

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

VLIV ROZLIŠENÍ VSTUPNÁCH DAT NA VÝPOČET
SOLÁRNÍ RADIACE: PŘÍPADOVÁ STUDIE
V KRKONOŠÍCH
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing Vítězslav Moudrý, Ph.D.
Bakalant: Jan Vitvar

2016

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jan Vitvar

Krajinářství

Název práce

Vliv rozlišení vstupních dat na výpočet solární radiace: Případová studie v Krkonoších

Název anglicky

Influence of input data resolution on solar radiation estimates: Case study from Krkonoše Mountains

Cíle práce

- Rešerše využití modelů solární radiace a vlivu měřítka na její odhad
- Výpočet solárního potenciálu pro oblast KRNAPu s využitím dat různého rozlišení
- Zhodnocení vlivu použitého rozlišení na výsledný odhad solárního potenciálu

Metodika

Sluneční záření hraje důležitou roli v rozšíření, složení a produktivitě ekosystémů a jako takové je často využíváno v modelech distribuce rostlinných druhů. Nicméně kvalita odhadu solárního potenciálu je ovlivněna mnoha vstupními faktory. Jedním z důležitých vstupů pro některé typy modelů (např. ArcGIS Area Solar Radiation) jsou digitální modely terénu, které mohou ovlivnit výsledný odhad skrze nepřesnou reprezentaci terénu (např. svažitost). Řešitel zpracuje literární rešerši z oblasti modelování solární radiace, přičemž se zaměří na vliv měřítka vstupních dat na její odhad. S využitím různých datových sad vypočítá řešitel solární radiaci v Krkonoších a posoudí vliv vstupních dat na odhadovaný potenciál.

Doporučený rozsah práce

25 – 35 stran.

Klíčová slova

Formulace klíčových slov je úkolem autora.

Doporučené zdroje informací

- 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>.
- Kodysh, J. B., Omिताomu, 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.
- Ruiz-Arias, J. A., Tovar-Pescador, J., Pozo-Vazquez, D., & Alsamamra, H. 2009. A comparative analysis of DEM-based models to estimate the solar radiation in mountainous terrain. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(8), 1049 – 1076.
- Zhang, S., Li, X., & Chen, Y. 2015. Error assessment of grid-based direct solar radiation models. *International Journal of Geographical Information Science*, 29(10), 1782-1806.
- Zink, R., Camargo, L. R., & Reidelst, P. 2015. Photogrammetric point clouds for GISbased high-resolution estimation of solar radiation for roof-top solar systems. *Surface Models for Geosciences*. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-18407-4>.
-

Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Elektronicky schváleno dne 29. 2. 2016

doc. Ing. Petra Šímová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 7. 3. 2016

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 11. 04. 2016

Prohlášení

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

V Praze 12. 4. 2016

.....

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Vítězslavu Moudrému, Ph.D., za ochotu, trpělivost a cenné rady, které mi byly při zpracování této práce velmi nápomocny. Rovněž děkuji své rodině za trvalou podporu při studiu.

Abstrakt

Znalost množství dopadající sluneční radiace na určité území je podstatná z hlediska energetiky, může však být důležitá například i pro ekology. Tato práce se zaměřuje na odhad solárního potenciálu pomocí geografického informačního systému ArcGIS, konkrétně se zabývá funkcí Area solar radiation. Cílem práce je popsat problematiku odhadu solárního potenciálu a posoudit vliv rozlišení vstupních dat na výsledný solární potenciál a dobu výpočtu. Pro výpočet byla vybrána lokalita Krkonošského národního parku. Byly obstarány tři datové sady, z nichž každá představovala digitální model terénu (DEM) zájmové lokality v jiném rozlišení (2 m, 30 m, 90 m). Z naměřených výsledků vyplývá, že pro zvolení správného měřítka vstupního DEM, je zapotřebí přistupovat ke každé situaci individuálně. Při zvolení nedostatečně velkého rozlišení dochází ke ztrátě informace nízkých hodnot solárního potenciálu, které mohou být podstatné pro ekology například při modelování druhové distribuce. Se zvyšujícím se rozlišením se výrazně prodlužuje doba výpočtu. Při použití velmi vysokého rozlišení vstupních dat (2 m) trval výpočet pro území KRNAP (961 km²) téměř 5 týdnů, zatímco výpočet v rozlišení 90 m trval jednu hodinu. Z dosažených výsledků je patrné, jak důležité je hledat kompromis mezi dostatečnou přesností výsledného solárního potenciálu a dobou výpočtu.

Klíčová slova: Digitální model terénu (DEM), geografický informační systém (GIS), rozlišení, solární potenciál

Abstract

The knowledge of the amount of incident solar radiation on a certain area is significant in terms of energy, but is also key for environmentalists. This work aims to estimate the solar potential utilizing the geographic information system “ArcGIS,” more specifically; using the “Area Solar Radiation” function. The aim is to describe the problems of estimating solar potential and assess the impact of resolution of the input data for the resulting solar potential and calculation time. The Giant Mountains National Park in the Czech Republic were chosen as the test location for this work. Three data sets were used, each of which featured a “Digital Elevation Model” (DEM) places of interest in three different resolutions (2 m., 30 m. and 90 m.). From the measured results, it is clear that for choosing the correct DEM input measurement, there is a need to assess each situation individually. When selecting an insufficient resolution, low solar potential value information loss occurs, which may be relevant for environmentalists, i.e., when modeling species distributions. Increasing resolution significantly extends the period of calculation. When using a very high resolution of the input data (2 m.), the calculation lasted for almost 5 weeks at Giant Mountains National Park (961 km²). On the other hand, the calculation of the 90 meter resolution lasted only one hour. The obtained results show how important it is to find a compromise between sufficient accuracy of the resulting solar potential and time calculation.

Key words: Digital Elevation Model (DEM), Geographical Informational System (GIS), resolution, solar potential

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Literární rešerše	12
2.1	Zdroje energie.....	12
2.1.1	Sluneční energie	13
2.2	Sluneční záření	13
2.2.1	Faktory redukující sluneční záření	13
2.3	Modely terénu.....	14
2.3.1	Výpočet svazitosti	15
2.3.2	Algoritmus orientace.....	16
2.4	Odhad solárního potenciálu.....	17
2.4.1	Solar radiation tools a nástroj Area Solar Radiation.....	18
2.4.2	Výpočet mapy zastínění	18
2.4.3	Výpočet mapy slunce	19
2.4.4	Výpočet mapy oblohy	20
2.4.5	Výpočet solárního potenciálu.....	21
2.5	Využití odhadu solárního potenciálu.....	22
2.5.1	Využití z hlediska energetiky.....	22
2.5.2	Využití z hlediska ekologie.....	23
2.6	Měřítko v GIS.....	24
3	Materiály a metodika	26
3.1	Zájmové území	26
3.2	Použitá data	26
3.2.1	SRTM.....	26
3.2.2	Digitální model reliéfu páté generace	27
3.3	Postup v ArcGIS.....	27
3.3.1	Volba počátečních podmínek výpočtu Area Solar Radiation	28

3.4	Metodika vyhodnocování výsledků.....	31
4	Výsledky	33
5	Diskuze	41
6	Závěr	43
7	Zdroje.....	44
8	Přílohy.....	48

1 Úvod

Spotřeba energie lidstva se stále zvyšuje a konvenční zdroje energie, jako jsou fosilní paliva, která vévodí světové energetice, nejsou nevyčerpatelné a mají negativní dopad na životní prostředí. Budoucnost světové energetiky může být v solární energii, která je šetrná k životnímu prostředí a představuje pro lidstvo neomezený zdroj. Aby se solární energie začala více využívat a stala se primárním zdrojem energie na naší planetě, je zapotřebí se jí naučit efektivně získávat. V dnešní době se solární elektrárny staví zejména na orné půdě, což je problematické, protože tak zabírají místo pro pěstování plodin. Budoucností šíření solární energetiky je umístování solárních panelů na místa, která už nejsou jinak využitelná (střechy budov nebo tzv. brownfieldy). Základním předpokladem k šíření solární energetiky tímto způsobem, je znalost množství solární energie dopadající na zájmové oblasti. Díky tomu jsme schopni určit, zda se investice do solárního systému vyplatí, či nikoliv. Množství solární energie, které potenciálně dopadne na určité místo, vyjadřuje tzv. solární potenciál. Znalost solárního potenciálu není podstatná pouze z hlediska energetiky, je důležitá i pro jiné vědní obory, například ekologii. Data solárního potenciálu jsou dostupná z meteorologických stanic, ale pouze pro omezené území kolem nich. V dnešní době existují způsoby, jak lze solární potenciál odhadovat. K dispozici jsou různé webové a počítačové aplikace, které však pracují s nízkou přesností. Jednou z možností, jak efektivně a přesně odhadovat solární potenciál je pomocí geografických informačních systémů (GIS). Tato práce je zaměřena konkrétně na ArcGIS (ESRI), který obsahuje nástrojovou sadu Solar radiation tools. Jedním z nástrojů této sady je Area solar radiation, pomocí kterého jsme schopni vytvořit poměrně přesný a efektivní odhad solárního potenciálu. Jako vstup pro výpočet odhadu solárního potenciálu tímto nástrojem je rastr digitálního modelu terénu (DEM). Přesnost konečného výsledku závisí na rozlišení vstupního DEM a několika parametrech zadávaných před započítáním výpočtu. Problematikou odhadu solárního potenciálu v GIS se zabývá mnoho studií, málokterá se však zabývá vlivem velikosti vstupního měřítka na konečnou přesnost odhadu solárního potenciálu. Tato práce je zaměřena na rozlišení vstupního DEM, zkoumá vliv měřítka na konečný výsledek odhadu solárního potenciálu.

