stínu, protože střechy budov mohou být zastíněny ostatními budovami, okolní vegetací a dalšími objekty. Dalším důležitým faktorem je specifický tvar střechy, konkrétně členitost, sklon a orientace jednotlivých částí střechy (Hofierka, et al., 2014; Freitas, et al., 2015).

Solární potenciál tedy závisí na různých faktorech a jejich vzájemné působení v prostoru je možné modelovat využitím specifických prostorových analýz. Analyzovat prostorová data a následně modelovat procesy v prostoru umožňují nástroje implementované do geografických informačních systémů. Nejpokročilejší modely berou v úvahu podstatné faktory, podporují vstup velmi podrobných topografických dat a tím umožňují poměrně přesnou predikci solárního potenciálu v takovém měřítku, které umožňuje přesně stanovit solární potenciál jednotlivých střech v rámci urbanizovaných území. Nejvyužívanější z těchto modelů jsou SRAD, Solei-32, r.sun a Solar Analyst implementovaný jako extenze do prostředí ArcGIS (Kodysh, et al., 2013; Freitas, et al., 2015).

V práci je věnována pozornost modelovacímu nástroji Solar Analyst z důvodu jeho velmi častého využití pro modelování solárního potenciálu v odborných pracích a případových studiích. Tento model vyžaduje vstup topografických dat a nastavení několika parametrů. Výstupem modelu jsou hodnoty dopadajícího záření ve watthodinách na povrch o ploše metr čtvereční. Model po spuštění provádí analýzu aplikováním algoritmu v určených časových krocích ze všech směrů přichozího záření do všech míst na povrchu (Fu, Rich, 1999, Santos, et al., 2011).

Manuál i nápovědy k nástroji Solar Analyst jsou snadno dostupné z webových stránek (Fu, Rich, 1999; ArcGIS help, 2015; ESRI, 2015). V nápovědách ani v manuálu není jednoznačně popsáno na základě jakých skutečností nastavovat hodnoty parametrů. Ideálně by měly být kalibrovány na základě měřených hodnot v terénu, ale k tomu dochází jen zřídka (Ruiz-Arias, et al., 2008; Bambulová, 2013). Dále není zřejmé jakým způsobem a jak výrazně nastavení jednotlivých parametrů ovlivní výsledné solární mapy. Navíc autoři odborné literatury, kde je využívám model Solar Analyst, často neuvádějí, jaké zvolili nastavení parametrů a je těžké odhadnout, do jaké míry mohou být výsledné solární mapy v těchto pracích chybné v případě špatné parametrizace modelu. Parametry umožňují úpravy algoritmu modelu, které se pak projeví ve výsledcích. Cílem práce je podrobně prostudovat vliv jednotlivých parametrů modelu na výsledný odhad solárního potenciálu.

1.1 Formulace cílů práce

1) Zjištění nastavení parametrů modelu Solar Analyst autory solárních map v odborné literatuře

Uvádějí autoři nastavení parametrů modelu?

Jaké nastavení parametrů modelu využívají nejčastěji?

Odůvodňují zvolené nastavení parametrů modelu?

2) Analýza vlivu jednotlivých parametrů zkoumáním odlišností solárních map vytvořených s různými nastaveními parametrů modelu Solar Analyst

Jak se nastavení jednotlivých parametrů projeví na výsledcích?

Jaké parametry mají zásadní vliv na výsledky?

Na základě jakých skutečností jednotlivé parametry nastavovat?

Mění se vliv parametrů na základě topografické členitosti území?

3) Vytvoření solární mapy pro vybraná území

2 Literární rešerše

2.1 Dopadající záření

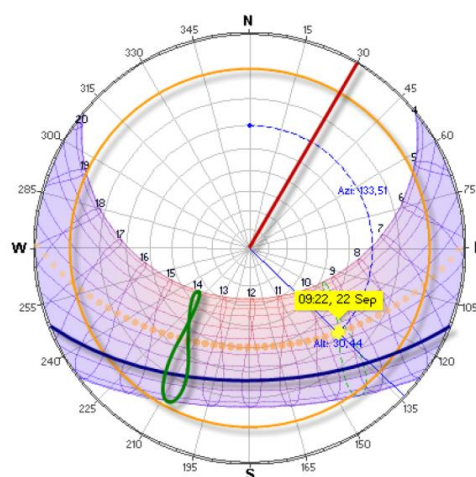
Slunce kontinuálně dodává na povrch planety Země energii ve formě elektromagnetického záření, tato energie je zdrojem většiny fyzikálních, chemických a biologických procesů. Mimo to, že sluneční energie umožňuje život na planetě, je také zásadní pro řadu lidských aktivit jako je zemědělství, lesnictví, stavebnictví (orientace a design budov), land-use, dále je důležitá v oblasti ekologie, klimatologie a v posledních desetiletích i pro výrobu energie. Nejen tyto odvětví potřebují pro svůj rozvoj znát skutečné hodnoty na povrch dopadajícího záření. Distribuce sluneční energie na zemském povrchu je však výrazně variabilní v čase i prostoru (Liu, et al., 2011).

2.1.1 Faktory ovlivňující množství dopadajícího záření

Vzájemné pohyby astronomických těles

Oběh planety Země kolem Slunce, rotace kolem vlastní osy a konstantní sklon ekliptiky zapříčiňují cyklické změny polohy Slunce vůči určitému bodu na povrchu Země. V důsledku těchto pohybů dochází v průběhu roku ke změnám délky dne, úhlu pod kterým dopadá sluneční záření a místo východu a západu Slunce nad obzorem. Tedy poloha Slunce vůči povrchu se v průběhu dne a roku cyklicky mění a pro každé místo na Zemi je poloha Slunce na obloze v čase specifická. Tyto vzájemné pohyby astronomických těles se odehrávají v předvídatelných cyklech a na základě standardních astronomických vzorců lze sestavit sluneční diagram, pro určité místo na povrchu (viz. ilustrace č. 1), který prezentuje přesnou dráhu Slunce po obloze (Fu, Rich, 1999; Redwik, et al., 2013).

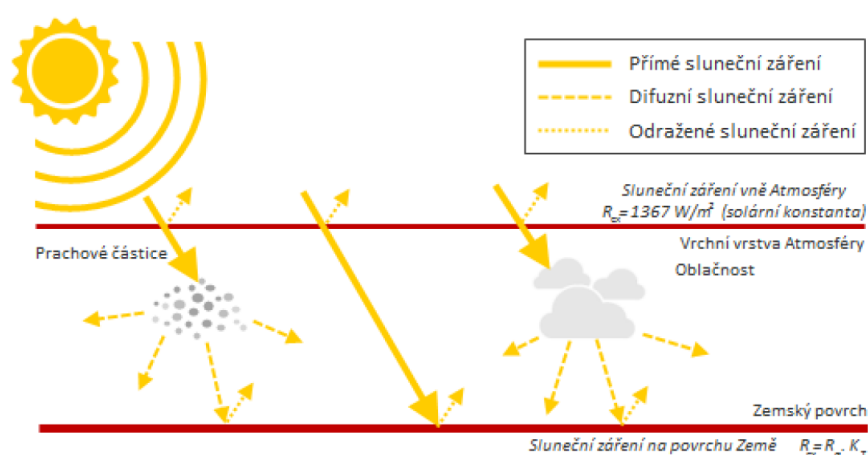
Ilustrace č.1 - Sluneční diagram, (Bambulová, 2013)



Atmosféra

Sluneční záření dosahující horní hranice atmosféry je poměrně konstantní a je označováno jako extraterestické. Hodnota tohoto záření mírně kolísá v závislosti na vzdálenosti Slunce a Země. Jeho průměrná hodnota je 1366.1 W/m^2 - solární konstanta. Toto záření dále prochází atmosférou směrem k povrchu Země a je více či méně redukováno a modifikováno v závislosti na atmosférických podmínkách. Množství záření, které pronikne atmosférou na povrch je ovlivněno silou ozonové vrstvy, délkou dráhy paprsku, přítomností páry a prachových částic v atmosféře (Julian, 2011).

Ilustrace č.2 - Průchod záření skrze atmosféru, (Bambulová, 2013)



Při průchodu záření atmosférou dochází ke třem základním atmosférickým procesům, které redukují a modifikují záření (viz. ilustrace č. 2). Jedná se o rozptyl, absorpci a odraz. K rozptylu dochází přesměrováním paprsku při střetu s částicemi v atmosféře. Při absorpci je záření částicemi v atmosféře pohlcováno a vyzařováno v jiném spektru, například jako teplo. Část záření je odražena od částic v atmosféře a od povrchu a nasměrována zpět do vesmíru nebo se stane součástí rozptýleného záření. Záření, které dopadá na povrch, je nazýváno jako terestrické záření, dosahuje nižších hodnot a má odlišné spektrálního složení než záření extraterestické. Terestrické záření se tedy v závislosti na interakcích v atmosféře rozděluje na tři základní složky, na přímé, difuzní a odražené záření (Freitas, et al., 2015). Přímé záření je ta část záření, která při průchodu atmosférou není ovlivněna rozptylem a přichází na povrch směrem ze slunečního disku. Část záření, která je rozptýlena, je označována jako difuzní záření a přichází ze všech směrů oblohy.

Součet přímého, difuzního a odraženého záření je označován jako globální sluneční záření. Podíl přímého a difuzního záření závisí právě na atmosférických podmínkách, kdy při jasné obloze tvoří difuzní záření přibližně jen 10% celkového záření a při zatažené obloze může představovat většinu záření dopadající na povrch. Odražené záření tvoří minimální část celkového záření (Ruiz-Arias, et al., 2008).

Existuje mnoho vlastností atmosféry, které je možné je měřit. Ohledně průchodu slunečního záření jsou velmi důležité vlastnosti v podobě propustnosti atmosféry, vyjadřující jaká část z extraterestického záření dosáhne povrchu, a difuzního poměru, který vyjadřuje jaká část z celkového záření při průchodu atmosférou difunduje. Propustnost atmosféry je odborně označovaná jako *clearness index* a poměr difuzního a celkového záření jako *diffuse ratio to normal global radiation*. Tyto charakteristiky jsou stejně jako atmosféra velmi dynamické a mění se v závislosti na klimatických podmínkách, aktuálním počasí i specifickém mikroklimatu místa (JRC, 2015; NASA, 2015).

Nejlepším způsobem jak tyto hodnoty zjistit je dlouhodobé měření v místě modelování solárního potenciálu, ale takováto data jsou velmi zřídka dostupná pro požadované území z důvodu málo častého měření těchto specifických charakteristik atmosféry a relativně nízké hustotě výskytu meteorologických a klimatických stanic (Dubayah, Rich, 1996). Hodnoty těchto specifických charakteristik je možné vypočítat z běžně měřených dat, ale to vyžaduje jistou znalost fyziky atmosféry a meteorologie. Možností je interpolace a extrapolace těchto naměřených charakteristik pro místo zájmu z nejbližších meteorologických stanic (JRC, 2015). Jednoduchou možností je využít defaultní hodnoty těchto parametrů nabízené modelem, ale zde se jedná o stabilní hodnoty bez vztahu k poloze území a ročního období, které neodpovídají reálné dynamice vlastností atmosféry.

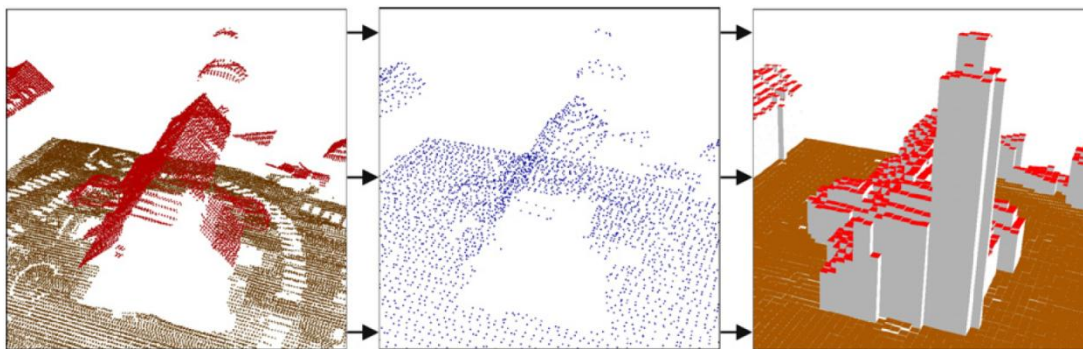
Topografie

Významným faktorem, který výrazně ovlivňuje dopadající záření, je tvar a konfigurace terénu a objektů v území. Mezi tyto faktory se řadí nadmořská výška, sklon a orientace povrchu a stín okolních objektů. Nadmořská výška ovlivňuje intenzitu záření, protože nižší nadmořská výška znamená delší cestu paprsku k povrchu a větší ztrátu energie. Sklon a orientace povrchu je také velmi zásadní, protože nejvíce energie záření dopadá na plochu v případě, že dopadá kolmo a když dojde k odklonu od kolmého úhlu, paprsek dopadá na větší plochu a intenzita dopadajícího záření výrazně klesá (Dubayah, Rich, 1996). S tím souvisí i redukující

vliv velikosti specifického povrchu. Na členitý povrch dopadá záření o menší intenzitě, protože se rozloží na větší plochu, než je půdorys objektu.

Zachycení průběhu povrchu určitého území vyžaduje naměřené výšky topografických prvků, které lze získat více způsoby z různých zdrojů. Získávání těchto dat měřením je v každém případě technologicky, časově i na náklady náročnou činností. Základními způsoby jsou geodetické zaměřování, zaměřování pomocí GPS, fotogrammetrie, stereografické snímkování, radarové snímání, a laserové snímání povrchu (*LiDAR - Light Detection and Ranging*). Jednotlivé způsoby se od sebe liší využívanými technikami, které poskytují data s odlišnou hustotou a přesností měření. V současné době je nejpokročilejším a nejefektivnějším způsobem snímání povrchu laserem, které je schopné zaznamenat polohu a výšku velkého množství bodů na malé ploše s vysokou přesností, v krátkém čase a s relativně malými náklady. Vysoká podrobnost dat umožňuje lépe postihnout topografický faktor v případě jeho vlivu na modelované procesy. (Oršulák, 2010)

Ilustrace č. 3 - Převod LiDARových dat do rastrové podoby, (Lukač, et al., 2013)



LiDARová data reprezentovaná mračnem bodů je nutné převést do formátu, který analýza vyžaduje. Podporované formáty vstupních dat se mohou pro jednotlivé nástroje lišit, ale pokročilé modely založené na geografických informačních systémech (*GIS*) využívají pro prostorové analýzy zejména rastrový datový formát. Topografická data obsahující informaci o výšce částí povrchu vyjádřenou hodnotou buňky rastru, se označují jako digitální výškové modely (*DEM*), modely reliéfu (*DRM*) a modely povrchu (*DSM*), dle prvků, které obsahují. Jde o datové typy převádějící naměřená prostorová data do struktury tvořené buňkami uvnitř rovnoměrně uspořádané mřížky. Způsob převodu je znázorněn ilustrací č. 3 (Lukač, et al., 2013; ArcGIS help, 2015).

2.1.2 Způsoby predikce dopadajícího záření

Měření

Hodnoty dopadajícího slunečního záření lze pro konkrétní místa dopočítat interpolací a extrapolací naměřených hodnot z meteorologických a klimatologických stanic. Tento postup poskytuje dostatečná data pro topograficky i klimaticky homogenní území bez členitostí a stínících objektů, ale s rostoucí členitostí a specifickostí území, přesnost odhadu významně klesá. Tento způsob predikování dopadajícího záření se zdá být využitelnou metodou v případě, že v okolí místa zájmu je vysoká hustota výskytu míst měření (přibližně 1000 km²/stanice). Takto prostorově husté měření by mohlo více méně postihnout lokální vlastnosti atmosféry a jejich dynamiku, ale stále by nebyly brány v úvahu topografické faktory (Ruiz-Arias, et al., 2008). V rámci tohoto odhadu je možné započítat vliv sklonu a orientace povrchu (střechy), ale ostatní faktory jako tvar a členitost povrchu a vlivy okolních objektů nejsou tímto způsobem postižitelné. Solární potenciál je potřeba znát zejména v rámci urbanizovaných území, která jsou významně členitá, a často se zde nacházejí nejrůznější umělé struktury a vegetace, které si mohou vzájemně stínit (Tooke, et al., 2011; Lukač, et al., 2013). Tento způsob by tedy pravděpodobně poskytoval zkreslené výsledky, které by nebraly v úvahu několik zásadních faktorů, a proto ho nelze považovat za efektivní. Množství a časoprostorová distribuce slunečního záření mohou být stanoveny také přímo z meteorologických geostacionárních satelitů, které kontinuálně snímají povrch, atmosféru a její vlastnosti z vesmíru. Tyto satelity ale snímají území velké rozlohy najednou a rozlišení výstupních dat disponuje jen velmi nízkým rozlišením, které je pro stanovení množství dopadajícího záření na střechy urbanizovaných území nevyužitelné. Navíc jsou často tyto odhady méně přesné než v případě pozemního měření, a to zejména při zatažené obloze (Ruiz-Arias, et al., 2008).

Vzhledem k vysokým nákladům na budování a správu meteorologických a klimatických stanic i satelitů, nízké přesnosti a rozlišení jejich výstupů, nejsou tyto způsoby považovány za optimální ani efektivní (Ruiz-Arias, et al., 2008). Přesto jsou často využívány veřejností i odborníky k predikci výkonů solárních systémů pro individuální budovy (PVGIS, 2015; PVWatts, 2015, EkoWATT, 2015) Někdy je pak možné sledovat nainstalované panely, které jsou v určitém čase či období více méně zastíněny vyčnívající částí střechy nebo okolními budovami a vegetací (REUK, 2015). Výkon solárních systému se pak může lišit od předpovědi a plánované energetické bilance budovy nemusí být dosaženo.

Modelování

První modely pro odhadování solárního potenciálu byly vyvinuty pro určité oblasti v USA společností National Renewable Energy Laboratory (NRELa, 2015), ale výsledné solární mapy nejsou využitelné pro aplikace střešních fotovoltaických systémů, protože jejich prostorové rozlišení je velmi nízké a navíc nepostihují lokální specifické charakteristiky (Kodysh, et al., 2013).

Modely s přesnějším odhadem solárního potenciálu byly vytvořeny jako nástroje implementované do geografických informačních systémů. Jedná se například o nástroje In My Backyard (NRELa, 2015), PVWatts (PWwatts, 2015) a CH2MHill (CH2M, 2015). Nicméně, tyto nástroje jsou zaměřeny pouze na posouzení jednotlivých budov a nejsou použitelné pro odhad dopadu slunečního záření v rámci více budov, protože neberou v úvahu specifický charakter okolí v podobě blízkosti jiných budov či stromů, které by mohli mít zásadní vliv na solární potenciál.

Významného pokroku ve vývoji modelů solárního záření bylo dosaženo v posledních dvou desetiletích rozvojem analytických, numericky simulačních, statistických a uměle inteligentních přístupů. Většina z těchto modelů ale vyžaduje velký počet empiricky stanovených parametrů, tedy modelování solárního potenciálu a jeho dlouhodobá predikce v místech, kde nejsou dostupná měření z meteorologických stanic, je velmi náročným úkolem (Kodysh, et al., 2013).