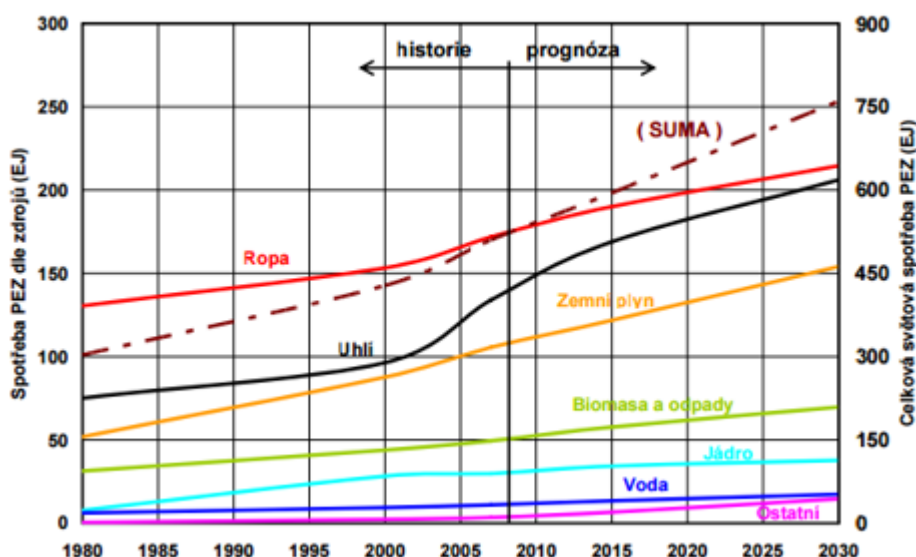
Cíle práce:

- Rešerše využití modelů solární radiace a vlivu měřítka na její odhad
- Výpočet solárního potenciálu pro oblast KRNAPu s využitím dat různého rozlišení
- Zhodnocení vlivu použitého rozlišení na výsledný odhad solárního potenciálu

2 Literární rešerše

2.1 Zdroje energie

Již od nepaměti byli lidé zvyklí využívat přirozených zdrojů Země. Brali si pouze to, co příroda dokázala unést, a významně nezatěžovali životní prostředí. Vše se však změnilo s nástupem průmyslové revoluce v 18. a 19. století. Byly objeveny nové zdroje energie a v důsledku toho se začalo výrazně měnit zemědělství a průmysl. Lidé začali využívat fosilní paliva, v té době především uhlí. Dnes lidé využívají celou řadu neobnovitelných zdrojů energie, které vévodí světové energetice a pokrývají přibližně 90 % světové spotřeby (Janalík, 2012). Vývoj jednotlivých energetických zdrojů od roku 1980 a předpokládaná blízká budoucnost do roku 2030 jsou ilustrovány na obr. 1.



Obr. 1: Vývoj spotřeby jednotlivých zdrojů primární energie na Zemi. (Janalík, 2012)

Neobnovitelné zdroje s sebou však nesou značná negativa pro životní prostředí, což se v poslední době projevuje zejména v podobě globálního oteplování. Navíc tyto zdroje nejsou nekonečné a jejich zásoby rychle mizí. Například při současné spotřebě se zásoby uhlí odhadují na 600 let, zásoby ropy dokonce na pouhých 50 až 70 let (Mastný, et al., 2011). Je zřejmé, že současná energetická situace je dlouhodobě neudržitelná a lidstvo se musí zaměřit na využívání obnovitelných zdrojů energie.

2.1.1 Sluneční energie

Energie ze Slunce je primárním zdrojem energie pro naši Zem. Od této energie je odvozena většina energetických zdrojů, které lidstvo využívá. Snad kromě geotermální a jaderné energie pochází všechna energie na naší planetě ze Slunce. Větrná energie vzniká nerovnoměrným zahříváním zemského povrchu, způsobené Sluncem. Ve fosilních palivech a biomase je solární energie akumulována po fotosyntetické přeměně anorganických látek na organické. Vodní energie je důsledkem vypařování vody a následné kondenzace na místech, kde má vyšší potenciální energii (Murtinger & Truxa, 2006).

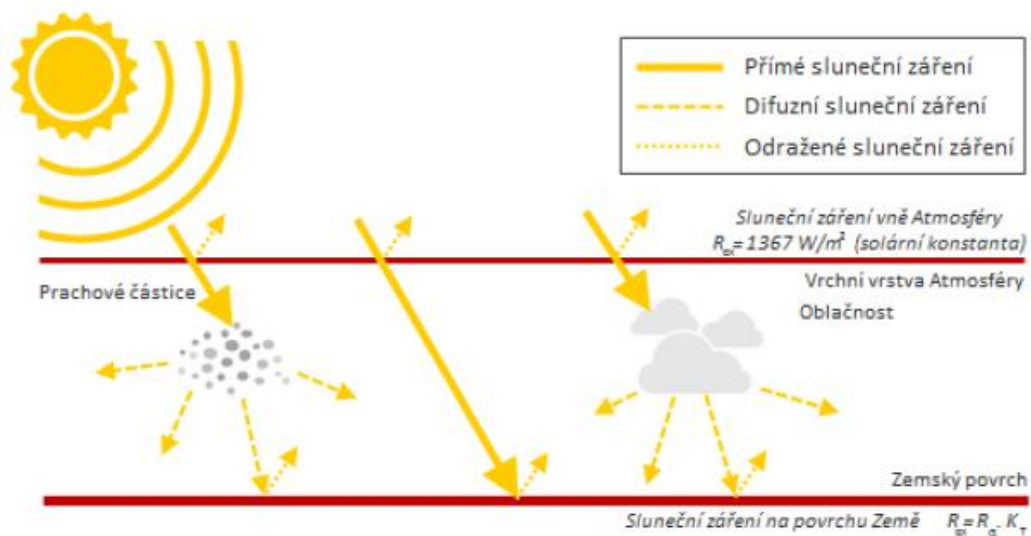
Sluneční energie vzniká v důsledku termonukleárních reakcí ve slunečním jádru, kde se atomy vodíku rozkládají na atomy hélia. Tato energie se ze slunce vyzařuje prostřednictvím elektromagnetického záření (Libra & Poulek, 2005).

2.2 Sluneční záření

Elektromagnetické záření, vyzařované sluncem lze považovat za konstantní. Mění se jen mírně v závislosti na sluneční aktivitě. Průměrnou intenzitu solárního záření, dopadající na jednotku plochy Země mimo zemskou atmosféru vyjadřuje tzv. solární konstanta $I = 1367 \text{ W/m}^2$. Intenzita slunečního záření se však průchodem atmosférou značně snižuje (Libra & Poulek, 2005).

2.2.1 Faktory redukovující sluneční záření

Za redukci slunečního záření mohou zejména tři procesy: odraz, rozptyl a absorpce. Bez nich by život na naší planetě nebyl možný. Odraz je významný faktor redukovující záření. Dochází k němu především ve stratosféře při nárazu paprsků do mraků. Část paprsků se odráží od samotného zemského povrchu. Velikost odrazu závisí na odrazivosti daného povrchu, na tzv. albedu. Například zasněžené oblasti mají vysoké albedo, na rozdíl od hladiny oceánů, které pohltí většinu záření. K rozptylu dochází při nárazu paprsků do molekul a malých částic. Záření je poté rozptýleno do mnoha směrů, část z nich je nasměrována zpět. Při nárazu záření do částice je část energie absorbována a mění se na teplo. Záření, které volně projde k zemskému povrchu a nemění se na rozptýlené, se nazývá přímé sluneční záření. Tzv. globální záření je součet přímého a rozptýleného záření. Schéma globálního záření na Zemi je naznačeno na obr. 2.



Obr. 2: Schéma globálního záření (Bambulová, 2013)

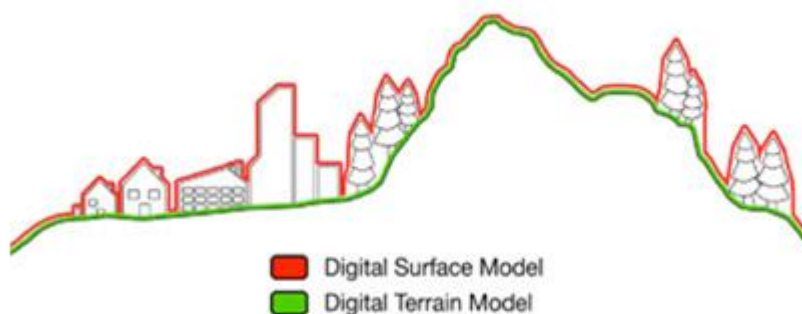
Kromě těchto tří základních fyzikálních procesů je výsledné množství dopadajícího slunečního záření závislé na dalších několika parametrech. Jedná se o následující: topografie terénu, aktuální stav atmosféry, zeměpisná šířka, nadmořská výška, orientace a sklon povrchu a v neposlední řadě také denní a sezónní pohyb slunce (Murtinger & Truxa, 2006).

2.3 Modely terénu

Digitální modely terénu jsou důležitou součástí mnoha prostorových analýz. Představují přibližné modely skutečného terénu. Data pro tvorbu digitálních modelů terénu jsou získávána několika různými způsoby, například pomocí fotogrammetrie, nebo LIDARu (light detection and ranging). Výsledný digitální model reprezentuje dvourozměrný rastr (může být představován i vektorovou vrstvou - např. vrstevnice), kde hodnoty pixelů uchovávají nadmořskou výšku.

V odborné literatuře není sjednoceno používání následujících pojmů, které se mezi sebou často zaměňují. Jsou to DEM (digital elevation model), DTM (digital terrain model) a DSM (digital surface model). Termín DEM neboli digitální výškový model je nadřazený a zahrnuje dva odlišné topografické modely. Jsou to DTM neboli digitální model terénu a DSM, což je digitální model povrchu. Rozdíly mezi těmito dvěma pojmy ukazuje obr. 3. DSM představuje nadmořskou výšku zemského povrchu a všech objektů na něm, antropogenních (budovy, infrastruktura aj.) i přírodních

(vegetace aj.). DSM se využívá pro modelování krajiny a měst. Mimo jiné se používá i pro odhad solárního potenciálu (Kodysh, et al., 2013). DTM představuje samotný výškový model terénu zbavený všech objektů. DTM se využívá při různých geologických studiích, studiích půdy nebo např. při tvorbě modelů povrchového odtoku (Geoimage Pti Ltd., 2012). Oba typy modelů se využívají jako základ pro odvození sekundárních aspektů, jakými jsou například sklonitost, orientace a odhad solární radiace (Jones, 1998).



Obr. 3: Rozdíl mezi digitálním modelem terénu (DTM) a povrchu (DSM) (Geoimage Pti Ltd., 2012)

2.3.1 Výpočet svažitosti

Znalost svažitosti je jedním ze základních předpokladů potřebných při určování solárního potenciálu. Vyjadřuje, pod jakým úhlem leží daný svah, respektive jak je svah strmý nebo mírný. Pro výpočet svažitosti je používáno několik algoritmů (Jones, 1998). Vzhledem k tomu, že tato práce se zaměřuje na software ArcGIS (ESRI), je na následujících řádcích vysvětleno fungování tzv. Hornova algoritmu svažitosti (Horn, 1981), který je v ArcGIS používán. Algoritmus vychází z definice první parciální derivace povrchu a jeho základem je vzorec (1).

$$Slope = \tan^{-1} \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2} \quad (1)$$

Algoritmus počítá míry změny sklonitosti povrchu ve dvou směrech (dz/dx), (dz/dy) kolem středové buňky (e), z hodnot nadmořských výšek okolních osmi buněk DEM (buňky a , b , c , d , f , g , h , i). Uspořádání buněk znázorňuje obr 4.

Algoritmus počítá svažitost pro každou buňku rastru DEM zvlášť. Míra změny svažitosti ve směru (x) je počítána pomocí rovnice (2), ve směru (y) pomocí rovnice (3), kde hodnoty a, b, c, d, f, g, h, i představují nadmořské výšky okolních buněk a hodnota c představuje velikost pixelu (rozlišení) (ArcGIS Help, 2016).

$$\frac{dz}{dx} = \frac{(c+2f+i)-(a+2d+g)}{8*c} \quad (2)$$

$$\frac{dz}{dy} = \frac{(g+2h+i)-(a+2b+c)}{8*c} \quad (3)$$

a	b	c
d	e	f
g	h	i

Obr. 4: Uspořádání buněk při výpočtu sklonitosti a orientace (ArcGIS Help, 2016)

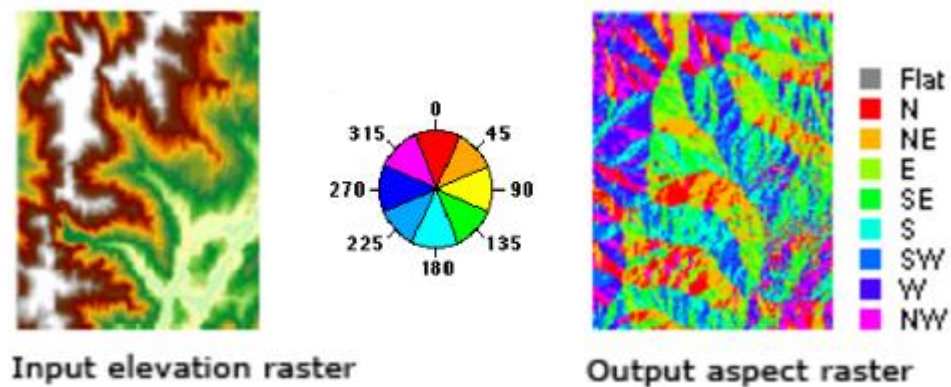
2.3.2 Algoritmus orientace

Výpočet orientace je další nezbytný úkon při modelování solárního potenciálu. Vyjadřuje, na kterou světovou stranu je svah orientovaný. Výpočet orientace v softwaru ArcGIS je na stejné bázi jako výpočet sklonitosti. Algoritmus počítá orientaci pro každou buňku rastru DEM zvlášť (buňka e) a určuje ji z hodnot nadmořských výšek okolních osmi buněk DEM (buňky a, b, c, d, f, g, h, i) obr. 4. Algoritmus vychází z výpočtu míry změny povrchu ve směrech (dz/dx) a (dz/dy), kolem zájmové buňky. Míry změny povrchu jsou počítány pomocí rovnic (4) a (5). Poté je dopočítán poměr stran podle vzorce (6). Výsledek je ve stupních ($0 - 360^\circ$) a lze podle něj určit orientaci ke světové straně. Od hodnoty 0° , která udává sever, je po směru hodinových ručiček na 90° východ, na 180° jih, na 270° západ a 360° udává znovu sever. Jak probíhá výpočet orientace je znázorněno na obr. 5.

$$\frac{dz}{dx} = \frac{(c+2f+i)-(a+2d+g)}{8} \quad (4)$$

$$\frac{dz}{dy} = \frac{(g+2h+i)-(a+2b+c)}{8} \quad (5)$$

$$Aspect = \frac{180}{\pi} * \arctan^2 \left(\left[\frac{dz}{dx} \right] - \left[\frac{dz}{dy} \right] \right) \quad (6)$$



Obr. 5: Výpočet orientace v ArcGIS (ArcGIS Help, 2016)

2.4 Odhad solárního potenciálu

Určení solárního potenciálu je stěžejní záležitostí pro projektování fotovoltaických elektráren, solárních kolektorů, ale má i hojně využití například v ekologii (Pidellu & Gégout, 2008; Franklin, 1998). Vyjadřuje, kolik solární energie dopadne na určité místo za stanovenou dobu (den, měsíc, rok). Přesná data solárního potenciálu lze získat z meteorologických měření, nicméně jsou limitována pouze pro okolí kolem meteorologických stanic. Je prakticky nemožné pokrýt celý zemský povrch dostatečně hustou sítí meteorologických stanic. Alternativním způsobem je odhad solárního potenciálu pomocí modelů, jejichž výsledkem jsou tzv. mapy solárního potenciálu (Fu & Rich, 1999).