V posledním době bylo vyvinuto několik pokročilých modelů, které umožňují získat relativně přesné hodnoty dopadajícího slunečního záření na specifikovanou plochu, například SolarFLux, Solei-32, SRAD, r.sun a Solar Analyst (Bode, et al., 2014; Freitas, et al., 2015). Všechny tyto modely využívají topografické informace o zkoumaném území obsažené v digitálním modelu povrchu (*DEM*), což umožňuje algoritmům těchto modelů postihnout vlivy topografie území (Ruiz-Arias, et al., 2008).

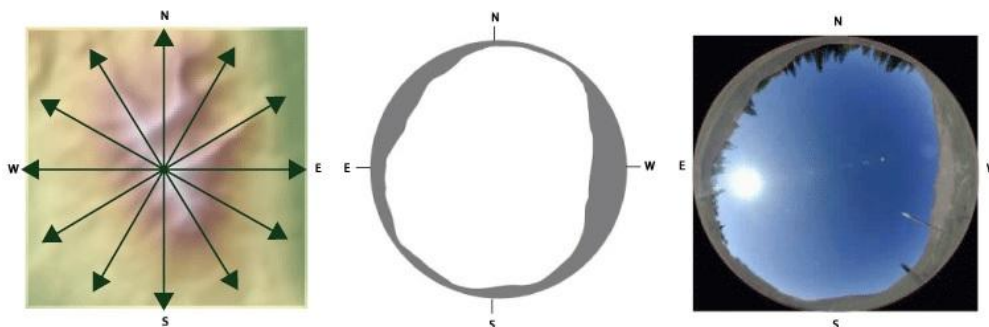
2.2 Solar Analyst

Tento model je implementovaný do prostředí ArcGIS jako extenze v rámci *Spatial Analyst*. Sada nástrojů *Solar Radiation* umožňuje aplikovat model jen pro určité body nebo pro celou plochu území, dále je možné generovat určité mezivýsledky výpočtu (ArcGIS help, 2015).

Princip modelu je založen na dvou algoritmech, ten první pomocí matematický vzorců postihuje vzájemné astronomické pohyby Slunce a Země a fyzikální podstatu chování záření při průchodu atmosférou a dopadu na povrch. Tento algoritmus je pak opakovaně aplikován pro všechny směry, ze kterých přichází záření vzhledem ke všem místům povrchu zkoumaného území v každém časovém kroku výpočtu (Fu, Rich, 1999).

Vzhledem k tomu, že první algoritmus modeluje proces závislý na vzájemné poloze prvků, kterými je definován, potřebuje před samotným výpočtem tuto prostorovou informaci znát. To je možné díky druhému hemisférickému algoritmu viditelnosti, který je jádrem této prostorové analýzy, protože umožňuje do výpočtu zahrnout vliv okolní topografie tím, že prvnímu algoritmu, který modeluje přicházející záření do určitého místa na povrchu poskytuje informaci o poloze a tvaru veškerých objektů v jeho okolí (Rich, et al. 1999). Toho je v principu dosaženo vygenerováním několika schémat v hemisférické projekci, které definují místa ze kterých, nebo na která se přicházející záření uplatňuje či nikoli. Konkrétně jde o mapu trasy Slunce po obloze, mapu oblohy a mapy jejich viditelnost pro všechna místa na povrchu. Jejich vzájemné překrytí pak umožňuje určit v jakém čase a odkud kam má být první algoritmus aplikován.

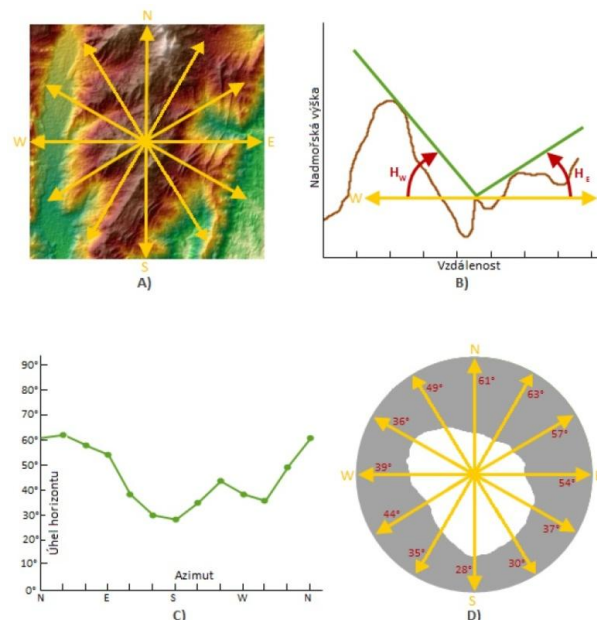
Ilustrace č. 4 - Hemisférický algoritmus viditelnosti "Rybí oko", (Rich, et al., 1999)



Výpočet mapy viditelnosti

Mapa viditelnosti je generována pro každou buňku vstupního rastru a znázorňuje jaká část oblohy je z daného místa viditelná či zakrytá okolními objekty. Jedná se o stejný princip jako u fotografie s rozsahem 180° orientované směrem k zenitu, což je zobrazení typu "rybí oko" (viz. ilustrace č. 4). Pro každý stanovený směr výpočtu je výsledkem úhel horizontu, který znázorňuje maximální úhel zakrytí oblohy vzhledem k danému místu. Pro ostatní směry je úhel horizontu dopočítáván interpolací (viz. ilustrace č. 5). Následně jsou úhly horizontu z prostorové dimenze stereograficky projektovány na plochu, což vede ke vzniku kruhové mapy viditelnosti, kde je každé buňce rastru přiřazena hodnota 1 nebo -1 v závislosti na viditelnosti oblohy v daném směru.

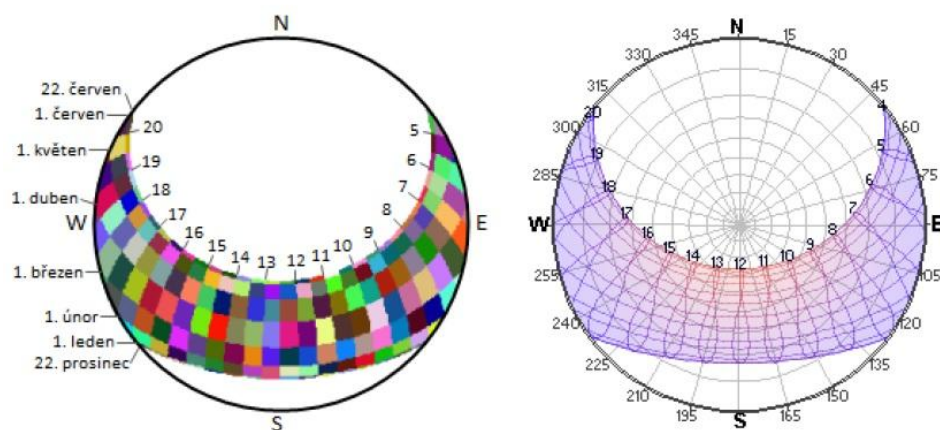
Ilustrace č. 5 - Tvorba mapy viditelnosti na základě hemisférického algoritmu viditelnosti, (Fu, Rich, 1999)



Výpočet mapy pohybu Slunce

Zdánlivý pohyb Slunce po obloze způsobuje, že přímé sluneční záření přichází během dne a roku z různých směrů oblohy. Sluneční mapa specifikuje trasu Slunce v průběhu času a je vytvořena na základě slunečního diagramu pro zvolené místo (viz. ilustrace č. 6) a je prezentována ve stejné hemisférické projekci jako mapa viditelnosti. Specifikované časové intervaly výpočtu odpovídají počtu sektorů sluneční mapy. Poloha Slunce v určitou dobu je vypočítána na základě zeměpisné šířky, dnu v roce a denní době, využitím standardních astronomických vzorců.

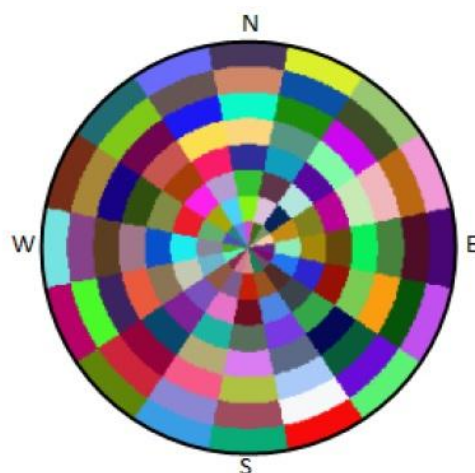
Ilustrace č. 6 - Tvorba Sluneční mapy na základě slunečního diagramu, (Fu, Rich, 1999)



Výpočet mapy oblohy

Na rozdíl od přímého záření, které přichází jen ze směru trasy Slunce, difuzní záření může přicházet na povrch ze všech směrů oblohy. Mapa oblohy se využívá v rámci výpočtu pro odhad dopadajícího difuzního záření na jednotlivé buňky rastru. Tato mapa je vytvořena rozdělením celé oblohy do sektorů definovaných zvoleným počtem rozdělení zenitových a azimutových úhlů (viz. ilustrace č. 7).

Ilustrace č. 7 - Tvorba mapy oblohy, (Kodysh, et. al., 2013)

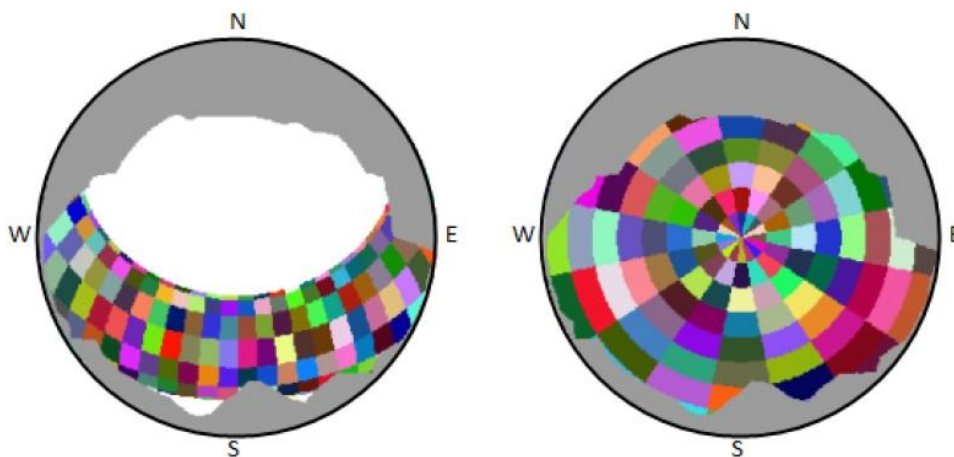


2.2.1 Výpočet slunečního záření

Není-li uvedeno jinak, kapitoly 2.2.1 a 2.2.2 jsou zpracovány dle Fu and Rich (1999), Ruiz-Arias, et al. (2008), Kodysh, et al. (2013) a ArcGIS hepl (2015)

Závěrečný výpočet modeluje množství dopadajícího globálního záření, respektive součet přímého a difuzního záření, pro každou buňku *DEM* pomocí překrytí map vytvořených v předchozích krocích (viz ilustrace č. 8). Přímé i difuzní záření přichází z nezakrytých částí oblohy dle mapy viditelnosti. Přímé záření přichází jen ze směru trasy Slunce nad obzorem na základě spočtené sluneční mapy a difuzní záření přichází ze všech sektorů na základě mapy oblohy. Odražené záření je v rámci tohoto modelu zanedbáváno. Podíl dopadajícího a přímého záření se liší dle atmosférických podmínek a poloze Slunce na obloze. V případě jasné oblohy a poloze Slunce vysoko nad horizontem, výrazně převládá přímé záření nad difuzním. V opačném případě může difuzní záření tvořit významnou část celkového dopadajícího záření. Když jsou některé sektory dle mapy viditelnosti zakryté jen částečně, velikost viditelné části je vypočítána jako podíl množství nezakrytých buněk a množství všech buněk sektoru.

Ilustrace č. 8 - Překrytí Sluneční mapy, mapy oblohy a mapy viditelnosti (Kodysh, et al., 2013)



Vzorce pro výpočet přímého slunečního záření

Pro každý sektor sluneční mapy, který není zcela překrytý je záření vypočítáno na základě viditelné části oblohy, pozice Slunce, atmosférických podmínek, orientace a sklonu povrchu na který záření dopadá. Tento výpočet využívá rovnice jednoduchého modelu šíření slunečního záření, kdy je extraterestické záření - solární konstanta, redukováno vlivem atmosférických efektů, konkrétně propustností, délkou dráhy paprsku skrze atmosféru a rozptylem (Fu, Rich, 1999; ArcGIS help, 2015).

$$\mathbf{Dirtot} = \Sigma \mathbf{Dir}_{\theta,\alpha}$$

Celkové množství přímého záření (**Dirtot**) dopadajícího na místo na povrchu je součtem množství záření ze všech viditelných sektorů sluneční mapy. Přímé záření z jednotlivých sektorů sluneční mapy je vypočítáno na základě zenitového a azimutového úhlu polohy slunce vůči povrchu.

$$\mathbf{Dir}_{\theta,\alpha} = \mathbf{SConst} * \tau \mathbf{m}(\theta) * \mathbf{SunDur}_{\theta,\alpha} * \mathbf{SunGap}_{\theta,\alpha} * \mathbf{cos}(\mathbf{AngIn}_{\theta,\alpha})$$

kde:

SConst je hodnota extraterestického záření - solární konstanta

τ je propustnost atmosféry pro nejkratší cestu paprsku slunečního záření (směrem k zenitu) pro všechny vlnové délky

$\mathbf{m}(\theta)$ je hodnota relativní optické délky trasy paprsku ze směru polohy Slunce od horní hranice atmosféry k povrchu vztažená k nejkratší cestě paprsku slunečního záření. Což je dáno zenitovým úhlem vyjadřující polohu Slunce vzhledem k povrchu a jeho nadmořskou výškou.

$\mathbf{SunDur}_{\theta,\alpha}$ je doba trvání slunečního svitu pro daný sektor sluneční mapy. Pro většinu sektorů odpovídá dennímu intervalu násobeného hodinovým intervalem. Pro sektory částečně zakryté (v blízkosti horizontu), je doba trvání svitu vypočítána s využitím sférické geometrie.

$\mathbf{SunGap}_{\theta,\alpha}$ je poměr viditelné plochy sektoru a jeho celkové plochy vypočítaný na základě překrytí mapou viditelnosti.

$\mathbf{AngIn}_{\theta,\alpha}$ je úhel dopadu paprsku mezi těžištěm sektoru sluneční mapy a povrchem

$$m = \text{EXP}(-0.000118 * \text{Elev} - 1.638 * 10^{-9} * \text{Elev}^2) / \cos(\theta)$$

kde:

m je relativní délka optické dráhy slunečního paprsku

θ je úhel polohy Slunce vzhledem k zenitu

Elev je nadmořská výška v metrech

$$\text{AngIn } \theta, \alpha = \text{acos}[\text{Cos}(\theta) * \text{Cos}(\text{Gz}) + \text{Sin}(\theta) * \text{Sin}(\text{Gz}) * \text{Cos}(\alpha - \text{Ga})]$$

kde:

AngInSky θ, α je poloha těžiště sektoru sluneční mapy vzhledem k místu na povrchu vyjádřená zenitovým a azimutovým úhlem

Gz a **Ga** je orientace povrchu vyjádřená zenitovým a azimutovým úhlem

Vzorce pro výpočet difuzního slunečního záření

Pro výpočet difuzního záření je možné využít *uniform diffuse model* nebo *standard overcast model*. Při využití uniformního modelu je hodnota přicházejícího difuzního záření stejná ze všech směrů oblohy. V rámci standardního zataženého modelu je hodnota difuzního záření různá v závislosti na zenitovém úhlu. Na povrch přichází difuzní záření je vypočítáváno pro těžiště každého sektoru oblohy, sjednocené v časovém intervalu a upraveno v závislosti na podílu viditelné části sektoru a úhlu pod kterým dopadá na povrch.

$$\text{Dif}_{\theta, \alpha} = \text{Rglb} * \text{Pdif} * \text{Dur} * \text{SkyGap}_{\theta, \alpha} * \text{Weight}_{\theta, \alpha} * \cos(\text{AngIn } \theta, \alpha)$$

kde:

Rglb je normální globální záření

Pdif je část normálního globálního záření, která je vlivem atmosféry rozptýlena. Typicky dosahuje hodnot přibližně 0.2 pro jasnou oblohu a 0.6 až 0.7 pro velmi zataženou oblohu

Dur je časový interval využitý pro analýzu

SkyGap θ, α je podíl viditelné a zakryté části sektoru oblohy

Weight θ, α je poměr hodnoty přicházejícího difuzního záření z jednotlivého sektoru vůči hodnotě ze všech sektorů

Angln θ, α je úhel mezi těžištěm sektoru mapy oblohy a povrchem, vyjádřený azimutovým a zenitovým úhlem

Rglb je vypočítán součtem přímého záření ze sektorů včetně zakrytých mapou viditelnosti bez započítání vlivu úhlu dopadu paprsku na povrch a následně převedený na podíl přímého záření, který se rovná **1 - Pdif**

$$\mathbf{Rglb} = (\mathbf{SConst} \Sigma (\tau m(\theta))) / (1 - \mathbf{Pdif})$$

V případě využití uniformního zataženého difuzního modelu oblohy je **Weight** θ, α vypočítán následně:

$$\mathbf{Weight} \theta, \alpha = (\cos\theta_2 - \cos\theta_1) / \mathbf{Divazi}$$

kde:

θ_1 a **θ_2** jsou úhly zenitu ohraničující sektor oblohy

Divazi je počet azimutálních sektorů v mapě oblohy

V případě využití standardního zataženého difuzního modelu oblohy je **Weight** θ, α vypočítán následně:

$$\mathbf{Weight} \theta, \alpha = (2\cos\theta_2 + \cos^2\theta_2 - 2\cos\theta_1 - \cos^2\theta_1) / 4 * \mathbf{Divazi}$$

Celkové difuzní záření pro danou lokalitu (**Diftot**) je vypočítáno jako suma difuzního záření (**Dif** θ, α) ze všech sektorů mapy oblohy:

$$\mathbf{Diftot} = \Sigma \mathbf{Dif} \theta, \alpha$$

Vzorce pro výpočet globálního solárního záření

Globální solární záření (**Globaltot**) je vypočítáno jako suma přímého a difuzního záření ze všech sektorů oblohy. Tento výpočet je opakován pro všechny buňku rastru povrchu, což vede k vytvoření mapy reprezentující hodnoty dopadajícího globálního slunečního záření v rámci celého analyzovaného území.

$$\mathbf{Globaltot} = \mathbf{Dirtot} + \mathbf{Diftot}$$

2.2.2 Parametry modelu

Přestože se algoritmus modelu Solar Analyst zdá poněkud složitější, je navržen tak, aby jeho použití bylo jednoduché. Nástroj vyžaduje nastavení několika vstupních parametrů, kdy uživatel nemusí mít rozsáhlé znalosti fyziky atmosféry a meteorologie. Přesto modelování dopadajícího záření využívá poměrně složité výpočty, které mohou zabrat několik hodin i dní v závislosti na velikosti území. Proto je potřeba model správně parametrizovat na základě požadované přesnosti výsledku a charakteru analyzovaného území (Fu, Rich, 1999; ArcGIS help, 2015).