Pro odhad solárního potenciálu bylo v minulosti vytvořeno několik aplikací dostupných pro širokou veřejnost. Jednou z aplikací je například PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), která poskytuje odhad solárního potenciálu pro celou Evropu a Afriku. Dále se jedná např. o Meteonorm a jiné. Tyto aplikace jsou však navrženy především pro orientační zjištění solárního potenciálu. Pro určení dostatečně přesného solárního potenciálu je nutné znát zejména přesnou topografii zájmového území a další faktory ovlivňující intenzitu dopadajícího záření. Proto jsou

výše zmíněné aplikace nevhodné například pro vědecké využití. PVGIS naráží na problém nízkého rozlišení vstupního rastru, které je 1 km x 1 km. Meteorologická data se sbírá z mnoha meteorologických stanic po celém světě, avšak pro území, která nejsou v dosahu stanic, je použita interpolace dat, která nebere v úvahu již zmíněnou topografii (Institute of energy, 2012; Meteotest, 2012).

V současné době existuje mnoho map solárního potenciálu, ale většinou pouze pro velká světová města a jiná urbanizovaná území (Freitas, et al., 2015). Existují však modely umožňující efektivní získání odhadu solárního potenciálu pro jakékoli místo na Zemi, a to za předpokladu dostupnosti příslušných dat.

2.4.1 Solar radiation tools a nástroj Area Solar Radiation

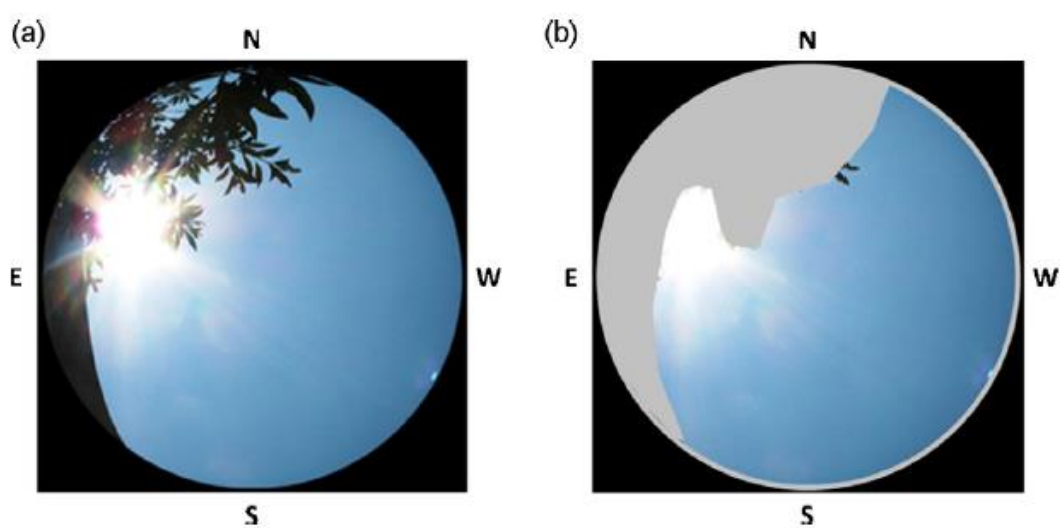
V posledních dvou dekadách byla vyvinuta nástrojová sada Solar radiation tools, jako nástavba pro Geografický informační systém (GIS) společnosti Environmental Systems Research Institute (ESRI), ArcGIS. Tato nástrojová sada pracuje s DEM a zohledňuje všechny již zmíněné charakteristiky prostředí ovlivňující množství dopadajícího solárního záření. Díky tomu lze vytvořit dostatečně přesné mapy solárního potenciálu (Kodysh, et al., 2013).

Nástroj Area solar radiation slouží k odhadu solárního potenciálu zájmového území. Je založen na výpočtu hemisférického algoritmu zastínění. Výpočet probíhá pro každou buňku vstupního rastru DEM a skládá se ze tří hlavních výpočtů, a to výpočtu mapy zastínění, výpočtu mapy pohybu slunce a výpočtu mapy oblohy. Z těchto tří výpočtů je následně dopočítán odhadovaný solární potenciál pro celý vstupní rastr DEM a vznikne výsledná mapa solárního potenciálu pro dané území.

2.4.2 Výpočet mapy zastínění

Tento výpočet určuje, které části nebe jsou pro danou buňku v DEM zastíněny a které nikoliv. Výpočet je založen na předpokladu, že buňky DEM s vyšší nadmořskou výškou budou stínit buňkám s nižší nadmořskou výškou. Algoritmus kontroluje každou buňku vstupního DEM ve stanoveném počtu směrů a kontroluje maximální úhel zakrytí nebe způsobený jinými buňkami DEM. Počet směrů, které jsou algoritmem kontrolovány, je možné ovlivnit. Obecně platí, čím je terén složitější, tím více směrů je potřeba zadat pro dosažení dostatečně přesných výsledků (ArcGIS Help, 2016). Zbylé směry jsou poté dopočítány pomocí interpolace. Pro přiblížení je možné

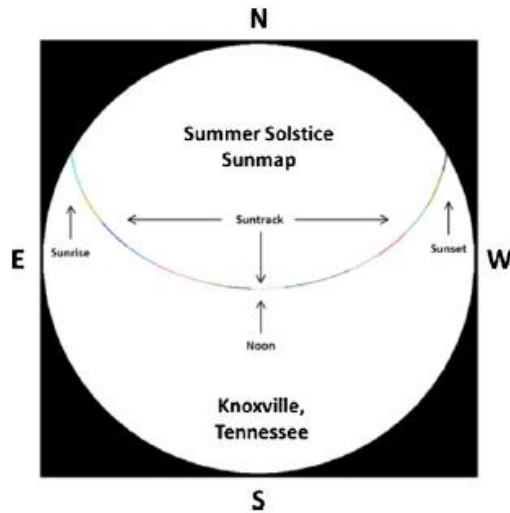
si výpočet mapy zastínění představit jako fotografii provedenou širokoúhlým fotoaparátem, směrem nahoru k obloze. Takováto fotografie je pro představu ilustrována na obr. 6a. Výsledná viditelná oblast je znázorněna na obr. 6b, kde šedá barva představuje zastíněnou oblohu. Výsledky jsou uloženy do dvourozměrného rastru bez souřadnicového systému reprezentujícího oblohu. Tento rastr je dále použit ve výpočtu slunečního záření. Umístění buňky do příslušného řádku a sloupce rastru odpovídá zenitovému úhlu θ a azimutovému úhlu α . Každé buňce rastru je přiřazena hodnota buď viditelného, nebo zastíněného směru (Fu & Rich, 1999; Kodysh, et al., 2013).



Obr. 6: a – Mapa zastínění, b – Výsledná viditelná oblast (Kodysh, et al., 2013)

2.4.3 Výpočet mapy slunce

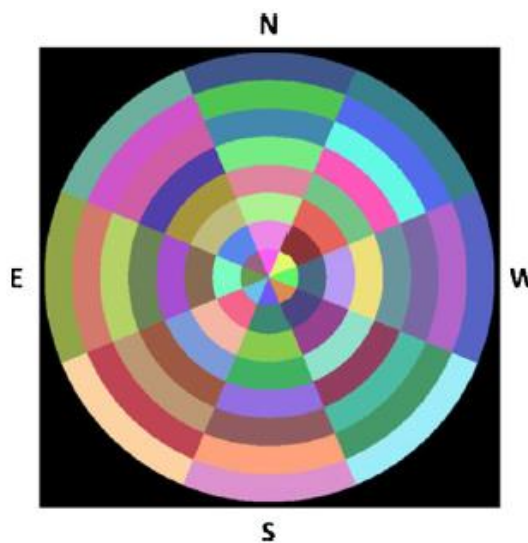
Druhým z výpočtů je tzv. mapa pohybu slunce. Zaznamenává se do dvourozměrného rastru stejného formátu, jako ve výpočtu mapy zastínění. Zabývá se pouze přímým zářením. Mapa zaznamenává zdánlivou polohu Slunce, jak se mění v průběhu času, pro danou buňku DEM. Výpočet polohy slunce je založený na znalosti zeměpisné šířky, dnu v roce a denní doby a využívá standardní astronomické vzorce. Vytvářejí se dvě mapy pohybu slunce, jedna zastupuje období mezi zimním a letním slunovratem (od 22. prosince do 22. června), druhá mezi letním a zimním slunovratem (od 22. června do 22. prosince). Příklad výpočtu mapy pohybu slunce je znázorněn na obr. 7. Každá jednotlivá část mapy slunce nese specifickou hodnotu radiace. (Fu & Rich, 1999; Kodysh, et al., 2013).



Obr. 7: Výpočet mapy slunce (Kodysh, et al., 2013)

2.4.4 Výpočet mapy oblohy

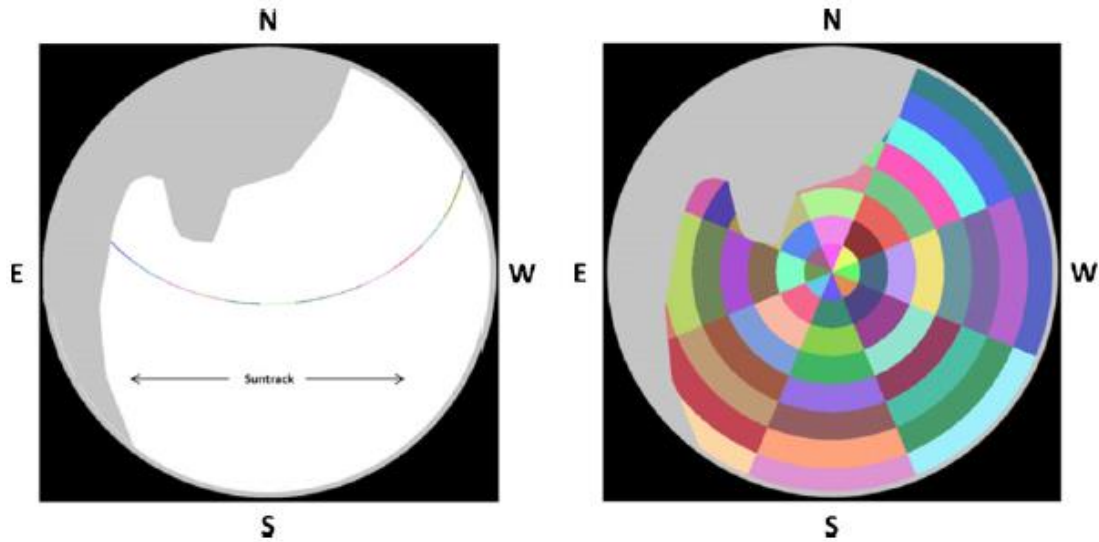
Třetí výpočet se zabývá tzv. mapou oblohy. Řeší rozptýlené sluneční záření, které na rozdíl od přímého pochází ze všech směrů. Výpočet rozděluje oblohu do řady sektorů definovaných zenitovým a azimutovým úhlem a snaží se odhadnout množství rozptýleného záření. Stejně jako u předchozích dvou výpočtů jsou výsledné hodnoty ukládány do dočasného dvourozměrného rastru. Na obr. 8 je uveden příklad výpočtu mapy oblohy. Každá buňka nese specifickou hodnotu radiace (Fu & Rich, 1999; Kodysh, et al., 2013).



Obr. 8: Výpočet mapy oblohy (Kodysh, et al., 2013)

2.4.5 Výpočet solárního potenciálu

Poté co jsou dokončeny výše popsané výpočty, je třeba dopočítat výsledné globální záření. Pomocí překrývání dříve vytvořených map (mapa pohybu slunce, mapa oblohy) s mapou zastínění je určeno množství dopadajícího přímého a rozptýleného záření pro každou buňku DEM. Záření přichází z buněk, které nejsou zakryty mapou zastínění, viz obr. 9.



Obr. 9: Výpočet přímého a rozptýleného slunečního záření (Kodysh, et al., 2013)

Výpočet globálního slunečního záření

Výpočet globálního záření Gr se skládá ze součtu přímého Dr a rozptýleného Df slunečního záření (7). Celkové přímé a celkové rozptýlené záření se vypočítá jako suma všech dílčích nezakrytých sektorů (8), (9).

$$Gr = Dr + Df \quad (7)$$

$$Dr = \sum Dr \theta \alpha \quad (8)$$

$$Df = \sum Df \theta \alpha \quad (9)$$

Výpočet přímého slunečního záření $DR\theta\alpha$

Pro každý nezakrytý sektor vymezený zenitovým úhlem θ a azimutovým úhlem α je zapotřebí vypočítat přímé záření zvlášť, a to podle vztahu

$$DR\theta\alpha = SConst \times \tau m(\theta) \times SD\theta, \alpha \times SG\theta, \alpha \times \cos(\beta\theta, \alpha) \quad (10)$$

kde je $SConst$ - sluneční konstanta, τ - průměrná hodnota propustnosti atmosféry, $m(\theta)$ – relativní délka optické dráhy, $SD\theta,\alpha$ – doba trvání osvitů na daný sektor, $SG\theta,\alpha$ – poměr viditelné a zakryté části sektoru, $\beta\theta,\alpha$ – úhel dopadu paprsku mezi těžištěm sektoru mapy slunečního pohybu a osy kolmé k povrchu (Fu & Rich, 1999; Kodysh, et al., 2013).

Výpočet rozptýleného slunečního záření $DF\theta\alpha$

Pro každý nezakrytý sektor vymezený zenitovým úhlem θ a azimutovým úhlem α je zapotřebí vypočítat rozptýlené záření zvlášť, a to podle vztahu

$$DF\theta\alpha = R_{celk} \times Prozpt \times T \times SG\theta,\alpha \text{ rozpt} \times P\theta,\alpha \times \cos(\beta\theta,\alpha) \quad (11)$$

kde je R_{celk} – globální normální záření, $Prozpt$ – rozptýlená část globálního záření, T – časový interval použitý pro analýzu, $SG\theta,\alpha \text{ rozpt}$ – podíl viditelné a zakryté části sektoru, $P\theta,\alpha$ – poměr příchozího rozptýleného záření pro jednotlivý sektor, ku hodnotě pro všechny sektory, $\beta\theta,\alpha$ – úhel dopadu paprsku mezi těžištěm sektoru mapy oblohy a osy kolmé k povrchu (Fu & Rich, 1999; Kodysh, et al., 2013).

2.5 Využití odhadu solárního potenciálu

Solární záření a jeho množství je důležitým faktorem pro několik oborů. Asi nejčastěji se s ním lze setkat v energetice, kde sehraje primární roli při navrhování fotovoltaických systémů. Je ale i významným činitelem v ekologii a mnoha dalších oborech.

2.5.1 Využití z hlediska energetiky

Znalost solárního potenciálu je základním určujícím faktorem, při hledání vhodné lokality pro fotovoltaické systémy. Díky němu lze zjistit, zda se investice do solárního systému vyplatí či nikoli. Dostupnost přesných map solárního potenciálu je proto primárním předpokladem pro nárůst využívání fotovoltaických systémů (Santos, et al., 2014).

Velké solární elektrárny dnešního typu jsou rozporuplné. Většina je postavena na orné půdě, a zabírají tak důležitý prostor pro pěstování plodin (Calvert & Mabee, 2015). Navíc jsou projektovány na místech s vysokým solárním potenciálem, což je logické, ale paradoxně tak lidstvo přichází o nejlepší zemědělskou půdu.

Budoucností fotovoltaiky je umístování systémů na již nevyužitelné plochy (např. brownfields) (Klusáček, et al., 2014), kde nezabírají plochy, které lze využívat v zemědělství nebo jiných oblastech. Jako ideální se jeví střechy budov. Střechy v zastavěných oblastech zaujímají velkou rozlohu a ve většině případů nejsou využívány. Navíc jsou vysoko nad terénem, a snižují tak riziko zastínění okolní vegetací či poškození solárních systémů. Dostupnost informací o solárním potenciálu pro majitele nemovitostí je základním předpokladem, pro šíření fotovoltaických systémů tímto způsobem (Santos, et al., 2014).

Střešním solárním potenciálem se zabývá několik studií, jednou z nich je studie (Hofierka & Kuňak, 2009), která řeší solární potenciál ve městě na východním Slovensku. Dospěli k závěru, že by solární energie pokryla 2/3 celkové spotřeby města. Dalšími studiemi řešícími tuto problematiku jsou např. (Santos, et al., 2014), řešící střešní solární potenciál v centru Lisabonu nebo (Jochem, et al., 2009) zabývající se střešním potenciálem v rakouském městě Feldkirch.

2.5.2 Využití z hlediska ekologie

V ekologii jsou často hledány faktory, které ovlivňují distribuci a rozšíření druhů. Jedním z takových faktorů je solární potenciál, který je významný především při studiích rostlin, ale i zvířat (Illán, et al., 2010). Využití takovýchto poznatků může být například v posouzení dopadů změn klimatu na ekosystémy, druhy atd. Takovéto studie vyžadují prostorově přesná data o zájmové lokalitě.