Po otevření nástroje *Area Solar Radiation* je nejdříve potřeba vložit vstupní data v podobě *DEM* a model parametrizovat. Nastavované parametry lze rozdělit na 3 typy, základní, topografické a radiační. V první části, mimo vkládání vstupních dat a zadání názvu výsledné mapy dopadajícího globálního solárního záření, jsou nastavovány základní parametry definující zeměpisnou šířku středu území, rozlišení oblohy a časová konfigurace výpočtu. Další část parametrizace modelu je zaměřena na topografii, kde je nastavován *Z faktor*, výběr dat ze kterých model počítá orientaci a sklon povrchu, a počet směrů výpočtu mapy viditelnosti. V rámci poslední části parametrizace modelu je vyžadováno nastavení parametrů záření, konkrétně počet zenitových a azimutálních sektorů mapy oblohy, výběr typu difuzního modelu oblohy, zadání hodnot poměru difuzního záření k celkovému a propustnosti atmosféry. Dále je možné zvolit další výstupy solárních map v podobě dopadajícího přímého a difuzního záření a doby dopadajícího přímého záření.

2.2.2.1 Základní parametry a požadované datové vstupy a výstupy

Vstupní rastr (*Input raster*) - vkládá se digitální model povrchu (*DEM*) reprezentující polohu a nadmořskou výšku jednotlivých buněk, kdy jejich počet a velikost závisí na rozloze území a rozlišení rastru. Výpočet velkého území může trvat hodiny, výpočet velmi velkého území může trvat dny. To samé platí ohledně rozlišení vstupního *DEM*, kdy zvyšování rozlišení úměrně zvyšuje čas výpočtu. V zásadě jde o počet buněk rastru, protože algoritmus počítá dopadající záření pro každou buňku a vyšší počet buněk znamená delší čas výpočtu. Aby byl výpočet dostatečně přesný a v měřítku využitelném pro aplikace střešních solárních systémů, je potřeba, aby vkládaný *DEM* měl co nejvyšší možné rozlišení. Pro tyto účely není vhodné volit rozlišení *DEM* nižší než 1 metr (Kodysh, J. B., et al., 2013). Vzhledem k časové náročnosti výpočtu a požadavků na přesnost výsledků je vhodné modelovat dopadající záření pro malá území s vysokým rozlišením vstupního digitálního modelu povrchu.

Výstupní rastr dopadajícího globálního záření (*Output global radiation raster*) - tady nástroj vyžaduje zadat název výstupní solární mapy a místo uložení. Tento výstup je tedy solární mapa prezentující celkové množství dopadajícího globálního záření pro každou buňku vstupního *DEM*, přičemž data jsou typu "floating-point" (plovoucí desetinná čárka). Výsledné hodnoty jsou v jednotkách watthodin na metr čtvereční (Wh/m^2).

Zeměpisná šířka (*Latitude*) - vkládá se zeměpisná šířka území na základě které je vypočítána sluneční mapa prezentující zdánlivý pohyb Slunce po obloze vzhledem k určitému času a místu na planetě. Protože je analýza určena pro malé území, do modelu se vkládá jen jedna hodnota zeměpisné šířky středu celé zkoumané lokality. Nelze tedy najednou analyzovat velká území (regiony, státy, kontinenty), protože už rozdíl 1 stupně zeměpisné šířky znamená nezanedbatelnou odlišnost polohy Slunce na obloze vzhledem k místu v čase a výsledné modelované hodnoty záření se tak mohou výrazně lišit od skutečnosti. Pro analýzu širší geografické oblasti je nutné rozdělení území na části s různými zeměpisnými šířkami. V případě, že je do nástroje vkládán rastr digitálního modelu povrchu obsahující prostorové reference, zeměpisná šířka polohy území je vypočtena automaticky. V opačném případě je zeměpisná šířka nastavena na defaultní hodnotu 45° , kterou je pak následně nutné ručně nastavit dle polohy středu území.

Velikost oblohy (*Sky size*) - tato hodnota definuje rozlišení rastru vzniklého překrytím mapy viditelnosti, sluneční mapy a mapy oblohy. Výsledný rastr je stejně jako překryté mapy v hemisférické projekci bez geografického souřadnicového systému, kdy zadaná hodnota udává počet buněk při jedné straně oblohy. Buňky tohoto rastru jsou čtvercové a počet sloupců je roven počtu řádků. Model vypočítává dopad záření z každé buňky tohoto rastru na každou buňku *DEM*. Zvětšení hodnoty velikosti oblohy zvyšuje rozlišení oblohy a tím i přesnost a podrobnost výpočtu na úkor zvýšení doby výpočtu. Maximální hodnota velikosti oblohy je 10 000. Defaultní hodnota je 200 a je uváděná jako dostatečná pro výpočet s denními intervaly 14 dní a delšími. Hodnota 512 je doporučována pro výpočty komplexnějších území v případě, že čas výpočtu nehraje roli. Při volbě hodnoty velikosti oblohy je potřeba brát ohled na vztah velikosti oblohy a podrobnost sluneční mapy definovanou nastavením časového intervalu výpočtu. Protože nastavená velikost oblohy determinuje rozlišení sluneční mapy a v případě, že je nastaven malý časový interval výpočtu a nedostatečně vysoká hodnota velikosti oblohy, sluneční dráhy se mohou překrývat, což vede k nulovým nebo nižším hodnotám záření v rámci překryté dráhy (ArcGIS help, 2015). Takže při využití denního intervalu menšího než

14 dní je doporučeno použít vyšší než defaultní hodnoty velikosti oblohy. Například pro výpočet oslunění lokality poblíž rovníku s denním intervalem 1 den, je potřeba nastavit velikost oblohy minimálně na hodnotu 2800. Takže hodnota velikosti oblohy je nastavována na základě požadované přesnosti výsledku a zvoleného časového intervalu.

Časová konfigurace (*Time configuration*) - specifikuje délku období a časové intervaly pro které probíhá výpočet. Maximální délka období výpočtu je 365 nebo 366 dní (normální nebo přestupný rok). Rok výpočtu je specifikován právě z důvodu odlišení normálního a přestupného roku. V případě, že je první den počátku výpočtu kalendářně vyšší než poslední den, výpočet pokračuje do dalšího roku. V rámci specifikace doby výpočtu je možné nastavit celý rok s měsíčními intervaly, několik dní v roce, v rámci jednoho dne (úsek dne definovaný počáteční a konečnou hodinou) a 4 speciální dny (rovnodennost, letní a zimní slunovrat). Časový krok výpočtu je definovaný denním intervalem v průběhu roku a hodinovým intervalem v průběhu dne, které určují velikost a počet sektorů sluneční mapy. Denní interval je defaultně nastaven na hodnotu 14 dní, v případě výpočtu pro celý rok najednou je interval výpočtu 1 měsíc. Denní interval je tedy nastavován jen v případě výpočtu pro několik dní v roce, přičemž by neměl být kratší než tři dny, protože trasa pohybu Slunce po obloze se v rámci 3 dní více méně překrývá v závislosti na zvolené velikosti oblohy. Defaultní hodnota pro hodinový interval je 0.5 hodiny. V této části je také zaškrtnutím "*Create outputs for each interval*" možné vygenerovat solární mapu pro každý zvolený interval namísto solární mapy prezentující celkové množství dopadajícího záření za celé zvolené období.

2.2.2.2 Topografické parametry

Z faktor - slouží ke korekci nadmořské výšky obsažené v *DEM* v případě, že je vyjádřena v jiných jednotkách než se kterými model počítá, což jsou metry. Pro dosažení přesných výsledků je doporučováno aby hodnota Z (výška) byla ve stejných jednotkách jako X, Y (poloha). Když tyto jednotky nejsou stejné, je možné touto funkcí převést Z jednotky na X, Y jednotky. Dále je možné "*Z faktor*" využít, když jsou vložena data ve sférickém souřadnicovém systému, ke korekci nadmořské výšky území na základě zeměpisné šířky.

Vstupní data pro určení sklonu a orientace povrchu (*Slope and aspect input type*) - zde je možné zvolit, zda nástroj určuje v rámci výpočtu orientaci a sklon povrchu jednotlivých buněk z vloženého *DEM* nebo považuje povrch za vodorovnou plochu. Druhá možnost je zde z důvodu možnosti porovnání s měřenými daty ze senzorů měřící solární radiaci, které jsou obvykle ploché a vodorovně orientované.

Počítané směry (*Calculation direction*) - počet azimutálních směrů výpočtu souvisí s vytvářením mapy viditelnosti, jejíž přesnost může zásadně ovlivnit výsledky, protože určuje na která místa dopadá přímé záření a na která nikoli. Jde o přesnost obrysů objektů vrhajících stín. Vzhledem k tomu, že počet směrů pro které je mapa viditelnosti počítána není teoreticky omezen a může se blížit nekonečnu, úhly horizontu jsou počítány jen pro stanovený počet směrů. Úhly horizontu pro jiné směry jsou dopočítávány interpolací. Zadané hodnoty počtu směrů musí být násobkem 8 (8, 16, 24, 32 atd.). Hodnoty 8 nebo 16 jsou vhodné pro oblasti s málo členitou topografií, zatímco hodnota 32 je již vhodná pro členitá území. Potřebný počet směrů výpočtů také souvisí s rozlišením vstupního *DEM*, kdy při nízkém rozlišení (30 m) jsou hodnoty 16 a 32 dostatečné, ale v případě vyšších rozlišení *DEM* je nutné tuto hodnotu adekvátně zvýšit. Zvýšení počtu směrů poskytne přesnější výsledky, ale výpočet bude časově náročnější.

2.2.2.3 Radiační parametry

Zenitové a azimutové rozdělení (*Azimuth division, Zenit division*) - určuje počet sektorů mapy oblohy. Hodnoty počtu zenitového rozdělení musí být větší než 0 a menší než polovina velikosti oblohy. Hodnota počtu azimutového rozdělení musí být násobky 8, větší než 0 a menší než 160. Defaultní hodnota pro obě rozdělení je 8. Vyšší hodnoty znamenají vyšší variabilitu distribuce difuzního záření a tím i přesnější výsledky.

Typ difuzního modelu (*diffuse model type*) - zde je na výběr model uniformní oblohy nebo standardní zatažené oblohy. Rozdíl spočívá v tom, že v případě uniformního modelu, přichází difuzní záření ze všech sektorů mapy oblohy o stejné hodnotě a v případě druhého modelu oblohy se hodnota difuzního záření mění s úhlem zenitu. Defaultně je nastaven uniformní difuzní model.

Poměr difuzního záření (*Diffuse proportion*) - tato hodnota vyjadřuje jaká část celkového záření je při průchodu atmosférou rozptýlena. Rozsah hodnot je od 0 do 1, kdy typické hodnoty pro velmi jasnou oblohu jsou 0.2 a jasnou oblohu 0.3. Tato hodnota se liší v závislosti na lokalitě, klimatických podmínkách, roční době a počasí. Tato hodnota výrazně ovlivňuje množství přicházejícího difuzního záření na povrchu a tím časoprostorovou distribuci celkového modelovaného globálního záření.

Propustnost (*Transmittivity*) - jedná se hodnotu vyjadřující jaká část přímého záření projde atmosférou beze změny. Jde tedy o poměr množství záření na horní hranici atmosféry a množství, které dosáhne povrchu nejkratší cestou (směr k zenitu). Vzhledem k tomu, že algoritmus modelu koriguje výškové efekty, propustnost by měla být zadávána k výšce hladiny moře. Hodnoty jsou v rozsahu 0 až 1, kde 0 znamená, že skrze atmosféru neprojde žádné záření a hodnota 1 znamená, že projde veškeré záření. Obvykle pozorované hodnoty jsou 0,6 nebo 0,7 pro velmi jasnou oblohu a 0,5 pro jasnou oblohu. Stejně jako poměr difuzního záření, propustnost závisí na poloze lokality, klimatických podmínkách, roční době a počasí. Mezi difuzním poměrem a propustností je inverzní vztah. Hodnota propustnosti může zásadně ovlivňovat výsledky v podobě modelovaných hodnot dopadajícího přímého záření, které tvoří nejvýznamnější složku celkového globálního záření.

2.2.2.4 Volba dalších výstupů

Raster přímého záření (*Out direct radiation output*) - umožňuje vygenerování solární mapy znázorňující jen dopadající přímé záření

Raster difuzního záření (*Out diffuse radiation output*) - umožňuje vygenerování solární mapy znázorňující jen dopadající difuzního záření

Raster doby přímého záření (*Out direct duration raster*) - umožňuje vygenerování raster znázorňující dobu po kterou na určité místo dopadá přímé záření

2.2.3 Odhad vlivu nastavení parametrů

Na základě rovnic algoritmu nástroje Solar Analyst a popisu jednotlivých parametrů lze odhadnout jak jejich nastavení ovlivní hodnoty dopadajícího záření. Nastavené parametry buďto přímo vstupují do rovnic jako součinitelé nebo jmenovatelé, definují intenzitu jednotlivých částí výpočtu i celkového výpočtu, nebo v některých případech umožňují vybrat rovnici pro výpočet v rámci části algoritmu. Jednotlivé parametry mají v algoritmu různou váhu a jejich nastavení může výsledky ovlivňovat kvantitativním i kvalitativním způsobem. Výsledky se tedy při různém nastavení jednotlivých parametrů mohou lišit kvantitativně, kdy bude docházet ke změnám množství dopadajícího záření nebo kvalitativně, kdy se bude měnit časoprostorová distribuce dopadajícího záření. Avšak samostatné parametry mohou více či méně ovlivnit výsledky oběma způsoby, zejména v rámci sledovaných ohraničených ploch (střechy) v topograficky členitém území.

Složitější problematikou je porozumění tomu, jaké vztahy mají mezi sebou jednotlivé parametry. Protože jejich hierarchické a funkční postavení v algoritmu je různé, lze předpokládat, že některé parametry mohou zvyšovat nebo naopak snižovat vliv ostatních. Například zkracování časového intervalu výpočtu bez současného zvýšení intenzity výpočtu nepovede k přesnějším výsledkům, naopak může dojít k chybám způsobených překrytím slunečních drah v závěrečném výpočtu. Stejně tak pokud je počet sektorů mapy oblohy, definován určitými parametry, vyšší než počet sektorů pro které probíhá závěrečný výpočet, je počet sektorů mapy oblohy tímto redukován a vyšší hodnota parametru již na výsledky výpočtu nemá vliv. Mimo omezení, která si navzájem kladou některé parametry, mohou mít i vzájemný synergický efekt. Například zvýšení hodnoty počtu sektorů závěrečného výpočtu a výpočtu směrů mapy viditelnosti by mělo vést k přesnějším výsledkům, než v případě jejich zvyšování odděleně v různých analýzách, přestože definují podrobnost odlišných prvků, v rámci výpočtu spolu úzce souvisejí. Dále jsou zde i nezávislé parametry, které vstupují do algoritmu jako číselná hodnota, vyrušují některé části algoritmu nebo určují dobu výpočtu. Tyto parametry jsou nezávislé ve smyslu, že nemají limitující nebo synergický efekt vzhledem k ostatním parametrům, ale samozřejmě výsledné hodnoty dopadajícího záření jsou ovlivněny všemi parametry.

2.2.4 Parametry ke zkoumání

Na základě rešerše jsou identifikovány parametry, které reprezentují základní typy parametrů vzhledem k tomu jaký mají vztah k ostatním a jakým způsobem ovlivňují výpočet. Na tyto parametry je v práci zaměřena největší pozornost.

Parametr velikosti oblohy je dále zkoumán, protože determinuje výsledné rozlišení závěrečného výpočtu při překrytí sluneční mapy, mapy oblohy a mapy viditelnosti, které jsou definovány jinými parametry. Lze tedy tento parametr považovat za základní a více méně nadřazený ostatním. Dalším důvodem k výběru tohoto parametru je jeho významný vliv na dobu výpočtu, která je důležitým faktorem při volbě nastavení parametrů zejména při analýzách rozsáhlých území.

Parametr počtu směrů výpočtu mapy viditelnosti je vybrán z důvodu jeho přímého vztahu s členitostí topografie a objektů ve zkoumaném území. Tento parametr je vlastně jediný z topografických parametrů u kterého není předem naprosto zřejmý vliv.

Parametr definující denní časový interval výpočtu je dále zkoumán, protože definuje rozlišení sluneční mapy potažmo podrobnost trasy Slunce, ze které přichází přímé záření tvořící největší a nejzásadnější část celkového dopadajícího globálního záření. Tento parametr by tedy mohl mít nezanedbatelný vliv na množství nebo časoprostorovou distribuci dopadajícího záření.

Nastavení radiačních parametrů v podobě poměru difusního záření a propustnosti atmosféry bude sledováno z důvodu jejich postavení v algoritmu, kdy do rovnic vstupují přímo jako číselné hodnoty v rozmezí 0 až 1 a teoreticky tedy mohou mít významný vliv na množství i časoprostorovou distribuci dopadajícího záření. Což také znamená, že jejich špatný odhad by mohl negativně ovlivnit výsledný solární potenciál způsobem, který by vedl k významnému vzdálení modelovaných hodnot záření od hodnot reálných.

2.3 Nastavení parametrů autory odborné literatury

Další část rešerše se zabývá vyhledáváním volně dostupných prací, které se zabývají modelováním dopadajícího slunečního záření v urbanizovaných území s využitím modelu Solar Analyst a sledováním jaké autoři použily vstupní data a nastavení parametrů. Pro tyto účely jsou vybrány práce, kde je v závěru prezentována solární mapa určitého území, tedy případové studie modelování solárního potenciálu. Přínos těchto případových studií nemusí spočívat jen ve vytvoření mapy solárního potenciálu pro určité území, ale mohli by sloužit také jako manuál či vzorové práce, které by umožňovaly vytvořit solární mapu pro další území. Celkem bylo vyhledáno 17 případových studií. Výsledky této rešerše jsou prezentovány pomocí tabulky č.1, kde řádek odpovídá jednomu autoru a sloupce použitým datům a nastavení jednotlivých parametrů modelu Solar Analyst.