Solární radiace je díky fotosyntetické aktivitě důležitým faktorem v šíření, složení a produktivitě ekosystémů (Gates, 1980). Závisí na ní několik parametrů ovlivňujících vodní bilanci, jako je zahřívání ovzduší a půdy, evapotranspirace, vítr, tání sněhu a ledu. (Pidellu & Gégout, 2008). Je prokázáno, že solární radiace má výrazný vliv na rozložení povrchových vod (Pierce, et al., 2005). Proto je důležitá její znalost, při mnoha ekologických studiích, zejména těch rostlinných.

Množství dopadající solární radiace je v modelech druhové distribuce využíváno od nepaměti (Franklin, 1998), často vyjádřeno zástupnými proměnnými jako je svazitost a orientace ke světovým stranám (Franklin, 1998) nebo přímo modelováno s využitím zmíněných algoritmů (Fu & Rich, 1999; Kodysh, et al., 2013). V minulosti bylo v souvislosti se solární radiací a šířením rostlinných druhů vypracováno několik studií. Například (Meentemeyer, et al., 2001), se zabýval prostorovými interakcemi

mezi dvanácti druhy dřevin v kalifornském pohoří Santa Ynez a uzavírá, že vzájemné prostorové rozšíření dřevin nejvíce ovlivňují parametry roční půdní vlhkost a sluneční záření, což zdůrazňuje důležitost znalosti solární radiace. Další studie, zabývající se rozšířením dubu kalifornského (*Quercus agrifolia*) v oblasti Lompac v Kalifornii, zmiňuje solární radiaci, jako druhý nejdůležitější faktor, hned po vlastnostech půdy (Davis & Goetz, 1990). Dalšími studiemi, zmiňujícími znalost solární radiace jako důležitého ekologického faktoru jsou například (Dirnbock, et al., 2003; Franklin, 1998; Zimmermann & Kienast, 1999).

2.6 Měřítko v GIS

Zemský povrch je nekonečně složitý a teoreticky by mohl být modelován až do molekulární úrovně. V praxi je schopnost vnímat, zachytit a uchovat takovéto množství dat nereálné, a je proto zapotřebí snížit detail. Je tedy potřeba se zaměřovat na nejdůležitější rysy studovaného prostorově distribuovaného jevu. Data mohou být rastrová, nebo vektorová. V této práci jsou použita rastrová data, protože jsou pro spojitě jevy prokazatelně prostorově explicitnější než data vektorová (Goodchild, 2011).

Tato práce se zabývá prostorovým měřítkem rastrových dat. Rastr se skládá z jednotlivých pixelů. Každý pixel uchovává pouze jednu hodnotu určitého jevu. Velikost jednoho pixelu rastru udává tzv. rozlišení. Obecně platí, čím menší je velikost jednoho pixelu, tím větší je rozlišení a DEM se více podobá skutečnosti (Goodchild, 2011). Zároveň je ale třeba vzít v úvahu dobu výpočtu. Platí, čím vyšší je rozlišení, tím déle výpočet trvá. Proto je vhodné hledat určitý kompromis mezi dostatečnou přesností a dobou výpočtu. Důležitým parametrem ovlivňujícím konečnou hodnotu solárního potenciálu je měřítko vstupního rastru DEM. Při odhadu solárního potenciálu je zapotřebí si uvědomit, pro jaké účely se potenciál zjišťuje (ekologie, střešní solární potenciál aj.), a přizpůsobit tomu rozlišení. Před získáním prostorových dat v určitém rozlišení je nejdříve nutné se zamyslet nad prostorovými měřítky daného území, aby nebyly výsledky analýzy zavádějící. Zejména u složité konfigurace terénu, kde je velká variabilita v nadmořské výšce, sklonitosti a orientaci, je zapotřebí zvolit rozlišení dostatečně jemné tak, aby nedocházelo ke ztrátě informace a s ní spojené nepravdivé hodnoty solárního potenciálu. Pro přesný odhad solárního potenciálu je

důležité znát podrobně terén daného území a další parametry (viz. kapitola: Faktory redukující sluneční záření).

Velmi přesné rozlišení je zapotřebí například u určování střešního solárního potenciálu. Je nutné brát v úvahu i malé objekty jako například komíny, vikýře atd., které by mohly stínit instalovaným fotovoltaickým systémům. Měřítkem při určování střešního solárního potenciálu se zabývali (Zink, et al., 2015). Ve studii použili několik různých hodnot rozlišení vstupního rastru DEM, konkrétně od 1 cm do 1 m. Jako efektivní hodnotu z hlediska přesnosti výsledku a doby výpočtu stanovil rozlišení 25 cm.

Goodchild (2011) zmiňuje důležitost volby správného měřítka při určování svažitosti z DEM. Algoritmus počítá svažitost v dané buňce z okolních osmi sousedních buněk. Uvádí, že při malém rozlišení rastru vycházela svažitost systematicky menší. Výpočtem svažitosti a orientace se zabýval (Grohmann, 2015), jehož výsledky potvrzují Goodchildovy závěry. Výpočet sklonitosti a orientace povrchu je součástí výpočtu Area solar radiation. Důležitost volby správného měřítka potvrzuje studie (Pascador, et al., 2006). Odhaduje solární potenciál v parku Sierra Nevada ve Španělsku, který se vyznačuje složitou topografií. K odhadu používá rastr o rozlišení 20 m a výsledné hodnoty porovnává s reálnými, naměřenými čtrnácti meteorologickými stanicemi nacházejícími se na studovaném území. Výsledky ukazují, že stanice v těsné blízkosti mohou ve složitém terénu naměřit zcela odlišné hodnoty, proto je třeba terén vystihnout co nejvěrněji. Z porovnání odhadovaných dat se skutečnými jsou patrné odchylky způsobené nedostatečně přesným měřítkem. Kvůli němu byla určena špatná sklonitost a orientace terénu, a tím pádem i špatný odhad solárního potenciálu.

3 Materiály a metodika

3.1 Zájmové území

Pro tuto studii je důležité, aby topografie zájmové lokality byla co nejsložitější, proto byla vybrána horská oblast Krkonošského národního parku (KRNAP). KRNAP je nejvyšším hercynským pohořím, rozkládá se těsně nad padesátou rovnoběžkou severní šířky. Klima je zde vlhké a chladné, může za to poloha pohoří, které tvoří přirozený val, do kterého naráží studené větrné proudění od Atlantiku. Pro počasí je typická velká proměnlivost v krátkých časových intervalech a výrazné střídání ročních období (<http://www.krnep.cz/>).

Zájmová lokalita pokrývá téměř celý KRNAP. Jedná se o oblast na severovýchodě Česka, rozkládající se na území okresů Trutnov, Semily a z malé části i Jablonec nad Nisou. Přibližná rozloha zájmové oblasti je cca 961 km². Představuje lokalitu s velmi členitým, horským terénem, ohraničenou řekami Jizerou (ze západu) a Úpou (z východu).

3.2 Použitá data

Pro práci byly vybrány tři volně dostupné datové sady, které se liší svým rozlišením. První dvě pocházejí z projektu SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), které jsou díky svému globálnímu pokrytí a snadné dostupnosti často využívány v ekologii (např. v modelech druhové distribuce) (Summers, et al., 2012; Attorre, et al., 2007). Konkrétně se jedná o digitální modely povrchu SRTMGL3 s rozlišením 90 m a SRTMGL1 s rozlišením 30 m. Posledním modelem je DMR5G s rozlišením 2 m, který je volně dostupný přes mapové služby ČÚZK. Pro zhodnocení dat byla stažena souřadnicová síť, tzv. atlas GRID. Atlas GRID poskytl KRNAP (<http://www.krnep.cz/>) – jedná se o standardní kvadráty pro mapování rostlin a živočichů (např. Atlas ptáků) v KRNAPu.

3.2.1 SRTM

SRTM je mezinárodní projekt, jehož cílem je získání geoprostorových dat. SRTM data byla vytvořena ústavem NASA (National Aeronautic and Space Administration) roku 2000, při jedenácti denní vesmírné misi STS-99. Na raketoplán Endeavour byl tehdy umístěn speciální radarový systém, který nasbíral přibližně 8

terabajtů povrchových dat. Z nasbíraných dat byl vytvořen DEM přibližně 80 % světové pevniny (od 56° severní šířky do 60° jižní šířky). Původně byla data s nejvyšším rozlišením (30 m) poskytnuta pouze pro území USA a s nižším rozlišením (90 m) pro zbytek světa. Dne 23. září 2014 na klimatické konferenci OSN americká vláda oznámila, že zpřístupní data s nejvyšším rozlišením (tedy 30m) pro celý svět, nikoliv jen Severní Ameriku. Tato data jsou od roku 2015 poskytnuta bezplatně na stránkách USGS (US Geologic Survey; <http://www.usgs.gov/>), odkud byla stažena i pro tuto práci. K dispozici jsou dvě datové sady s rozlišením 90 m (SRTM-3) a 30 m (SRTM-1), v souřadnicovém systému WGS-84. Horizontální chyba těchto dat je 20 m a vertikální 16m (<http://www.cgiar-csi.org/>).

3.2.2 Digitální model reliéfu páté generace

Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR5G), vznikl v letech 2009 – 2013. Data pocházejí z leteckého skenování výškopisu České republiky a poskytuje je ČUZK. Data jsou pro veřejnost zpoplatněna, pro studijní účely jsou v omezené formě dostupná na vyžádání. DMR představuje zobrazení zemského povrchu v digitální podobě. Body jsou reprezentovány ve formě výšek diskrétních bodů v nepravidelné trojúhelníkové síti (TIN) o souřadnicích X, Y, H, kde H představuje nadmořskou výšku ve výškovém souřadnicovém systému Balt po vyrovnání (Bpv) a nabývá chyby 0,18m v odkrytém terénu a 0,3m v zalesněném terénu. Data jsou v souřadnicovém systému S-JTSK (Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální). DMR5G byl vytvořen pro analýzy potřebující velmi přesné údaje o zájmové lokalitě, jakými jsou například plánování a projektování vodohospodářských, dopravních a pozemních staveb, projektování pozemkových úprav, či modelování různých přírodních jevů.

Tato datová sada je poskytována přes image službu ArcGIS Serveru (URL adresa serveru: <http://ags.cuzk.cz/arcgis/services>) ve formátu rastrových dat a velmi přesném rozlišení 2 m.

3.3 Postup v ArcGIS

Všechny popisované prostorové operace byly provedeny v software ArcGIS (ESRI), vyhodnocení dat bylo provedeno v Microsoft Excel.

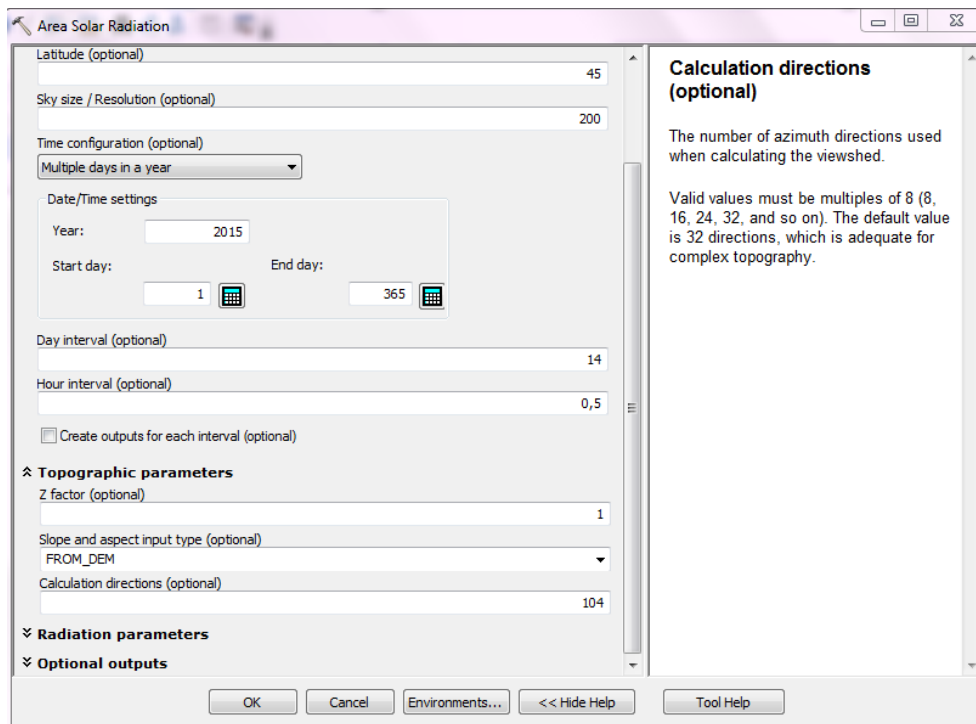
Na počátku analýzy v ArcGIS, bylo nejprve zapotřebí připojit se k ArcGIS serveru, pro získání dat. Připojení probíhalo prostřednictvím aplikace ArcCatalog, kde v záložce *GIS Servers* je funkce *Add ArcGIS server*. Po zadání URL adresy (<http://ags.cuzk.cz/arcgis/services>) byl připojen ArcGIS server *arcgis on ags.cuzk.cz*. Server obsahuje kromě používané DMR5G také DMP1G, DMR4G a jiná volně dostupná data.

Pro výpočet solárního potenciálu byly použity tři vstupní rastry DEM SRTM3, SRTM1 a DMR5G. Nejprve bylo zapotřebí, aby všechny rastry měly stejný souřadnicový systém. Byl zvolen S-JTSK ve kterém je primárně poskytován rastr DMR5G. Transformace rastru SRTM3 a SRTM1 ze souřadnicového systému WGS-84 na S-JTSK, proběhla pomocí funkce *Project* (zpřesňující transformační rovnice: *S_JTSK_To_WGS_1984_1*).

Pro zamezení ztráty okrajových informací byl nejdříve pomocí funkce *Buffer* vytvořen kilometrový přesah kolem GRIDu a následně byly touto vrstvou oříznuty vstupní rastry DEM (nástroj *Extract by Mask*). Oříznuté vrstvy byly použity jako vstup do výpočtu solárního potenciálu. Solární potenciál byl vypočítán funkcí *Area Solar Radiation*, která je obsažena v nástrojové sadě *Spatial analyst tools*. Nástroj zhotoví rastr odhadu solárního potenciálu pro území vstupního DEM. Odhadovaný solární potenciál je udáván v jednotkách watthodina na metr čtvereční (Wh/m^2).

3.3.1 Volba počátečních podmínek výpočtu Area Solar Radiation

Area solar radiation je flexibilní nástroj pro odhad solárního potenciálu. Zohledňuje i parametr jako je aktuální stav oblohy. Je zapotřebí parametry pečlivě volit. V následujících odstavcích jsou popsány jednotlivé parametry a hodnoty použité při výpočtu solárního potenciálu. Tabulku nastavení funkce ukazuje obr. 10.



Obr. 10: Tabulka nástroje Area solar radiation (ArcGIS Help, 2016)

- *Latitude* – zde se zadává zeměpisná šířka zájmové lokality ve stupních. Kladné hodnoty jsou pro severní polokouli, záporné pro jižní. Je možné zadat pouze jednu hodnotu, proto při výpočtu lokalit zasahujících do více šířkových pásem je nutné lokalitu rozdělit a počítat radiaci zvlášť. U vstupních rastrů obsahujících prostorové zařazení je hodnota automaticky vypočtena. V opačném případě musí být zadána, případně ponechána defaultní hodnota 45°. V této práci byla hodnota automaticky dopočítána programem a odpovídala hodnotě 50,71 (ArcGIS Help, 2016).
- *Sky size / resolution* – je důležitý parametr, který ovlivňuje přesnost a dobu výpočtu. Vyjadřuje rozlišení dvourozměrné mřížky při výpočtu mapy zastínění, mapy oblohy a mapy pohybu slunce. Defaultní hodnota je 200 buněk, což znamená, že bude vytvořen rastr o 200 x 200 buňkách. Rozsah hodnot, které je možno zadat, je 200 – 10 000, přičemž čím vyšší je rozlišení, tím vyšší je přesnost výpočtu, ale s rostoucím rozlišením se výrazně prodlužuje doba výpočtu. Pro tuto práci byla ponechána defaultní hodnota (ArcGIS Help, 2016).
- *Time configuration* – určuje, pro jaký časový úsek bude proveden výpočet. Při nastavení parametru je na výběr ze čtyř možností: Special days, Within a days,

Multiple days in a year and Whole year with monthly. Special days vypočítá sluneční záření pro den za letního slunovratu/ rovnodennosti / zimního slunovratu. Within a days provede výpočet pro stanovené časové období v průběhu jednoho dne. Multiple days in a year provádí výpočet pro konkrétní několikadenní období do maximální délky jednoho roku. Whole year with monthly provede výpočet pro celý rok s využitím měsíčních intervalů pro výpočty. V této práci je použito nastavení pro několik dní v roce, jako úvodní den byl nastaven den 1 a konečný den 365 roku 2015. Díky tomu byl spočítán solární potenciál pro celý rok 2015 (ArcGIS Help, 2016).