Tabulka č. 1 - Parametrizace modelu Solar Analyst autory případových studií

Studie	Využitá data			Základní parametry				Topografické parametry		Radiční parametry					
	Autor	Typ dat	Rozlišení dat	Rozlišení DEM	Sky size	Time config.	Day interval	Hour interval	Slope and aspect	Calculation direction	Zenit division	Azimuth division	Diffuse model type	Diffuse proportion	Transmittivity
MINGHETTI A., et al., 2011	CTC	contour lines in 2 and 10 meter				monthly									
DOROTHEA L., et al., 2009	LIDAR	point per 0.15 m			whole year	month	2								
SANTOS T., et al., 2014	LIDAR	point per 1 m				monthly							PVGIS	PVGIS	
WILL J., 2011	LIDAR	point per 0.32 m, elevation 0.6		200	whole year	month	0.17	DEM	32	8	8	uniform sky	0.3	0.5	
BAILANG Y., et al., 2009	LIDAR, infrared photographs	point per 0.44 m	1 m		monthly		0.017, 0.08, 0.17, 0.25, 0.5, 0.75, 1								
AQUAYO P. 2013	LIDAR	point per 0.12 m	0.7 m	200	whole year	month	0.5	DEM	32	8	8	uniform sky	Weather station	Weather station data	
CHOW A., et al., 2014	orthophotos and CAD data	point per 0.15 m, elevation	0.5 m												
CARL C., 2014	LIDAR	point per 2 m	2 m	200	whole year	month	0.5	DEM	32	8	8	standart overcast sky	0.3	0.5	
REDWEIK P., et al., 2013	LIDAR	point per 0.5 m	1 m												
BRANT D. C., 2014	LIDAR	point per 0.7 m		512											
LEITELT L. R., 2010	LIDAR		0.7 m		whole year		1						0.2	0.7	
NAKANISHI T., 2010	LIDAR	point per 0.69 m	2 m	1024	whole year	month	0.5	DEM	24						
BAMBULOVA I., 2013	3D model		0.2 m	400	monthly	month	0.5		80	24	24		PVGIS, weather	PVGIS, weather	
KODYSH, J. B., et al., 2013	LIDAR	point per 1 m, elevation 0.3 m	1 m	200	multiple days	14 days	0.5		32	8	8		0.3	0.5, Gaisma	
BRITO M.C., et al., 2010	LIDAR		1 m		monthly								PVGIS	PVGIS	
SANTOS T., et al., 2011	LIDAR		1 m		monthly										
BOEHNLEIN P., 2010	LIDAR			200	multiple days	14 days	0.5		64	8	8				

Tabulka ukazuje, že autoři případových studií často uvádějí typ a rozlišení vstupních dat, ale jen velmi zřídka uvádějí veškerá nastavení parametrů modelu. Když nastavení parametrů uvádějí, mnohdy chybí popis na základě čeho se rozhodly takto parametry nastavit. Až na jednu studii (Bailang, et al., 2009) se autoři nezabývají vlivem různého nastavení parametrů na výsledky, ale zde se jedná o změnu jen jednoho parametru, přičemž nastavení ostatních parametrů není uvedeno. Lze říci, že autoři se v pracích spíše zaměřují na přípravu vstupních dat, způsoby vyhodnocení a prezentování výsledků a vliv nastavení parametrů na výsledky zanedbávají. Ve většině případů autoři využívají defaultní nastavení modelu nebo náhodně zvýší hodnoty některých parametrů. Dalším nedostatkem těchto prací je, že autoři jen výjimečně srovnávají výsledky jejich solárních analýz s naměřenými daty.

Ani v literatuře od vývojářů modelu nelze najít uspokojující osvětlení toho jaké mají jednotlivé parametry vliv na výsledky. Srovnáním výsledků s různým nastavením parametrů se zabývají minimálně, kdy zkouší jen dvě až tři nastavení jednotlivých parametrů v malém rozmezí jejich hodnot. Vývojáři dospěli k závěru, že změna nastavení parametrů oproti defaultnímu nastavení modelu ovlivní výsledky zanedbatelně, jen v případě vyšší komplexnosti území doporučují parametry změnit způsobem, který by měl zvýšit přesnost výpočtu. Ale je potřeba říci, že vývojáři využívali pro analýzy digitální model povrchu s rozlišením 30 metrů (Fu, Rich, 1999), což je rozlišení pro urbanizované území a aplikace střešních fotovoltaických systémů naprosto nedostatečné (Kodysh, et al., 2013). Protože nízké rozlišení může limitovat vliv některých parametrů, při využití vstupních dat s rozlišením 1 metr a vyšším je těžké odhadnout, jak se vliv parametrů na výsledky projeví.

Vzhledem k výše uvedeným skutečnostem je tedy potřeba vyzkoušet různá nastavení parametrů modelu, a jednotlivé výsledky pak srovnávat mezi sebou, případně s naměřenými daty. To je však vzhledem k časové náročnosti analýzy a počtu kombinací nastavení parametrů velmi pracné a zdlouhavé (Bambulová, 2013).

3 Metodika

3.1 Vstupní data

Pro modelování dopadu slunečního záření za účelem analyzovat vliv nastavení parametrů modelu byla vybrána dvě území. První území je obec Macharen v Holandsku a druhé je Pec pod Sněžkou v České republice. Dvě území jsou pro účely práce zvolena z důvodu sledování toho, do jaké míry souvisí nastavení parametrů modelu s členitostí topografie daného místa. Macharen se nachází v nížinaté oblasti s prakticky rovným povrchem a Pec pod Sněžkou v horské topograficky členité oblasti a je zde předpoklad, že území s komplexnější topografií bude vyžadovat nastavení parametrů způsobem, který poskytuje přesnější výsledky.

3.1.1 Topografie

Vzhledem ke kvalitě a přesnosti jsou v této práci využita data z laserového snímání povrchu. Opatřená LiDARová data se pro obě území liší v hustotě měřených bodů a přesnosti snímání, kdy data z Holandska mají téměř dvakrát vyšší hustotu měřených bodů a třikrát vyšší přesnost. Do solární analýzy pak vstupuje rastr s rozlišením 0.5 metru pro obě území, což je hodnota která byla zvolena s ohledem na možnost porovnávání výsledků mezi jednotlivými lokalitami, časovou náročnost jednotlivých analýz a požadované měřítko výsledků poskytující dostatečně přesné výsledky, vhodné pro rozhodování ohledně aplikace střešních solárních systémů.

Macharen

Zkoumaná lokalita na území Holandska je čtvercového tvaru a má rozlohu 1 km². Souřadnice středu území jsou 51.80 stupňů zeměpisné šířky a 5.54 stupňů zeměpisné výšky. Obec má 615 obyvatel (SN, 2015) a 355 budov s celkovou plochou střech 55 757.65 m² a průměrnou plochou střechy 157.06 m². LiDARová data tohoto území jsou z roku 2011 a byla získána z geoportálu Actueel Hoogtebestand Nederland 2 (AHN, 2015). Tyto data se vyznačují vysokou hustotou měřených bodů, kde je změřeno 9 výškových bodů na m² s přesností 5 cm. Průřez těmito daty je vyobrazen ilustrací č. 9.



Pec pod Sněžkou

Lokalita na území České republiky je také čtvercového tvaru o rozměrech 1 km². Souřadnice středu území jsou 50.70 stupňů zeměpisné šířky a 15.73 stupňů zeměpisné výšky. Obec má celkem 630 obyvatel (ČSÚ, 2015), 136 budov s celkovou plochou střech 39 259.82 m² a průměrnou plochou střechy 288.68 m². Data LiDAR jsou z roku 2012 a byla poskytnuta správou Národního parku Krkonoše (KRNAP, 2015). Hustota měření výškových bodů v rámci těchto dat je 5 výškových bodů na m² s přesností 15 cm.

3.1.2 Atmosféra

Další vstupy požadované modelem jsou vlastnosti atmosféry zadávané jako radiační parametry v podobě poměru difuzního a přímého záření (*Diffuse proportion*) a propustnosti atmosféry (*Transmittivity*) v rámci zkoumané lokality.

Protože nejsou k dispozici naměřená data, jsou využity data získaná interpolací a extrapolací hodnot naměřených okolními meteorologickými stanicemi. Tyto interpolované hodnoty jsou dostupné v databázích PVGIS (JRC, 2015), NASA (NASA, 2015), GAISMA (GAISMA, 2015), PVWatts (NRELb, 2015) a dalších, které jsou volně dostupné na webových stránkách v tabulkové podobě. Tyto databáze nabízejí po zadání souřadnic místa zájmu množství různých charakteristik atmosféry, ale radiační parametry, které vyžaduje model, je možné v databázích najít odděleně. Konkrétně hodnota *diffuse proportion* byla pro účely práce vyhledána

v databázi PVGIS a *transmittivity* v databázi NASA. Z důvodu dynamiky těchto charakteristik v čase jsou využity průměrné hodnoty pro co nejkratší časový úsek, které databáze obsahují, což je jeden měsíc. Získané hodnoty radiačních parametrů jsou obsaženy v tabulce č. 2.

Tabulka č. 2 - Hodnoty radiačních parametrů (JRC, 2015; NASA, 2015)

Pec pod Sněžkou	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec
Diffuse propotion	0.77	0.67	0.63	0.6	0.6	0.65	0.61	0.6	0.63	0.61	0.78	0.83
Transmittivity	0.38	0.42	0.41	0.43	0.44	0.41	0.44	0.47	0.41	0.37	0.31	0.35
Macharen												
Diffuse	0.74	0.62	0.65	0.56	0.55	0.61	0.57	0.57	0.58	0.61	0.69	0.77
Transmittivity	0.35	0.38	0.4	0.43	0.46	0.43	0.44	0.46	0.41	0.37	0.35	0.32

Protože jsou tyto dvě charakteristiky v inverzním vztahu a jednotlivé databáze mohou využívat odlišné metody jejich stanovení, je otázkou zda hodnoty z různých zdrojů k sobě pasují. Nicméně mimo využití přímého měření v lokalitě není jiný způsob jak tyto hodnoty zjistit. Zjištěné hodnoty z databází lze pak korelovat v závislosti na změřeném množství skutečně dopadajícího záření, ale opět by bylo třeba znát alespoň hodnoty dopadajícího globálního záření ve zkoumaném území, což je možnost také omezená četností výskytu meteorologických a klimatických stanic.

3.2 Zvolený postup a nastavení parametrů

3.2.1 Příprava dat

Lidarová data jsou z podoby mračna bodů interpolací převedeny do podoby rastru digitálního modelu povrchu (*DSM*). K tomu byl využit nástroj *LasTools*, který s nimi umí pracovat, konkrétně k převedení z formátu *LAZ*, ve kterém jsou data dostupná, do formátu *LAS*, který podporuje ArcGIS. Dalším krokem je načtení do *LAS datasets* a využitím nástroje *LAS datasets to raster* převedení do podoby rastru, který je již vhodný jako vstup do prováděné solární analýzy.

Dalšími daty potřebnými k vyhodnocení solárního potenciálu střech jsou obvodové linie budov, které také umí vygenerovat nástroj *LasTools* z LiDARových dat a převést je do vektorové podoby, umožňující jejich další zpracování a využití nástroji programu ArcGIS.

3.2.2 Nastavení parametrů

Vzhledem k časové náročnosti analýzy a počtu kombinací nastavení parametrů byly zkoumány jen některé parametry a to jednotlivě. Tedy vždy byly v modelu v rámci jednoho scénáře měněny jen jeden nebo dva parametry a ostatní parametry zůstaly defaultní.

3.2.2.1 Scénář 1

První scénář se zabývá parametrem *sky size*, jehož hodnota byla v jednotlivých analýzách postupně zvyšována oproti defaultnímu nastavení. Tento scénář byl aplikován na obě území s cílem postihnout vztah nastavení parametru a topografické členitosti území. Celkem byly spuštěny 4 analýzy pro každé území s nastavením hodnoty *sky size* na 200 (defaultní), 600, 1000 a 1400 pro celý rok s měsíčním intervalem. Ostatní nastavení modelu zůstaly defaultní.

3.2.2.2 Scénář 2

V rámci tohoto scénáře byl sledován vliv parametru *calculation direction*, kdy byla jeho hodnota pro jednotlivé analýzy zvyšována oproti defaultnímu nastavení. Zde byl také sledován vztah mezi hodnotou parametru a topografickou členitostí území, proto byl scénář aplikován na obě území. Celkem byly spuštěny 4 analýzy pro jednotlivá území s nastavením hodnoty parametru *calculation direction* na 32 (defaultní), 64, 128 a 256 pro celý rok s měsíčním intervalem. Ostatní hodnoty parametrů byly ponechány v defaultním nastavení.

3.2.2.3 Scénář 3

Další scénář sledoval vliv nastavení délky denního intervalu výpočtu na výsledný solární potenciál pro obě území. Hodnota parametru *day interval* byla v jednotlivých analýzách postupně snižována a tím byl zkracován denní interval výpočtu. Přestože je z důvodu interpretovatelnosti výsledků operování s více parametry v rámci jedné analýzy nežádoucí, v tomto případě bylo potřeba současně se zkracováním denního intervalu výpočtu úměrně zvyšovat velikosti oblohy, protože má limitující vliv vzhledem k některým parametrům včetně *day interval*. V případě nezvyšování hodnoty parametru velikosti oblohy by jeho limitující vliv omezil účinek parametru *day interval* a mohl by i zapříčinit chyby ve výpočtu způsobené překrytím slunečních drah. V tomto případě však lze interpretovat vliv délky denního intervalu na výsledky odděleně, protože vliv parametru velikosti oblohy byl zkoumán už v prvním scénáři a srovnáním výsledků mezi těmito scénáři je možné vlivy těchto dvou parametrů oddělit. Tento scénář zahrnoval spuštění 4 analýz pro každé území s nastavením kombinací hodnot parametrů *sky size* 200 (defaultní) a *day interval* 15, *sky size* 600 a *day interval* 5, *sky size* 1000 a *day interval* 3, *sky size* 1400 a *day interval* 2 pro celý rok. Hodnoty ostatních parametrů zůstaly defaultní.

3.2.2.4 Scénář 4

Poslední scénář se zabýval nastavením radiačních parametrů *diffuse proportion* a *transmittivity* a sledoval jak výrazně může špatný odhad těchto parametrů ovlivnit výsledky. V tomto případě se jednalo také o kombinaci nastavení 2 parametrů, protože tyto dva parametry mají vzájemný inverzní vztah a nebylo by vhodné je zkoumat odděleně. Specifikem tohoto scénáře byl výpočet po jednotlivých měsících z důvodu dynamiky těchto hodnot atmosférických charakteristik v čase, kdy byly využívány průměrné hodnoty pro jednotlivé měsíce. Dalším parametrem, který byl přizpůsoben scénáři je *diffuse model type* definující způsob šíření rozptýleného záření. V tomto scénáři byl zvolen *standard overcast model* pro všechny analýzy, který by měl věrněji napodobovat reálné vlastnosti oblohy. V rámci tohoto scénáře byly ke zkoumání zvolena dvě základní nastavení těchto parametrů označované jako *clear sky* a *real sky*. *Clear sky* je prezentována hodnotami radiačních parametrů, které charakterizují oblohu jako obecně jasnou v průběhu celého roku. Tento typ oblohy je v modelu nastaven defaultně a dva zkoumané radiační parametry mají tedy stejnou hodnotu v rámci všech měsíců výpočtu. Pojem *real sky* pak označuje reálné vlastnosti atmosféry včetně jejich dynamiky v čase. Výpočet byl proveden pro jednotlivé měsíce v celém roce pro *clear sky* i *real sky*. Hodnoty ostatních parametrů zůstaly defaultní. Tento scénář byl aplikován jen na území obce Macharen.

3.2.3 Hodnocení výsledků

Pro analýzu vlivu parametrů na výsledky byly mapy solárního potenciálu modelované s odlišným nastavením parametrů porovnávány mezi sebou a jejich rozdíly vizuálně i statisticky hodnoceny.

Vizuální hodnocení bylo provedeno odečtením jednotlivých výsledků od sebe funkcí *minus*, která je součástí nástrojů prostorových analýz v programu ArcGIS. Odečtení vygenerovalo rastr, který znázorňuje hodnoty velikosti rozdílu mezi porovnávanými solárními mapami s různým nastavením parametrů. Tento postup hodnocení ukázal v jakých místech a jak výrazně se od sebe výsledky liší.

Výstupem vizuálního hodnocení je mapa území znázorňující klasifikovaný rozdíl mezi solárními mapami s odlišným nastavením modelu ve výsledcích a popis v jakých místech a jakým způsobem se výsledky liší a definice toho, jak daný parametr ovlivňuje výsledné solární mapy v diskusi. Z důvodu počtu výstupů a omezeného prostoru v práci, je vždy prezentován jen rozdíl mezi krajními hodnotami nastavení parametru, tedy mezi defaultní a nejvyšší či nejnižší hodnotou zkoumaného parametru. Průběh rozdílů hodnot dopadajícího záření při jednotlivých nastaveních parametru je pak prezentován ve statistické části vyhodnocení výsledků.

Ke statistickému vyhodnocení rozdílu výsledků byla použita funkce *zonal statistic*. Tato funkce umožňuje exportovat nejrůznější statistiky hodnot buněk rastru v rámci vektorem ohraničených ploch do tabulkové podoby. V tomto případě to byly plochy střechy budov, které jsou předmětem zájmu. Toto vyhodnocení kvantifikovalo celkové či průměrné rozdíly v množství dopadajícího záření na všechny i jednotlivé střechy pro různé nastavení modelu. Statistické vyhodnocení výsledků se zaměřovalo pouze střechy budov, které mohou být použity k umístění fotovoltaických systémů. Sledována byla změna sumy, rozptylu hodnot a minimální hodnoty dopadajícího záření, a dále čas výpočtu pro jednotlivá nastavení v rámci každého scénáře a území.

Porovnávání sumy dopadajícího záření je zásadní část vyhodnocení, neboť umožňuje stanovit potenciální výkon instalovaných solárních systémů při pokrytí celé střešní plochy. Statistika rozptylu hodnot se snaží postihnout podrobnost výsledku, protože vyšší rozptyl hodnot dopadajícího záření by mohl znamenat, že do výpočtu jsou zahrnuty větší topografické detaily v podobě tvaru střechy a malých objektů jako jsou vikýře, komíny a další členitosti. Sledování změny minimálních hodnot dopadajícího záření na jednotlivé střechy by pak mohlo postihnout míru zapojení efektu stínu. Pokud je minimální modelovaná hodnota záření v rámci dané střechy nižší při určitém nastavení modelu, lze říci, že střecha je v tomto případě zastíněna významněji. Statistické vyhodnocení bylo provedeno pro všechny střechy, ale z důvodu počtu střech v území jsou v práci interpretovány jen průměrné, maximální či minimální hodnoty záření pro všechny střechy nebo jednotlivé střechy s nejvyšším rozdílem. Výsledky jsou prezentovány tabulkami s procentuálním vyjádřením změny modelovaných hodnot dopadajícího záření oproti defaultnímu nastavení modelu, slovním popisem a grafy.

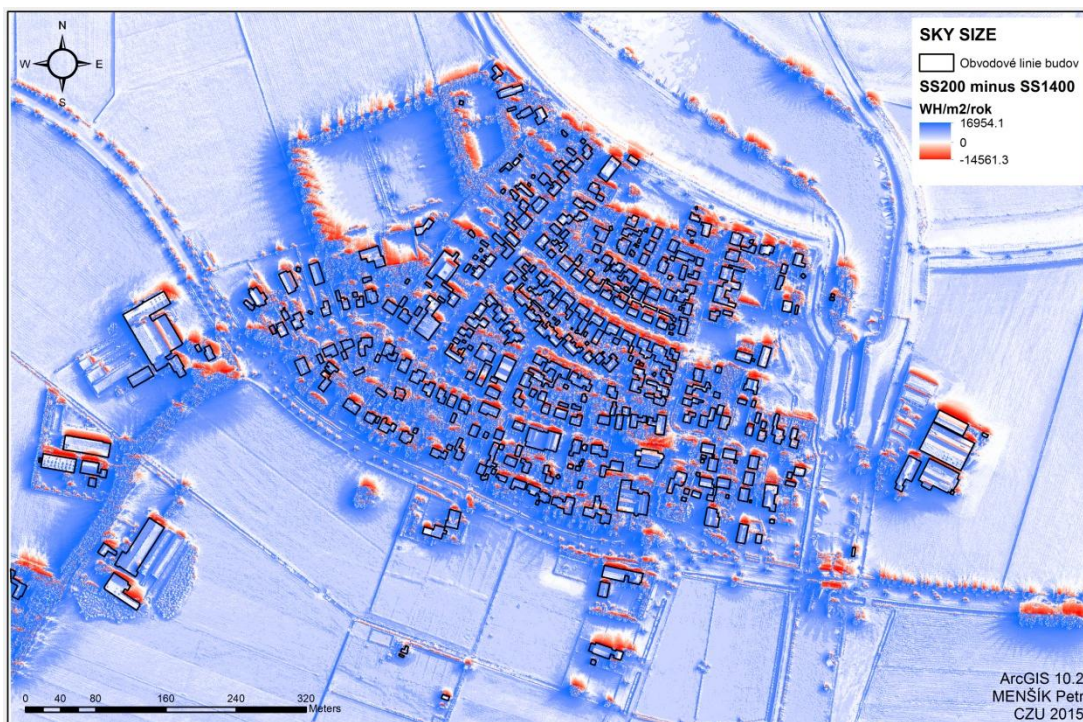
4 Výsledky

4.1 Scénář 1

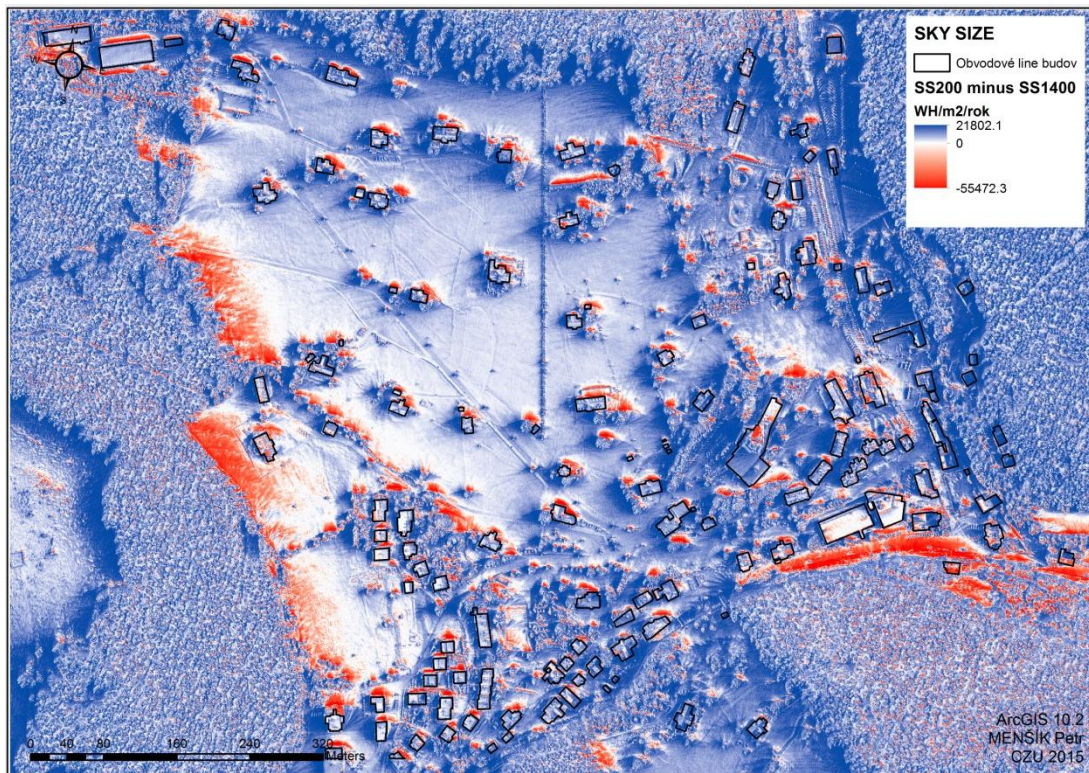
4.1.1 Vizuální vyhodnocení

Přiložené mapy č 1 a č. 2 znázorňují rozdíl modelovaných hodnot mezi defaultním nastavením a nastavením s hodnotou *sky size* 1400 pro obě zkoumaná území. Jedná se o odečtení nastavení *sky size* 1400 od *sky size* 200 (defaultní), takže záporné hodnoty vyjádřené červenou barvou jsou v místech, kde defaultní nastavení modelu podhodnocuje množství dopadajícího záření a naopak kladné hodnoty vyjádřené modře se nacházejí v místech, kde defaultní nastavení modelu nadhodnocuje množství dopadajícího záření.

Mapa č. 1 - Vliv parametru SKY SIZE, Macharen



Mapa č. 2 - Vliv parametru SKY SIZE, Pec pod Sněžkou



Defaultní hodnota parametru *sky size* podhodnocuje množství dopadajícího záření ve stínech objektů ze směru příchozího přímého záření a v ostatních směrech ho nadhodnocuje. Mírně nadhodnoceno je dopadající záření na rovné plochy a trochu více na střechy budov. Různá úroveň podhodnocení i nadhodnocení lze pozorovat i u jednotlivých střech. V rámci celého území obce Machareň je dopadající záření nejvíce nadhodnoceno o 17 kWh/m² za rok a nejvíce podhodnoceno o 14,5 kWh/m² za rok. V případě území Pece pod Sněžkou je rozdíl o něco vyšší, kdy je dopadající záření nejvíce nadhodnoceno o 21,8 kWh/m² za rok a nejvíce podhodnoceno o 55,5 kWh/m² za rok.

4.1.2 Statistické vyhodnocení

Macharen

Tabulka č. 3 - Vliv parametru SKY SIZE, Macharen

Macharen	Dopadající globální záření (%)	SS200	SS600	SS1000	SS1400
Všechny střechy	Celková suma hodnot	100.00	99.89	99.87	99.86
	Průměrná suma hodnot	100.00	99.85	99.83	99.82
	Průměrný rozptyl hodnot	100.00	100.11	100.13	100.14
	Průměrná minimální hodnota	100.00	97.45	96.94	96.73
Jednotlivé střechy s nevyšší změnou	Nárůst sumy hodnot	100.00	100.21	100.26	100.27
	Pokles sumy hodnot	100.00	99.11	99.00	98.93
	Nárůst rozptylu hodnot	100.00	100.66	100.76	100.81
	Pokles rozptylu hodnot	100.00	99.63	99.57	99.54
	Nárůst minimální hodnoty	100.00	101.10	101.39	101.50
	Pokles minimální hodnoty	100.00	87.17	83.47	82.64
	Čas výpočtu	100.00	330.43	1208.70	1608.70

Celková suma dopadajícího záření na všechny střechy poklesla o 0,14 %, pro jednotlivé střechy průměrně poklesla o 0,18 %, nejvíce poklesla o 1,07 % a nejvíce narostla o 0,27 %.

Rozptyl hodnot dopadajícího záření pro všechny střechy se průměrně zvýšil 0,14 %, pro jednotlivé střechy nejvíce narostl o 0,81 % a nejvíce poklesl o 0,46 %. Minimální hodnota dopadajícího záření pro všechny střechy průměrně poklesla o 3,27 %, pro jednotlivé střechy nejvíce narostla o 1,5 % a nejvíce poklesla o 17,36 %.

Pec pod Sněžkou

Tabulka č. 4 - Vliv parametru SKY SIZE, Pec pod Sněžkou

Pec pod Sněžkou	Dopadající globální záření (%)	SS200	SS600	SS1000	SS1400
Všechny střechy	Celková suma hodnot	100.00	99.82	99.80	99.78
	Průměrná suma hodnot	100.00	99.79	99.77	99.75
	Průměrný rozptyl hodnot	100.00	100.07	100.09	100.10
	Průměrná minimální hodnota	100.00	95.55	94.68	94.30
Jednotlivé střechy s nevyšší změnou	Nárůst sumy hodnot	100.00	100.24	100.28	100.30
	Pokles sumy hodnot	100.00	99.12	99.00	98.97
	Nárůst rozptylu hodnot	100.00	100.40	100.50	100.54
	Pokles rozptylu hodnot	100.00	99.61	99.57	99.56
	Nárůst minimální hodnoty	100.00	99.38	99.19	99.13
	Pokles minimální hodnoty	100.00	84.17	81.07	79.83
	Čas výpočtu	100.00	402.38	992.86	1428.57

Celková suma dopadajícího záření na všechny střechy poklesla o 0,22 %, pro jednotlivé střechy průměrně poklesla o 0,25 %, nejvíce poklesla o 1,03 % a nejvíce narostla o 0,3 %.

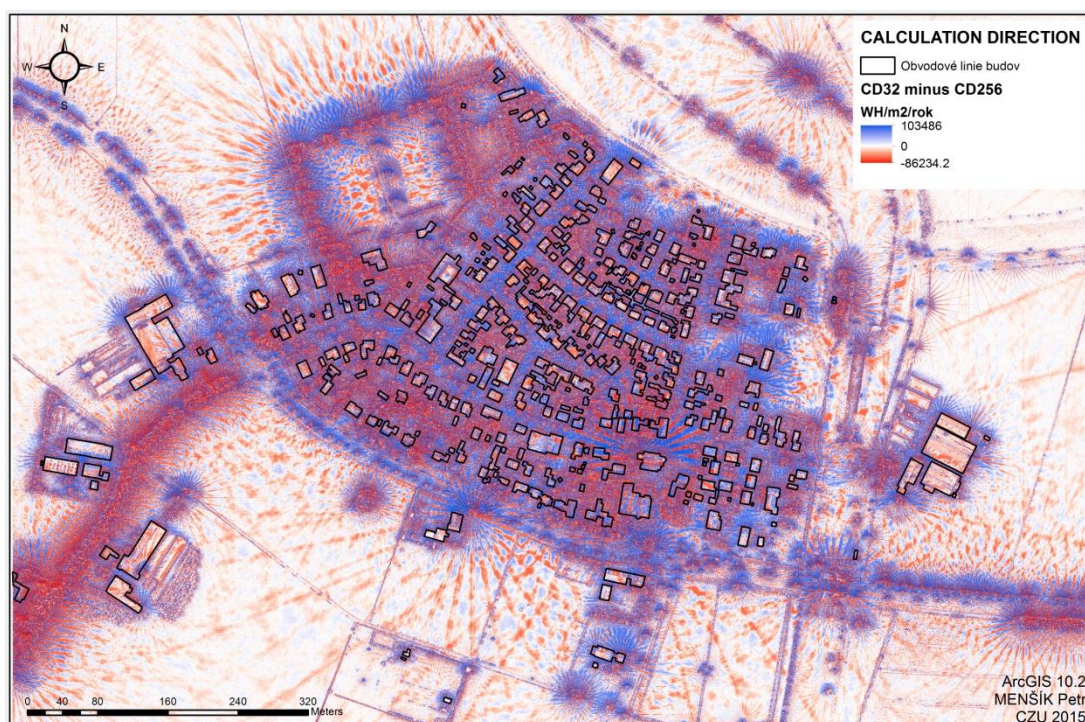
Rozptyl hodnot dopadajícího záření pro všechny střechy se průměrně zvýšil o 0,10 %, pro jednotlivé střechy nejvíce narostl o 0,54 % a nejvíce poklesl o 0,44 %. Minimální hodnota dopadajícího záření pro všechny střechy průměrně poklesla o 5,7 %, pro jednotlivé střechy nejméně poklesla o 0,87 % a nejvíce poklesla o 20,17 %.

4.2 Scénář 2

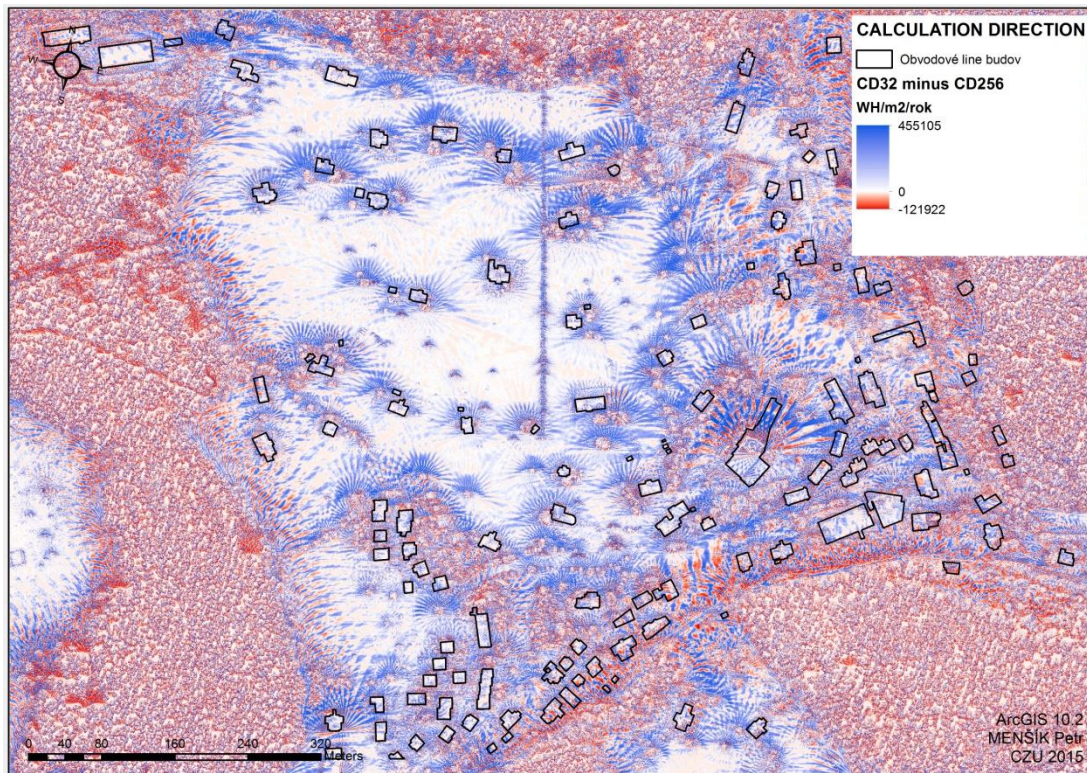
4.2.1 Vizualní vyhodnocení

Přiložené mapy č 3 a č. 4 znázorňují rozdíl modelovaných hodnot mezi defaultním nastavením a nastavením s hodnotou *calculation direction* 256 pro obě zkoumaná území. Jedná se o odečtení nastavení *calculation direction* 256 od *calculation direction* 32 (defaultní), takže záporné hodnoty vyjádřené červenou barvou jsou v místech, kde defaultní nastavení podhodnocuje množství dopadajícího záření a naopak kladné hodnoty vyjádřené modře se nacházejí v místech, kde defaultní nastavení modelu nadhodnocuje množství dopadajícího záření.

Mapa č. 3 - Vliv parametru CALCULATION DIRECTION, Macharen



Mapa č. 4 - Vliv parametru *CALCULATION DIRECTION*, Pec pod Sněžkou



Defaultní hodnota parametru *calculation direction* střídavě podhodnocuje a nadhodnocuje množství dopadajícího záření radiálně v okolí objektů. Nejvyšší rozdíly jsou zaznamenány v rámci hustě zastavěných míst území. Podhodnocené i nadhodnocené plochy se vyskytují i na střechách budov. Pro celé analyzované území obce Macharen dosahuje nejvyšší podhodnocení 103,5 kWh/m² za rok a nejvyšší nadhodnocení 86 kWh/m² za rok. Pro území Pece pod Sněžkou je záření nejvíce podhodnoceno o 455 kWh/m² za rok a nejvíce nadhodnoceno o 122 kWh/m².

4.2.2 Statistické vyhodnocení

Macharen

Tabulka č. 5 - Vliv parametru CALCULATION DIRECTION, Macharen

Macharen	Dopadající globální záření (%)	CD32	CD64	CD128	CD256
Všechny střechy	Celková suma hodnot	100.00	100.02	99.96	99.99
	Průměrná suma hodnot	100.00	100.01	99.94	99.97
	Průměrný rozptyl hodnot	100.00	99.78	99.79	99.72
	Průměrná minimální hodnota	100.00	103.32	102.78	103.78
Jednotlivé střechy s nevyšší změnou	Nárůst sumy hodnot	100.00	100.45	100.28	100.40
	Pokles sumy hodnot	100.00	99.61	99.46	99.50
	Nárůst rozptylu hodnot	100.00	101.18	101.49	101.28
	Pokles rozptylu hodnot	100.00	97.00	97.46	97.08
	Nárůst minimální hodnoty	100.00	146.57	143.60	156.79
	Pokles minimální hodnoty	100.00	89.88	87.02	88.62
	Čas výpočtu	100.00	102.17	193.48	358.70

Celková suma dopadajícího záření na všechny střechy nejvíce poklesla o 0,04 %, pro jednotlivé střechy v průměru nejvíce poklesla o 0,06 %, nejvíce poklesla o 0.54 % a nejvíce narostla o 1.49 %.

Rozptyl hodnot dopadajícího záření pro všechny střechy průměrně poklesl o 0,28 %, pro jednotlivé střechy nejvíce narostl o 1,49 % a nejvíce poklesl o 3 %. Minimální hodnota dopadajícího záření pro všechny střechy průměrně narostla o 3,78 %, pro jednotlivé střechy nejvíce narostla o 56,79 % a nejvíce poklesla o 12,98 %.

Pec pod Sněžkou

Tabulka č. 6 - Vliv parametru CALCULATION DIRECTION, Pec pod Sněžkou

Pec pod Sněžkou	Dopadající globální záření (%)	CD32	CD64	CD128	CD256
Všechny střechy	Celková suma hodnot	100.00	100.02	99.96	100.01
	Průměrná suma hodnot	100.00	100.02	99.96	100.02
	Průměrný rozptyl hodnot	100.00	99.74	99.73	99.69
	Průměrná minimální hodnota	100.00	106.00	105.29	106.62
Jednotlivé střechy s nevyšší změnou	Nárůst sumy hodnot	100.00	100.39	100.50	100.79
	Pokles sumy hodnot	100.00	99.49	99.28	99.36
	Nárůst rozptylu hodnot	100.00	100.91	100.68	100.73
	Pokles rozptylu hodnot	100.00	97.73	98.20	97.88
	Nárůst minimální hodnoty	100.00	178.04	170.41	185.36
	Pokles minimální hodnoty	100.00	93.85	97.06	96.47
	Čas výpočtu	100.00	150.00	285.71	416.67

Celková suma dopadajícího záření na všechny střechy narostla o 0,01 %, pro jednotlivé střechy průměrně narostla o 0,02 %, nejvíce poklesla o 0,72 % a nejvíce narostla o 0,79 %.

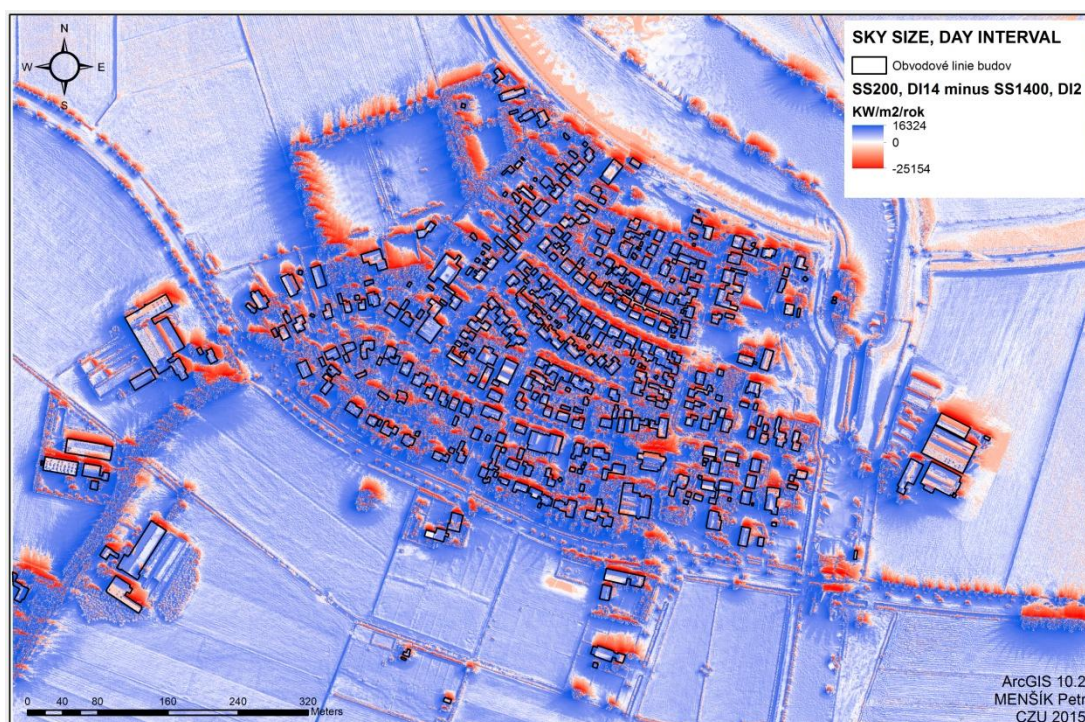
Rozptyl hodnot dopadajícího záření pro všechny střechy průměrně poklesl o 0,31 %, pro jednotlivé střechy nejvíce narostl o 0,91 % a nejvíce poklesl o 2,27 %. Minimální hodnota dopadajícího záření pro všechny střechy průměrně narostla o 6,62 %, pro jednotlivé střechy nejvíce narostla o 85,36 % a nejvíce poklesla o 6,15 %.

4.3 Scénář 3

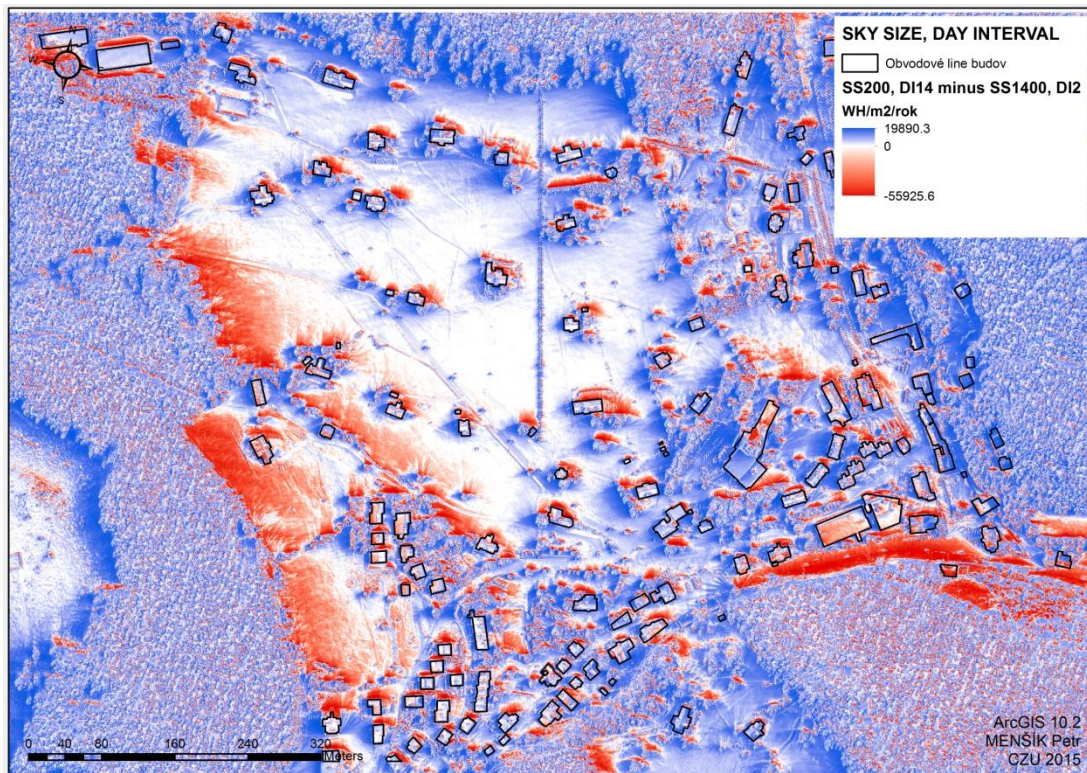
4.3.1 Vizualní hodnocení

Přiložené mapy č. 5 a č. 6 znázorňují rozdíl modelovaných hodnot mezi defaultním nastavením modelu a nastavením s hodnotou *sky size* 1400 a *day interval* 2 pro obě zkoumaná území. Jedná se o odečtení nastavení *sky size* 1400, *day interval* 2 od *sky size* 200, *day interval* 14 (defaultní), takže záporné hodnoty vyjádřené červenou barvou jsou v místech, kde defaultní nastavení podhodnocuje množství dopadajícího záření a naopak kladné hodnoty vyjádřené modře se nacházejí v místech, kde defaultní nastavení modelu nadhodnocuje množství dopadajícího záření.

Mapa č. 5 - Vliv parametru DAY INTERVAL, Macharen



Mapa č. 6 - Vliv parametru DAY INTERVAL, Pec pod Sněžkou



Defaultní hodnota day interval podhodnocuje dopadající záření ve stínech objektů ze směru trasy Slunce a nadhodnocuje v ostatních směrech, stejně jako defaultní hodnota parametru sky size, jen výrazněji v případě přímého záření. Nadhodnoceno i podhodnoceno je záření v rámci jednotlivých částí střech. Nejvyšší nadhodnocení v analyzovaném území Macharen dosahuje $16,3 \text{ kWh/m}^2$ za rok a nejvyšší podhodnocení 25 kWh/m^2 za rok. V případě území obce Pec pod Sněžkou jsou některé plochy podhodnoceny až o 20 kWh/m^2 a nadhodnoceny až o 56 kWh/m^2 .

4.3.2 Statistické hodnocení

Macharen

Tabulka č. 7 - Vliv parametru DAY INTERVAL, Macharen

Macharen	Dopadající globální záření (%)	DI14	DI5	DI3	DI2
Všechny střechy	Celková suma hodnot	100.00	99.94	99.91	99.91
	Průměrná suma hodnot	100.00	99.91	99.88	99.87
	Průměrný rozptyl hodnot	100.00	100.13	100.13	100.14
	Průměrná minimální hodnota	100.00	97.72	97.29	97.09
Jednotlivé střechy s nevyšší změnou	Nárůst sumy hodnot	100.00	100.30	100.35	100.37
	Pokles sumy hodnot	100.00	99.20	99.11	99.04
	Nárůst rozptylu hodnot	100.00	100.59	100.69	100.74
	Pokles rozptylu hodnot	100.00	99.29	99.16	99.10
	Nárůst minimální hodnoty	100.00	103.86	104.39	104.73
Pokles minimální hodnoty	100.00	87.50	85.29	84.20	
	Čas výpočtu	100.00	435.71	1030.95	1988.10

Celková suma dopadajícího záření na všechny střechy poklesla o 0,09 %, pro jednotlivé střechy průměrně poklesla o 0,13 %, nejvíce poklesla o 0,96 % a nejvíce narostla o 0,37 %.

Rozptyl hodnot dopadajícího záření pro všechny střechy průměrně vzrostl o 0,14 %, pro jednotlivé střechy nejvíce narostl o 0,74 % a nejvíce poklesl o 0,90%. Minimální hodnota dopadajícího záření pro všechny střechy průměrně poklesla o 2,91 %, pro jednotlivé střechy nejvíce narostla o 4,73 % a nejvíce poklesla o 15,80 %.

Pec po Sněžkou

Tabulka č. 7 - Vliv parametru DAY INTERVAL, Pec pod Sněžkou

Pec pod Sněžkou	Dopadající globální záření (%)	DI14	DI5	DI3	DI2
Všechny střechy	Celková suma hodnot	100.00	99.90	99.88	99.87
	Průměrná suma hodnot	100.00	99.88	99.86	99.84
	Průměrný rozptyl hodnot	100.00	100.14	100.14	100.15
	Průměrná minimální hodnota	100.00	95.78	94.95	94.58
Jednotlivé střechy s nevyšší změnou	Nárůst sumy hodnot	100.00	100.50	100.61	100.63
	Pokles sumy hodnot	100.00	99.24	99.15	99.08
	Nárůst rozptylu hodnot	100.00	100.46	100.57	100.61
	Pokles rozptylu hodnot	100.00	99.75	99.73	99.72
	Nárůst minimální hodnoty	100.00	100.45	100.53	100.52
Pokles minimální hodnoty	100.00	84.17	81.07	79.84	
	Čas výpočtu	100.00	413.33	997.78	1831.11

Celková suma dopadajícího záření na všechny střechy poklesla o 0,13 %, pro jednotlivé střechy průměrně poklesla o 0,16 %, nejvíce poklesla o 0,92 % a nejvíce narostla o 0,63 %.

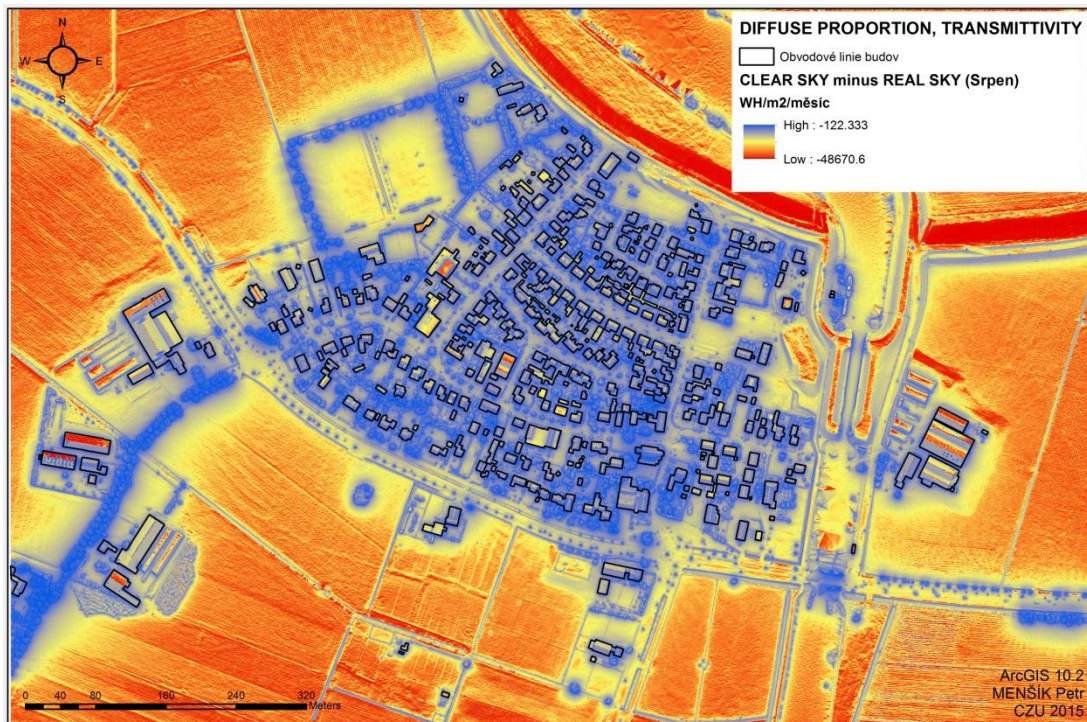
Rozptyl hodnot dopadajícího záření pro všechny střechy průměrně vzrostl o 0,15 %, pro jednotlivé střechy nejvíce narostl o 0,61 % a nejvíce poklesl o 0,28 %. Minimální hodnota dopadajícího záření pro všechny střechy průměrně poklesla o 5,42 %, pro jednotlivé střechy nejvíce narostla o 0,53 % a nejvíce poklesla o 20,16 %.

4.4 Scénář 4

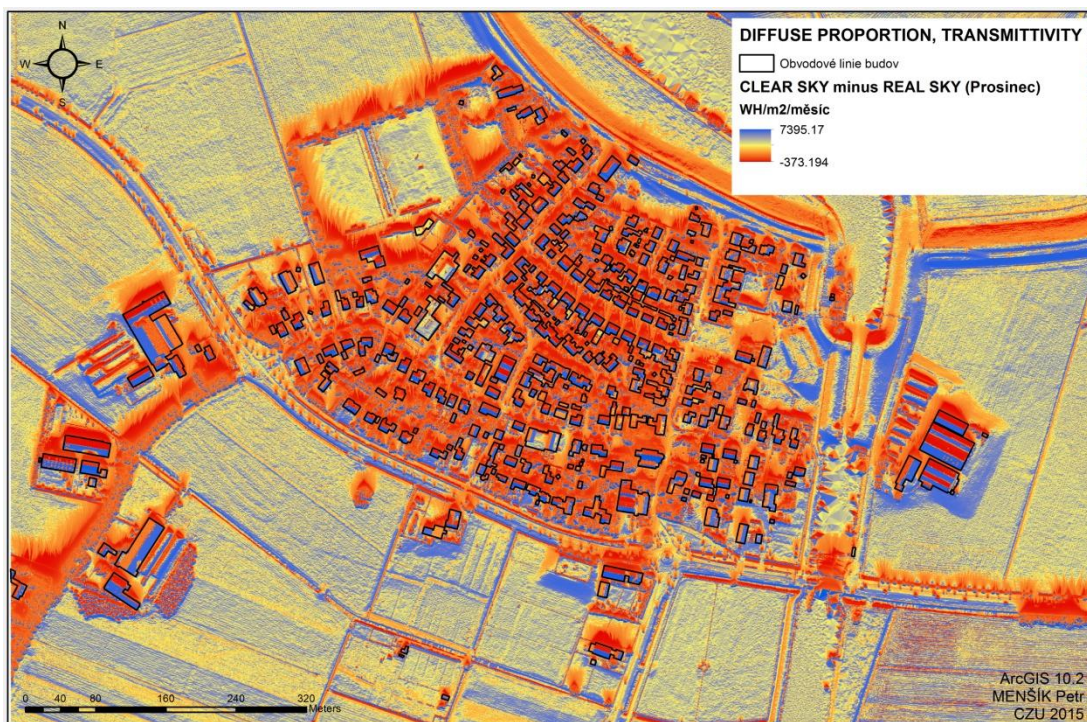
4.4.1 Vizuální hodnocení

Přiložené mapy č. 7, č. 8 a č. 9 ukazují rozdíl mezi nastavením modelu na *real sky* a *clear sky* v rámci území Macharen pro měsíc srpen a prosinec, ve kterých se množství dopadajícího záření liší nejvíce a pro celý rok. Nastavení modelu s radiačními hodnotami *real sky* je odečteno do nastavení modelu *clear sky* (defaultní). Záporné hodnoty jsou vyjádřeny v mapě červeně a ukazují, kde defaultně nastavený model podhodnocuje množství dopadajícího záření a kladné hodnoty vyjádřené v mapě modrou barvou ukazují místa, kde defaultní nastavení modelu mírně podhodnocuje nebo nadhodnocuje množství dopadajícího záření dle klasifikace jednotlivých map. V případě měsíců leden, únor, říjen, listopad prosinec defaultní nastavení modelu celkové množství dopadajícího záření nadhodnocuje, v ostatních měsících v průměru podhodnocuje.

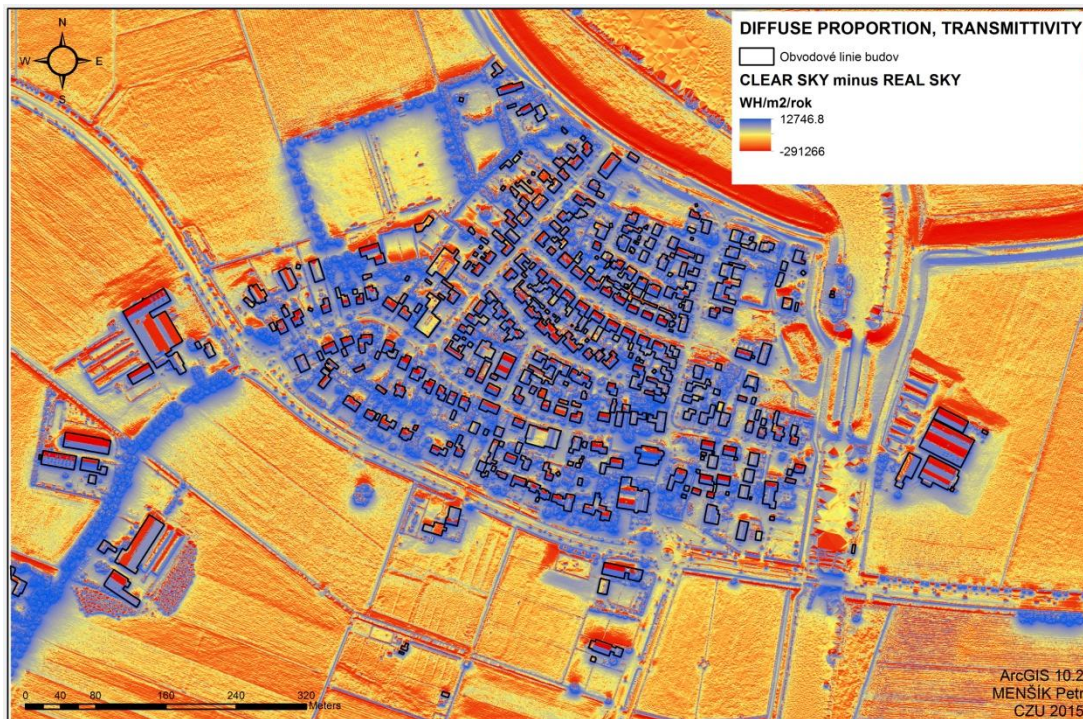
Mapa č. 7 - Vliv radiálních parametrů, Macharen, Srpen



Mapa č. 8 - Vliv radiálních parametrů, Macharen, Prosinec



Mapa č. 9 - Vliv radiačních parametrů Macharen, celý rok



Clear sky oproti *real sky* za celý rok nadhodnocuje dopadající přímé záření a podhodnocuje dopadající difusní záření. Nejvyšší nadhodnocení se vyskytuje uvnitř hustě zastavěného území a na povrchu vegetace. Mírně podhodnoceny jsou rovné plochy a významněji části střech příkloněné severovýchodním a severozápadním směrem. Nejvyšší nadhodnocení v rámci celého analyzovaného území dosahuje 12,7 kWh/m² za rok a nejvyšší podhodnocení 291 kWh/m² za rok. V případě měsíce srpen je dopadající záření v rámci *clear sky* více méně podhodnoceno v celém území, nejvíce pak na rovných plochách a částí některých střech, méně uvnitř zástavby včetně střešních ploch. Podhodnocení v měsíci srpen dosahuje 0,12 kWh/m² až 48 kWh/m² za měsíc. V měsíci prosinec dochází naopak spíše k nadhodnocení dopadajícího záření, kdy je nejvíce nadhodnoceno přímé záření a trochu méně difusní záření. Nejvyšší nadhodnocení dosahuje 7,40 kWh/m² za měsíc a nejvyšší podhodnocení dosahuje 0,37 kWh/m² za měsíc.

4.4.2 Statistické vyhodnocení

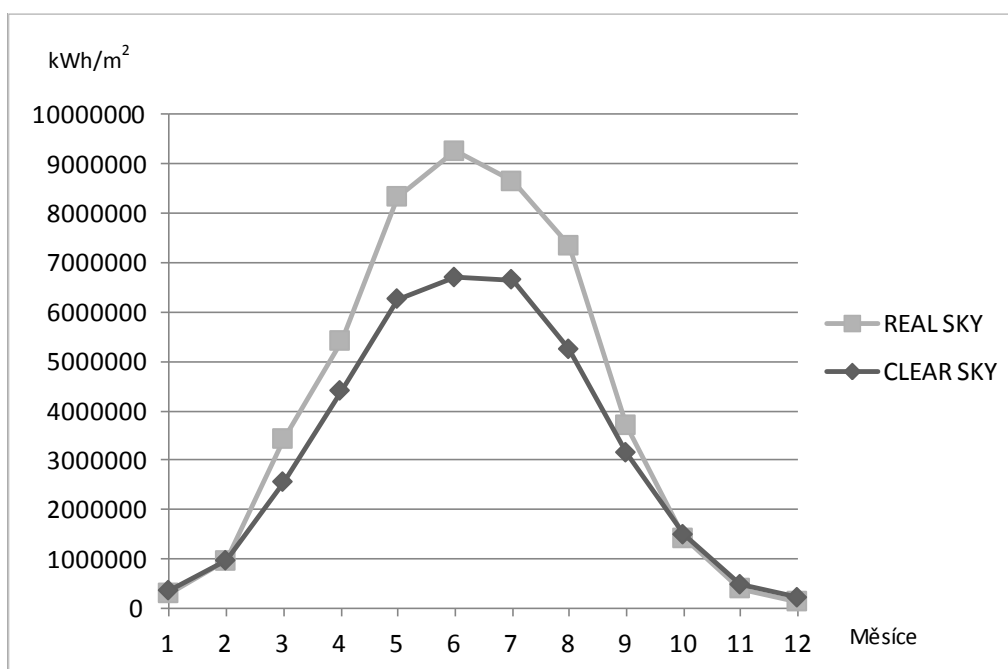
Tabulka č. 8 - Měsíční vliv parametru radiačních parametrů, Macharen

Globální záření (%)	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen
CLEAR SKY	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
REAL SKY	84.47	99.39	134.12	122.95	133.06	138.16
	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec
CLEAR SKY	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
REAL SKY	129.90	139.98	117.62	94.93	83.88	63.87

Tabulka č. 9 - Roční vliv parametru radiačních parametrů, Macharen

	Dopadající globální záření (%)	CLEAR SKY	REAL SKY
Všechny střechy	Celková suma hodnot	100.00	128.22
	Průměrná suma hodnot	100.00	128.63
	Průměrný rozptyl hodnot	100.00	107.07
	Průměrná minimální hodnota	100.00	226.06
Jednotlivé střechy s nevyšší změnou	Nejvyšší nárůst sumy hodnot	100.00	146.60
	Nejnižší nárůst sumy hodnot	100.00	112.47
	Nárůst rozptylu hodnot	100.00	119.96
	Pokles rozptylu hodnot	100.00	83.74
	Nejvyšší nárůst minimální hodnoty	100.00	245.87
	Nejnižší nárůst minimální hodnoty	100.00	121.23

Graf č. 1 - Měsíční vliv parametru radiačních parametrů, Macharen



Celkové množství dopadajícího záření na všechny střechy za rok oproti defaultnímu průměrně narostlo o 28,22 %. Nejvyšší nárůst dopadajícího záření je zaznamenán v srpnu, kdy celkové množství dopadajícího záření vzrostlo o 39,98 % a nejvyšší pokles v prosinci, kdy celkové množství dopadajícího záření kleslo o 36,13 %. Prudce kolísají i statistiky v podobě sumy, rozptylu, minimálních a maximálních hodnot záření pro všechny i jednotlivé střechy.

V rámci celého roku pro jednotlivou střechu množství dopadajícího záření nejvíce vzrostlo o 46,59 % a nejméně vzrostlo o 12,47 %. Rozptyl hodnot pro jednotlivou střechu nejvíce vzrostl o 19,96 % a nejvíce poklesl o 16,26 %.

Minimální hodnota pro jednotlivé střechy nejvíce vzrostla o 145,87 % a nejméně vzrostla o 21,22 %. Maximální hodnota pro jednotlivé střechy nejvíce vzrostla o 28,93 % a nejméně vzrostla o 10,86 %. V některých měsících je kolísání těchto hodnot pro všechny i jednotlivé střechy mnohem výraznější než v průměru za celý rok.

5 Mapa solárního potenciálu pro vybraná území

Na základě výsledků hodnocení vlivu jednotlivých parametrů stále není jednoznačné jak parametry nastavit optimálně, protože zde není konkrétně definovaný požadavek na přesnost a dobu výpočtu a není zde možnost porovnat výsledky s naměřenými daty. Ale lze říci, jak parametry ovlivní výsledky a o jaký čas prodlouží dobu výpočtu. Tedy lze určit hranici nastavení hodnot parametrů od které se výsledek příliš nezpřesní, ale doba výpočtu se výrazně prodlouží. Jediné co je zřejmé, je to že radiační parametry musí být nastaveny správně a měli by co nejvíce korelovat se skutečnými vlastnostmi atmosféry v co nejkratším časovém intervalu pro postihnout jejich dynamiky ve výpočtu. V souvislosti s tím, je potřeba provádět výpočet pro jednotlivá období pro která jsou k dispozici průměrné hodnoty radiačních parametrů, což je jeden měsíc.

Parametry modelu pro obě území jsou za účelem vytvoření solární mapy nastaveny jiným způsobem z důvodu jejich topografické odlišnosti a jiného typu zástavby. Dále na základě toho jak výrazně se parametry projeví na výsledcích v souvislosti s dobou výpočtu. Důvody nastavení parametrů na určité hodnoty vycházejí z veškerých zjištění uváděných výše v průběhu celé práce.

Hodnoty parametrů *day interval*, *hour interval*, *zenit a azimuth division* jsou nastaveny v souvislosti s hodnotou parametru *sky size*, která je odvozena z vyhodnocení výsledků v rámci prvního scénáře. Tedy pokud se hodnota tohoto parametru zvýší oproti defaultní, stejným poměrem se zvýší hodnoty ostatních zmíněných parametrů. Parametr *calculation direction* je nastaven na vysokou hodnotu, přestože relativně významně prodloužuje dobu výpočtu, jeho nízká hodnota by mohla způsobit zkreslení tvarů objektů v území a zapříčinit tak chyby ve výpočtu. Navíc by nebyla maximálně využita výhoda plynoucí z vysokého rozlišení vstupních dat. Z důvodu dynamiky radiačních parametrů je výpočet prováděn po měsících a je zvolen *standart overcast model*, který by měl modelovat šíření difuzního záření způsobem, který je blíže skutečnosti.

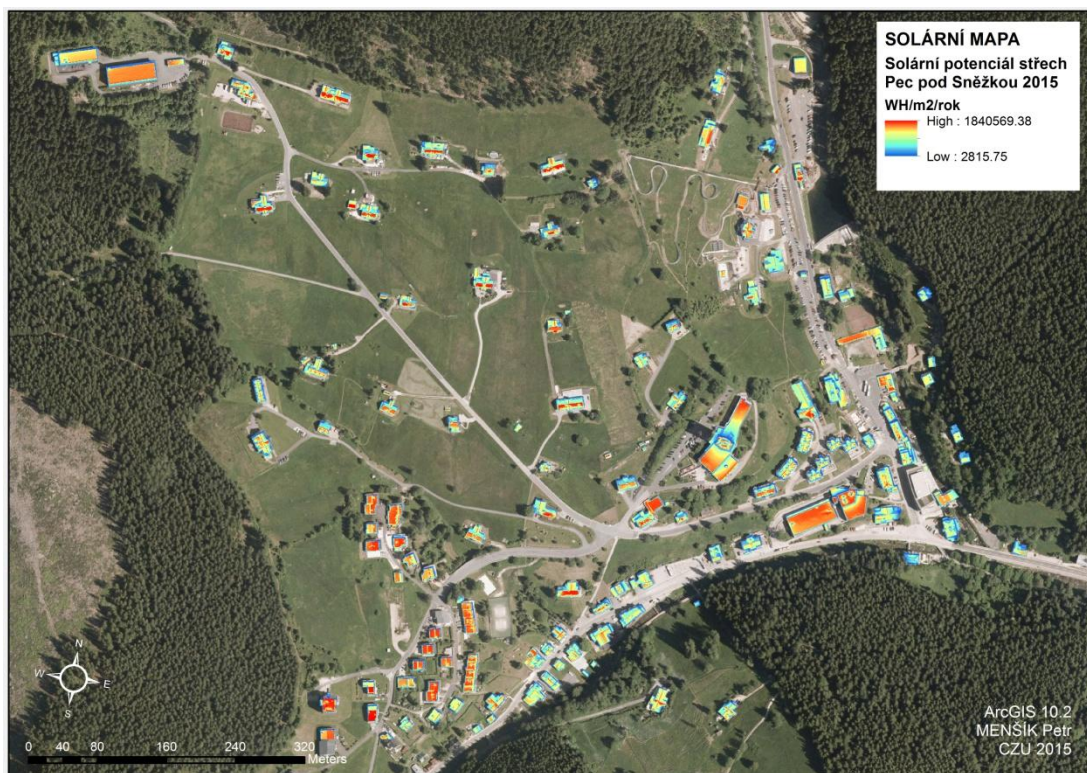
Tabulka č. 10 - Zvolené nastavení parametru modelu Solar Analyst

Území	Využitá data			Základní parametry				Topografické parametry		Radiační parametry				
	Typ dat	Rozlišení dat	Rozlišení DEM	Sky size	Time config.	Day interval	Hour interval	Slope and aspect	Calculation direction	Zenit division	Azimuth division	Diffuse model type	Diffuse proportion	Transmitivity
Macharen	LiDAR	9 point per m2, accuracy 5 cm	0.5 m	600	monthly	5	0.2	DEM	256	24	24	overcast	PVGIS classic	NASA
Pec pod Sněžkou	LiDAR	5 point per m2, accuracy 15 cm	0.5 m	1000	monthly	3	0.1	DEM	128	32	32	overcast	PVGIS classic	NASA

Mapa č. 10 - Solární mapa Macharen



Mapa č. 11 - Solární mapa Pec pod Sněžkou



6 Diskuse

6.1 Zvolený postup

Jednotlivé parametry byly zkoumány odděleně, neboť je pak snazší interpretovat vliv zkoumaného parametru. Na druhou stranu není snadno postižitelné, do jaké míry se uplatňuje limitující nebo synergický vliv ostatních parametrů. Nicméně v případě, že by bylo v rámci jednotlivých analýz měněno více parametrů najednou, by výsledky byly prakticky neinterpretovatelné. Dalším problémem by byl vysoký počet kombinací nastavení parametrů, zmatečná hierarchie výstupů, nejasné hodnocení výsledků a časová náročnost.

Dále je potřeba zmínit, že statistické vyhodnocení kvantifikující velikost rozdílů výsledků s odlišným nastavením modelu se zaměřovalo jen na střešní plochy, které byly ostatními objekty stíněny jen ojediněle. V místech stínů se výsledky lišily v některých případech více než o 10 %, což už je nezanedbatelný rozdíl. V situaci, kdy by zástavba v území byla výškově členitější a budovy a vegetace by si vzájemně stínily, lze předpokládat, že by se nastavení parametrů na sumě dopadajícího záření projevilo mnohem výrazněji. Tedy možná byla území pro analýzu vlivu parametrů zvolena nevhodně, protože existují topograficky mnohem členitější území.

6.2 Vliv parametrů

6.2.1 scénář 1

Z map rozdílů č. 1 a č. 2 v kapitole 4.1.1 je zřejmé, že v místech s málo členitým povrchem terénu dochází při změně hodnoty parametru k minimálním změnám modelovaných hodnot dopadajícího záření. Rozdíly narůstají se zvyšující se členitostí povrchu, zejména v okolí míst výskytu vegetace, budov, jiných umělých struktur a terénních nerovností. Rozdílně se chová přímé a difusní záření, protože při vyšší hodnotě parametru *sky size* dopadá více přímého záření do zastíněných míst ze směru trasy Slunce a méně difusního záření ve všech směrech v okolí topografických členitostí. Parametr *sky size* ovlivňuje výsledky tím, že určuje počet směrů ze kterých přichází obě složky záření a rozsah směrů ze kterých přichází přímé záření. Což se projevuje zpřesňováním obrysů a intenzity stínů, protože přicházející záření reálněji obtéká hrany objektů.

6.2.2 Scénář 2

Rozdíly mezi jednotlivými výstupy modelu s odlišným nastavením parametru *calculation direction* prezentovanými mapami č. 3 a č. 4 v kapitole 4.2.1, se opět jako u předchozího scénáře objevují jen v okolí míst výskytu vegetace, budov, jiných umělých struktur a terénních nerovností. Rozdíly tvoří přímé i difuzní dopadající záření, ale v případě přímého jsou výraznější z důvodu jeho většího podílu na celkovém záření. Změny množství dopadajícího záření se projevují v pásech radiálně směrem od topografických členitostí v souvislosti se způsobem vytváření mapy viditelnosti. V rámci kruhově uspořádaných pásů v okolí objektů se střídají buňky, na které při vyšší hodnotě parametru dopadá méně záření a buňky, na které dopadá více záření. To je způsobeno postupným formováním reálnějšího tvaru a obrysu objektů při zvyšování počtu směrů výpočtu mapy viditelnosti spolu se zvyšováním pravděpodobnosti viditelnosti těchto objektů z okolních buněk. Tento efekt se nejvíce projevuje u objektů malé rozlohy nebo u malých částí hodně členitých struktur, protože nejsou při malém počtu směrů výpočtu viditelné z většiny okolních buněk. Hodnota parametru *calculation direction* tedy ovlivňuje výsledky tím, že určuje přesnost obrysů topografie a objektů v území a umožňuje stanovit, jak prostorově rozsáhlé prvky se budou účastnit výpočtu.

6.2.3 Scénář 3

Rozdíly mezi výstupy s odlišnými nastaveními parametrů *day interval* v rámci scénáře 3 prezentovaný mapami č. 5 a č. 6 v kapitole 4.3.1 se projevují stejným způsobem a ve stejných místech jako u scénáře 1, kde byla zvyšována jen hodnota rozlišení oblohy. Parametr *day interval* v tomto případě ovlivňuje časoprostorovou distribuci jen přímého záření, přičemž na difuzní složku záření nemá vliv, protože definuje rozlišení sluneční mapy. Stejně jako při zvyšování rozlišení oblohy, u přímého dochází ke zvýšení počtu a rozsahu úhlů ze kterých přichází na povrch a záření tak skutečněji obtéká hrany objektů a tím zpřesňuje obrys a intenzitu stínů.

6.2.4 Scénář 4

Z map hodnocení rozdílu nastavení radiačních parametrů č. 7, č. 8 a č. 9 v kapitole 4.4.1 je zřejmé, že defaultní nastavení radiačních parametrů modelu mírně nadhodnocuje dopadající záření v zimních měsících a významně podhodnocuje v letních měsících i v rámci celého roku. Na základě hodnot rozdílu mezi jednotlivými nastaveními prezentovaných v mapách, lze říci, že difuzní záření je defaultním nastavením podhodnocováno více než přímé a to z důvodu mnohem vyšší průměrné hodnoty *diffuse proportion* v případě *real sky* oproti *clear sky*.

6.2.5 Celkové vyhodnocení

První tři scénáře ve kterých byly hodnoceny parametry *sky size*, *calculation direction* a *day interval* ukázaly, že zvyšování jejich hodnoty ovlivňuje zejména časoprostorovou distribuci dopadajícího záření a tím i podrobnost výsledku, která je však velmi obtížně kvantifikovatelná. Na celkové i průměrné množství dopadajícího záření v rámci zkoumaných střešních ploch mají jen zanedbatelný vliv. Nicméně, přesto je distribuce záření na jednotlivé části střech podrobnější a tak výsledná solární mapa modelovaná s vyšší hodnotou parametru lépe identifikuje místa vhodná pro umístění střešních solárních panelů. Nevýhodou je výrazně delší doba výpočtu, v řádech stovek až tisíců procent oproti defaultnímu nastavení.

Hodnoty těchto parametrů by měly být nastaveny na základě požadované podrobnosti výsledku, rozlišení vstupního *DEM*, topografické členitosti lokality, typu zástavby v území a s ohledem na dobu výpočtu. U typu zástavby je třeba sledovat úroveň členitosti střech, výškovou členitost budov, jejich vzájemnou polohu a výskyt vegetace. Pokud by si objekty a vegetace mohli vzájemně stínit je potřeba využít vyšší hodnoty těchto parametrů. Hodnota *calculation direction* by měla být nastavena i na základě výskytu vysokých objektů s malým půdorysem, jako jsou věže, komíny, sloupy a podobné.

Poslední scénář, kde bylo hodnoceno do jaké míry mohou hodnoty radiačních parametrů ovlivnit modelované hodnoty dopadajícího záření, ukázal, že zásadně. Tyto parametry mají významný vliv na celkovou sumu dopadajícího záření na jednotlivé střechy a rozdíly mezi jednotlivými nastaveními dosahují desítek procent. Jejich špatný odhad tedy může poskytovat výsledky velmi vzdálené skutečnému solárnímu potenciálu. Významný vliv mají i na časoprostorovou distribuci dopadajícího záření v průběhu roku, což je důležité zejména v případě umísťování střešních solárních panelů na části střech, které mají sklon orientovaný určitým směrem. Nesprávné nastavení těchto parametrů tedy může vést k zásadním chybám ve výpočtu a proto by jim měla být věnována největší pozornost. Tyto parametry nemají vliv na dobu výpočtu.

Hodnoty radiačních parametrů by měli být ideálně nastaveny na jejich přímém dlouhodobém měření v co nejkratším časovém intervalu přímo v analyzovaném území. Jejich defaultní nebo celoroční průměrné hodnoty poskytují zavádějící výsledky v rámci jednotlivých měsíců i celého roku.

Co se týče porovnání vlivu parametrů v souvislosti s topografickou členitostí území, které mělo být postihnuto analyzováním dvou území s odlišnou topografií, byly zjištěny významné rozdíly v rámci vizuálního hodnocení a málo výrazné v rámci statistického hodnocení, které se zaměřuje pouze na plochy střech. Vizuální hodnocení poukázalo na větší vliv parametrů v území Pece pod Sněžkou. Malý, ale výraznější pokles sumy hodnot a kolísání ostatních sledovaných statistik dopadajícího záření byl zaznamenán ve většině případů v také rámci Pece pod Sněžkou. Lze tedy konstatovat, že v případě tohoto území se vliv nastavení parametrů projevil o něco výrazněji.

V případě zkoumaných území je zřejmé, že zvyšování hodnot parametrů, mimo radiačních, ovlivní sumy dopadajícího záření na střechy minimálně a jejich defaultní nastavení lze považovat za dostatečné. Přesto vyšší hodnoty některých parametrů poskytují určité zvýšení podrobnosti výsledku a je otázkou zda usilovat o maximální podrobnost výsledku analýzy, kterou rozlišení vstupních dat a nastavení modelu umožňuje dosáhnout. Samozřejmě nemá význam nastavovat parametry modelu na nesmyslně vysoké hodnoty, které dobu výpočtu enormně prodlouží, ale podrobnost se již zvyšovat nebude. Lze ale předpokládat, že každé území má tuto hranici jinde a nelze tedy říci o jaké konkrétní hodnoty jde. Nalezení této hranice může být dosaženo spouštěním analýz s různým nastavením jednotlivých parametrů a porovnávání výsledků mezi sebou, podobně jako v této práci, a ještě lépe porovnáním s naměřenými daty.

6.3 Srovnání výsledků s naměřenými daty

Jako nedostatek práce může být vnímáno chybějící srovnání s naměřenými daty, které by umožnily ověřit přesnost modelovaného záření, ale bohužel nejsou pro analyzovaná území k dispozici. Navíc jsou běžně senzory meteorologických stanic provádějící dlouhodobé kontinuální měření vlastností atmosféry včetně slunečního záření orientované vodorovně v nezastíněných místech. Což by umožnilo ověřit správnost jen radiačních parametrů. Aby byl ověřen vliv ostatních parametrů na přesnost výsledné solární mapy, bylo by potřeba v území umístit několik pyrometrů i na různě skloněná, orientovaná a zastíněná místa a provádět zde dlouhodobé měření. To je ovšem na čas i náklady velmi náročné řešení.

6.4 Srovnání výsledků s odbornou literaturou

Výsledky práce je těžké srovnávat s odbornou literaturou, protože vlivem nastavením parametrů modelu Solar Analyst se autoři příliš nezabývají. Vývojáři modelu (Fu, Rich, 1999) i nápověda k modelu (ArcGIS help, 2015) říkají, jak

výrazně zvýšení hodnot jednotlivých parametrů prodlouží čas výpočtu a že zvýšení hodnot většiny parametrů zvýší přesnost výsledné solární mapy jen o trochu. Dále uvádějí, že defaultní nastavení modelu je dostatečné pro většinu analýz a zvyšování hodnot jednotlivých parametrů se na hodnotách dopadajícího záření projeví zanedbatelně. Pro území s komplexnější topografií doporučují využít vyšší hodnoty parametrů. Tyto informace výsledky této práce potvrdily. Nicméně v manuálu (Fu, Rich, 1999) v případě testování parametru *sky size* byla obdržena vyšší shoda mezi modelovanými hodnotami dopadajícího záření s různým nastavením tohoto parametru, než v případě této práce. Uváděná shoda v manuálu je 0,99995 a v této práci v případě území Pece pod Sněžkou v průměru dosahuje 0,9975 a to jen v případě střešních ploch, v jiných částech území je shoda nejspíše ještě výrazně nižší, ale ty nebyly statisticky vyhodnocovány. Vliv ostatních parametrů není v manuálu kvantifikován a nelze ho srovnat s touto prací.

Ruiz-Arias, et al. (2008) srovnává několik modelů pro odhad dopadajícího záření (Solar Analyst, SRAD, r.sun, Solei-32) s různým rozlišením *DEM* (100m, 20m) a při různých atmosférických podmínkách (*clear sky*, *general clear sky*, *overcast sky*) a hodnotí jejich přesnost s naměřenými daty ze 14 pyrometrů. Dochází k závěru, že radiační parametr *transmittivity* v případě modelu Solar Analyst je velmi citlivý na přítomnost oblačnosti a je velmi těžké stanovit jeho hodnotu. Proto jsou odhady dopadajícího záření poskytnuté tímto modelem méně přesné než v případě ostatních zmíněných modelů, které využívají větší počet nebo jiné parametry pro postihnutí vlastností atmosféry. Nejhorší odhad modeluje Solar Analyst v podzimních a jarních měsících, kdy právě propustnost atmosféry výrazně kolísá. To potvrzuje její významné postavení v algoritmu modelu a potřebu získat její nejpřesnější hodnoty v co nejkratším intervalu pro území, kde je solární potenciál odhadován s využitím tohoto modelu.

Tooke, et al., (2011). také vyzdvihuje důležitost postihnout dynamiku radiačních parametrů v průběhu roku pro přesný odhad dopadajícího slunečního záření. Při svých analýzách došel k závěru, že v průběhu roku dochází ke značným rozdílům v relativním poměru přímé a rozptýlené složky záření. Tento rozsah v odhadu dopadajícího záření jasně ukazuje důležitou roli vliv atmosférických podmínek na časoprostorovou distribuci dopadajícího záření i na jeho celkové množství zejména v městském urbanizovaném prostředí. Tyto atmosférické podmínky je tedy potřeba brát v úvahu při modelování dopadajícího záření a následně při plánování a provádění různých městských strategií v oblasti solární energie. Tento zásadní vliv atmosférických podmínek byl v této práci v rámci 4.

scénáře v kapitole 4.4. potvrzen. Dále však Tooke, et al. (2011) uvádí, že ačkoliv existují velké rozdíly v rozsahu a distribuce hodnot záření v závislosti na atmosférických podmínkách, tyto rozdíly mají minimální statistický dopad na celkové množství dopadajícího záření na sledované ohraničené plochy v městském prostředí. To výsledky této práce naopak vyvracejí, protože při analýze vlivu atmosférických podmínek docházelo k významným rozdílům v distribuci hodnot záření, ale i celkovému množství dopadajícího záření na ohraničené plochy střech a to v řádech desítek procent.

Protože některé parametry mohou mít zásadní vliv na výsledky a jejich špatné nastavení může zapříčinit chyby ve výpočtu, solární mapy prezentované v případových studiích je možné využít jako podkladová data pro umístění solárních střešních systémů jen v případě, že autoři uvádějí nastavení všech parametrů a využívají hodnoty radiačních parametrů získané měřením v území nebo z databází využitých v této práci (Aquayo, 2013; Bambulová, 2013). Nicméně Aquayo (2013) při analýze území centra velkoměsta s výškově členitou zástavbou využila naměřené hodnoty radiačních parametrů, ale ostatní parametry ponechala na defaultní hodnotě a zde nelze říci do jaké míry jsou výsledky realistické zejména v zastíněných místech. Někteří autoři (Will, 2011; Kodysh, 2013; Carl, 2014) uvádějí nastavení všech nebo téměř všech parametrů, ale využívají defaultní hodnoty radiačních parametrů, které mají na výpočet nejzásadnější vliv a solární mapy prezentované v těchto studiích tak mohou obsahovat zavádějící hodnoty dopadajícího záření, což jejich využití jako podkladových dat pro aplikace střešních solárních systémů vylučuje.

U většiny solárních map prezentovaných v prostudovaných případových studiích (Bailang, et al., 2009; Brito, et al., 2010; Dorothea, et al, 2009; Boehnlein, 2010; Nakanishi, 2010; Leitelt, 2010; Minghetti, et al., 2011; Santos, et al., 2011; Redweik, et al., 2013; Brant, 2014; Chow, et al., 2014; Santos, et al., 2014;) však nelze hodnotit správnost nastavení parametrů potažmo přesnost a věrohodnost solární mapy, protože neuvádějí nastavení většiny parametrů. To je považováno, za největší nedostatek v prostudovaných případových studiích, protože nelze odhadnout jejich vypovídající hodnotu v podobě blízkosti skutečných a modelovaných hodnot dopadajícího záření a přesnost solární mapy, což vede ke složitějšími rozhodování ohledně umístění střešního solárního panelu.

7 Závěr

Autoři odborné literatury, kteří modelují solární potenciál s využitím Solar Analyst a prezentují v závěru své práce solární mapy pro určité území, velmi často neuvádějí veškerá nastavení parametrů. V případě, že jejich nastavení uvádějí, využívají zejména defaultní hodnoty parametrů. Zvolené nastavení modelu odůvodňují jen zřídka, výjimečně diskutují nastavení hodnot radiačních parametrů, pokud se jimi zabývají.

Analýza vlivu parametrů na výsledky, prokázala minimální vliv na celkové hodnoty dopadajícího záření u většiny parametrů. Zvyšování hodnot parametrů *sky size*, *calculation direction* a zkracování *day interval* se projevuje podrobnější časoprostorovou distribucí dopadajícího záření, která vede k obdržení podrobnější intenzity a obrysu stínů a plynulejšímu přechodu mezi místy s odlišnou hodnotou dopadajícího záření ve výsledné solární mapě. Ve výsledcích analýz byl zaznamenán o trochu vyšší vliv parametrů těchto parametrů v případě topograficky členitějšího území. Nicméně v rámci vyhodnocovaných střešních ploch byl zjištěn rozdíl sumy dopadajícího záření na jednotlivé střechy maximálně 1,5 %, což je zanedbatelné množství. Navíc výpočetní čas se prodloužil až o 2 000% oproti defaultnímu nastavení. Tedy defaultní nastavení těchto parametrů, v případě analyzovaných území, kde si jednotlivé objekty stíní jen minimálně, je dostatečné. Naopak radiační parametry *diffuse proportion* a *transmittivity* zásadně ovlivňují celkové sumy dopadajícího záření v řádech desítek procent i jeho časoprostorovou distribuci. Tyto parametry mají tedy nejvyšší prioritu, protože jejich špatný odhad může poskytnou velmi odlišné výsledky oproti skutečnosti.

Parametry modelu Solar Analyst by měli být nastavovány na základě požadavků na přesnost a podrobnost výsledné solární mapy, rozlišení vstupních topografických dat (*DEM*), topografické členitosti území, charakteru a hustotě zástavby, dlouhodobém měření atmosférických charakteristik přímo v území a s ohledem na časovou náročnost výpočtu. Dále je třeba vzít v úvahu, že některé parametry mají limitující či synergický vztah vzhledem k ostatním.

Některé parametry tedy mohou mít významný vliv na výsledné modelované hodnoty dopadajícího záření v solárních mapách a špatná či nahodilá parametrizace modelu může zapříčinit chyby ve výpočtu. Autoři solárních map prezentovaných v odborné literatuře by tedy měli uvádět zvolené nastavení parametrů modelu, aby jejich výsledky mohli být využity jako podkladová data pro aplikace střešních solárních systémů.

8 Zdroje

Aquayo, P., 2013. Solar Energy Potential Analysis at Building Scale Using LiDAR and Satellite Data [online]. Waterloo, 2013 [cit. 2014-09-01]. Retrieved from: <http://scholar.google.cz/scholar>. Thesis work. University of Waterloo

AHN, 2015. Actueel Hoogtebestand Nederland 2, Geoportal. Retrieved from: <http://www.ahn.nl>

ArcGIS Help Library Online, 2015. Area solar radiation (Spatial Analyst). ArcGIS Resource Center. [online]. [cit. 2014-09-01]. Retrieved from: <http://resources.arcgis.com/>

Bailang, Y., L. Hongxing, W. Jianping a L. Wei-Ming, 2008. Investigating impacts of urban morphology on spatio-temporal variations of solar radiation with airborne LIDAR data and a solar flux model: a case study of downtown Houston. In: International Journal of Remote Sensing [online]. Taylor & Francis, 2009 [cit. 2014-09-01]. DOI: 10.1080/01431160802555846. Retrieved from: <http://www.tandf.co.uk/journals>

Bambulová, I., 2013. Analýza využitelnosti solární energie v městské zástavbě [online]. Praha, 2013 [cit. 2014-09-01]. Retrieved from: geo.fsv.cvut.cz/proj/bp/2014/zbynek-prazak-bp-2014.pdf. Diplomová práce.

Boehnlein, P., 2010. A Solar Insolation Mode for The Kent State University Main Campus. In: [online]. 2010. vyd. [cit. 2015-02-18]. Retrieved from: <http://www.personal.kent.edu/>

Bode, C.A., M. P. Limm, M. E. Power and J. Finlay, 2014. Subcanopy Solar Radiation model: Predicting solar radiation across a heavily vegetated landscape using LiDAR and GIS solar radiation models, Remote Sensing of Environment (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.028>

Brant, D. C. Rooftop Solar Capacity Modeling using GIS Within the City of Stillwater, MN [online]. Wisconsin, 2013 [cit. 2015-02-17]. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. University of Wisconsin - River Falls. Retrieved from: minds.wisconsin.edu

Brito, M.C., N. Gomes, T. Santos a J.A. Tenedório, 2010. Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data. In: [online]. Elsevier Ltd. Solar Energy, 86 (2012),

283-288, 2010 [cit. 2014-09-01]. DOI: 10.1016/j.solener.2011.09.031. Retrieved from: www.sciencedirect.com

Carl, C., 2014. Calculating Solar Photovoltaic Potential On Residential Rooftops In Kailua Kona, Hawaii [online]. California, 2014 [cit. 2014-09-01]. Retrieved from: <https://www.google.cz/>. Thesis work. University of Southren California.

ČSÚ, 2015. Český statistický úřad. Retrieved from: <https://www.czso.cz/>

Dorothea, L., S. Lanig, M. Klärle, 2009. Enviroinfo, 23rd International Conference on Informatics for Environmental Protection. Environmental informatics and industrial environmental protection: concepts, methods and tools [online]. Aachen: Shaker, 2009 [cit. 2015-02-16]. ISBN 978-383-2283-971.

Dubayah, R. and P.M. Rich. 1996. GIS-based solar radiation modeling. pp 129-134. In: MJ. Goodchild, L.T. Steyaert, B.O. Parks. C. Johnston, D. Maidment, M. Crane, and S. Glendinning (eds). GIS and environmental modeling: progress and research issues. GIS World Books. Fort Collins, Co.

EkoWATT, 2015. Centrum Pro Obnovitelné Zdroje A Úspory Energie. Retrieved from: <http://fotovoltaika.ekowatt.cz/stanoveni-dopadajici-slunecni-energie.php>

ESRI ArcUser Online, 2015. Environmental Systems Research Institute. [cit. 2014-09-01]. Retrieved from: <http://www.esri.com/news/arcuser>

Fu, P. and P. M. Rich, 1999. Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. Proceedings of the 19th Annual ESRI User Conference, San Diego, USA, Retrieved from: <http://www.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap867/p867.htm>.

Freitas, S., C. Catita and M.C. Brito, 2015. Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-artreview. Elsevier Ltd. Renewable and Sustainable Energy [online]. 41 915 - 931 2015 [cit. 2015-04-14].

GAISMA, 2015. Sunrise, sunset, dawn and dusk times database. Retrieved from: <http://www.gaisma.com>

Hofierka, J., J. Kaňuk J. and M. Gallay, 2014. Spatial distribution of photovoltaic power plants in relation to a solar resource potential: a case study of the Czech Republic and Slovakia. Moravian Geographical Reports. 2014.

CH2M, 2015. Solar Map Development. Retrieved from:

<http://www.ch2m.com/corporate>

Chow, A., A. S. Fung and S. Li, 2014. GIS Modeling of Solar Neighborhood Potential at a Fine Spatiotemporal Resolution. [online]. 2014 [cit. 2014-09-01]. DOI: 10.3390/buildings4020195. Retrieved from: www.mdpi.com/journal/buildings/

JRC, 2015. Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps. Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport. Retrieved from: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>

Kodysh, J. B., O. A., Omitaomu, B. L. Bhaduri and B. S. Neish, 2013. Methodology for estimating solar potential on multiple building rooftops for photovoltaic systems. *Sustainable Cities and Society* 8, 31-41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2013.01.002>

KRNAP, 2015. Správa Krkonošského národního parku. Retrieved from:

<http://www.krnep.cz>

Leitelt, L. R., 2010. Developing a Solar Energy Potential Map for Chapel Hill, NC [online]. Chapel Hill, 2010 [cit. 2014-09-01]. Retrieved from:

<https://www.google.cz/>. Thesis work. University of North Carolina at Chapel Hill.

Liu, M., A. Bárdossy, J. Li and Y. Jiang, 2011. GIS-based modelling of topography-induced solar radiation variability in complex terrain for data sparse region. *International Journal of Geographical Information Science* [online]. 2012, 1281–1308 [cit. 2015-04-14]. Retrieved from:

<http://dx.doi.org/10.1080/13658816.2011.641969>

Lukač, N., D. Žlaus, S. Seme, B. Žalik and G. Štumberger, 2012. Rating of roofs surfaces regarding their solar potential and suitability for PV systems, based on LiDAR data. *Applied Energy*, 102, 803–812.

Minghetti, A., DR., P. Africani, ENG., and E. Paselli, 2011. Eng., 2011. Bologna Solar City, A Web Application For The Analysis Of Potential Energy: From Estimating Solar Radiation To The Realization Of The Application. 17th „Building Services, Mechanical and Building Industry Days” Urban Energy Conference, Debrecen, Hungary [online]. 2011, s. 6 [cit. 2015-02-16]. Retrieved from:

www.energycity2013.eu

Nakanishi, T., 2010. Identifying and Viewing Rooftop Solar Potential: A Case Study for the City of Redlands, California (Master's thesis, University of Redlands. Retrieved from http://inspire.redlands.edu/gis_gradproj/128

NASA, 2015. NASA Surface meteorology and Solar Energy: Interannual Variability. Atmospheric data science center. Retrieved from: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov>

NRELA, 2015. National Renewable Energy Laboratory. Dynamic Maps, GIS Data and Analysis Tools. Retrieved from: http://www.nrel.gov/gis/solar_map_development.html

NRELB, 2015. NREL's PVwatts Calculator. Retrieved from: <http://pvwatts.nrel.gov>

Oršulák, T., 2010. Digitální modely terénu. [online]. 2010 [cit. 2015-04-09]. Retrieved from: <http://gis.fzp.ujep.cz/DTM/3d.pdf>

PVGIS, 2015. Solar radiation database. Retrieved from: <http://photovoltaic-software.com/pvgis.php>

PVwatts, 2015. Solar Energy Web. Retrieved from: <http://www.pvwatts.org>

Redweik, P., C. Catita a M.C. Brito, 2013. 3d Local Scale Solar Radiation Model Based On Urban Lidar Data. In: [online]. Lisabon, 2013 [cit. 2014-09-01]. Retrieved from: <http://www.academia.edu>

REUK, 2015. The Renewable Energy Website. Retrieved from: www.reuk.co.uk

Rich, P.M., J. Wood, D.A. Vieglais, K. Burek, and N. Webb, 1999. Guide to HemiView: software for analysis of hemispherical photography. Delta-T Devices, Ltd., Cambridge, England.

Ruiz-Arias, J. A., J. Tovar-Pescador, D. Pozo-Vázquez and H. Alsamamra, 2008. A comparative analysis of DEM-based models to estimate the solar radiation in mountainous terrain. International Journal of Geographical Information Science [online]. 2009, No. 8, 1049-1076 [cit. 2015-04-14]

Santos, T., N. Gomes, M. Brito, S. Freire, A. Fonseca and J. António, 2011. Solar Potential Analysis in Lisbon Using LiDAR Data. Remote Sensing and Geoinformationnot only for Scientific Cooperation [online]. 2011 [cit. 2014-09-01]. Retrieved from: <https://www.google.cz/>

Santos, T., N. Gomes, S. Freire, M. C. Brito, L. Santos and J. A. Tenedório, 2014. Applications of solar mapping in the urban environment [online]. Elsevier Ltd., Applied Geography 51 (2014) 48-57 2014 [cit. 2014-09-01]. Retrieved from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143622814000587>

SN, 2015. Statistics Netherlands. Retrieved from: <http://www.cbs.nl/en-GB/menu/home/default.htm>

Tooke, T. R., N. C. Coops, J. A. Voogt. and M. J. Meitner, 2011. Tree structure influences on rooftop-received solar radiation. Landscape and Urban Planning, 102(2), 73 81.

Will, J., 2011. Using high resolution DSMs to assess solar irradiation in urban environments: Evaluation of data sources and methods. Göteborg, 2011. ISSN 1400-3821. Retrieved from: <http://scholar.googleusercontent.com/scholar>. Bachelor thesis. Göteborg University.