- *Day interval* – udává se ve dnech a určuje, na kolik sektorů bude rozdělena mapa pohybu slunce pro jeden rok. Defaultní hodnota je 14 dní, což znamená, že jednou za 14dní bude aktualizován zdánlivý pohyb slunce pro daný výpočet. Pro tuto práci byla ponechána defaultní hodnota (ArcGIS Help, 2016).
- *Hour interval* - udává se v hodinách a určuje, na kolik sektorů bude rozdělena mapa pohybu slunce pro jeden den. Defaultní hodnota je 0,5h, což znamená, že jednou za 0,5h bude aktualizován zdánlivý pohyb slunce pro daný výpočet. Pro tuto práci byla ponechána defaultní hodnota (ArcGIS Help, 2016).
- *Z factor* – slouží k převodu různých jednotek na stejné. V případě že hodnoty X, Y, mají jinou jednotku než hodnoty Z, jsou za pomoci Z-faktoru převedeny na stejné. V případě, že jsou hodnoty ve stejných jednotkách, zadaný Z-faktor bude 1. V rámci této práce byla ponechána defaultní hodnota, tedy 1 (ArcGIS Help, 2016).
- *Slope and aspect imput type* – udává, jakým způsobem bude pro analýzu odvozena svažitost a orientace povrchu. Na výběr jsou dvě možnosti: FROM_DEM a FLAT_SURFACE. V této práci bylo použito defaultní nastavení FROM_DEM, které zajistí dopočítání svažitosti a orientace, ze vstupního rastru DEM (ArcGIS Help, 2016).
- *Calculating direction* – udává, pro kolik směrů bude kontrolován maximální úhel zastínění ve výpočtu mapy zastínění. Hodnota musí být vždy násobkem osmi (8,16,24,32...). Hodnoty 8 a 16 jsou typické pro území s málo složitou topografií. Defaultní hodnota je 32 a je vhodná pro složitou konfiguraci terénu. Při volbě parametru je důležité vzít v úvahu rozlišení vstupního rastru DEM, při nízkém rozlišení vstupního rastru (např. 30 m) jsou dostačující nízké

hodnoty (8, 16) a naopak. U výpočtů v této práci byla pro zachování přesnosti použita hodnota 104, zejména kvůli rastru DMR5G (ArcGIS Help, 2016).

- *Zenith division* – udává, na kolik sektorů bude rozdělen výpočet mapy oblohy. Hodnota musí být větší než nula a menší než polovina zadané hodnoty Sky size. V této práci byla zadána hodnota 8, což je defaultní hodnota (ArcGIS Help, 2016).
- *Azimuth division* - udává, na kolik sektorů bude rozdělen výpočet mapy oblohy. Hodnota musí být násobkem osmi, větší než nula a menší než 160. Byla zadána hodnota 8, což je defaultní hodnota (ArcGIS Help, 2016).
- *Diffuse model type* – určuje, jaký typ difuzního modelu záření bude použit. Na výběr jsou dvě možnosti STANDARD_OVERCAST_SKY a UNIFORM_SKY. STANDARD_OVERCAST_SKY zajistí, že přichodí difuzní záření se mění se zenitovým úhlem, kdežto UNIFORM_SKY ponechá difuzní záření ze všech směrů oblohy stejné. V rámci této práce bylo použito UNIFORM_SKY, což je i defaultně nastaveno (ArcGIS Help, 2016).
- *Diffuse proportion* – udává podíl difuzního záření v celkovém globálním záření. Hodnota by měla být nastavena podle atmosférických podmínek. Rozsah hodnot se pohybuje od 0 do 1, kde 0 se volí pro jasnou oblohu a 1 pro zataženou oblohu. Byla ponechána defaultní hodnota, která činí 0,3 a představuje obecně jasné podmínky (ArcGIS Help, 2016).
- *Transmittivity* – udává, jak velká část přímého slunečního záření projde skrz atmosféru. Rozsah hodnot se pohybuje od 0 do 1, kde 0 zastupuje nulový průchod záření a 1 průchod všeho záření. Byla ponechána defaultní hodnota, která činí 0,5 a odpovídá obecně jasné obloze (ArcGIS Help, 2016).
- *Output direct radiation raster* – vytvoří rastr představující přímé sluneční záření. Hodnota atributu je v jednotkách Wh/m² (ArcGIS Help, 2016).
- *Output diffuse radiation raster* – vytvoří rastr představující difuzní sluneční záření. Hodnota atributu je v jednotkách Wh/m² (ArcGIS Help, 2016).

3.4 Metodika vyhodnocování výsledků

Pro zhodnocení vlivu vstupního měřítka na výpočet odhadu solárního potenciálu bylo zapotřebí, aby údaje solárního potenciálu, které v sobě nese každý pixel, byly přepočítány na čtvercovou síť, která je obvykle používána pro tvorbu atlasů. Pro tento

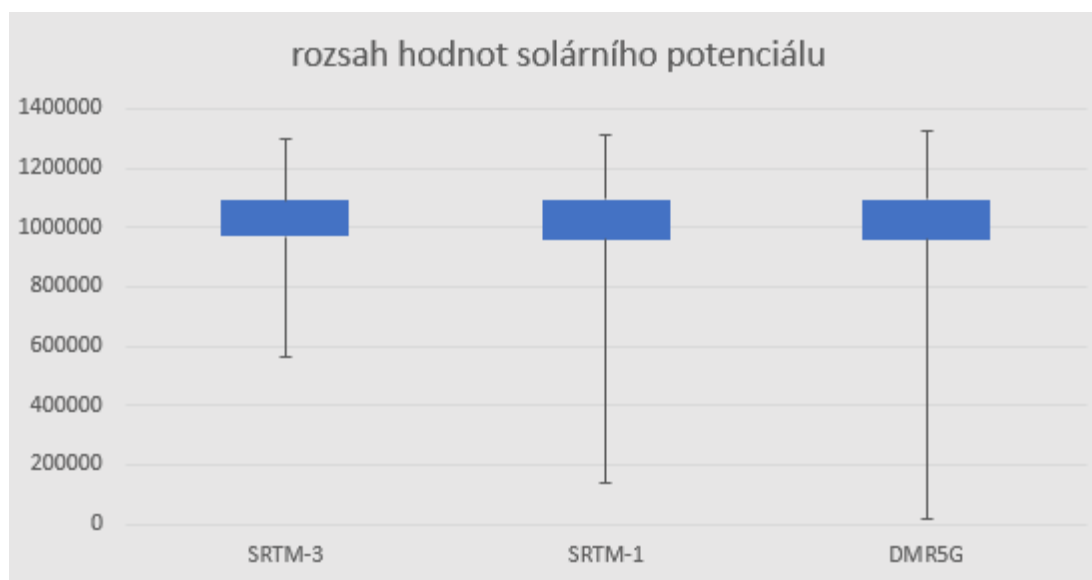
účelu byla zvolena čtvercová síť Atlas GRID, jež byla například použita při tvorbě atlasu ptáků Krkonoš. Pomocí funkce *Zonal Statistics as Table* byly vypočítány statistické údaje (minimum, maximum, rozsah, průměr) solárního potenciálu, pro jednotlivé čtverce mřížky Atlas GRID. Tyto údaje byly následně zkopírovány do aplikace Microsoft Excel, kde byly vytvořeny korelační grafy, F-testy a T-testy pro zhodnocení výsledků.

Pro porovnání rozpětí dat solárního potenciálu pro celé zájmové území, mezi všemi datovými sadami byly zhotoveny tzv. boxploty. Pro získání potřebných dat a pro tvorbu boxplotů, bylo zapotřebí převést rastry odhadu solárního potenciálu na bodové vrstvy (*Raster to point*). Odstranění nežádoucích bodů, které byly vytvořeny z důvodu zamezení ztráty okrajových informací, bylo provedeno nástrojem *Clip* dle vrstvy Atlas GRID.

4 Výsledky

Na základě výše popsaných výpočtů byly zhotoveny mapy solárního potenciálu pro území KRNAPu. Příklad mapy vyhotovené z dat SRTM1 (30 m) je v příloze 1. Dále byly vytvořeny mapové výstupy znázorňující rozdílné minimální, maximální a průměrné hodnoty výsledného solárního potenciálu mezi jednotlivými datovými sadami (příloha 2, 3, 4).

Pro porovnání rozsahu hodnot výsledného solárního potenciálu mezi jednotlivými datovými sadami byl zhotoven graf s boxploty, který je znázorněn na obr. 11. Z obrázku vyplývá, že se snižováním rozlišení vstupního DEM se snižuje rozsah hodnot odhadovaného solárního potenciálu. U datové sady s nejnižším rozlišením (SRTM-3) dochází k vyhlazení extrémních hodnot, především nízkých.

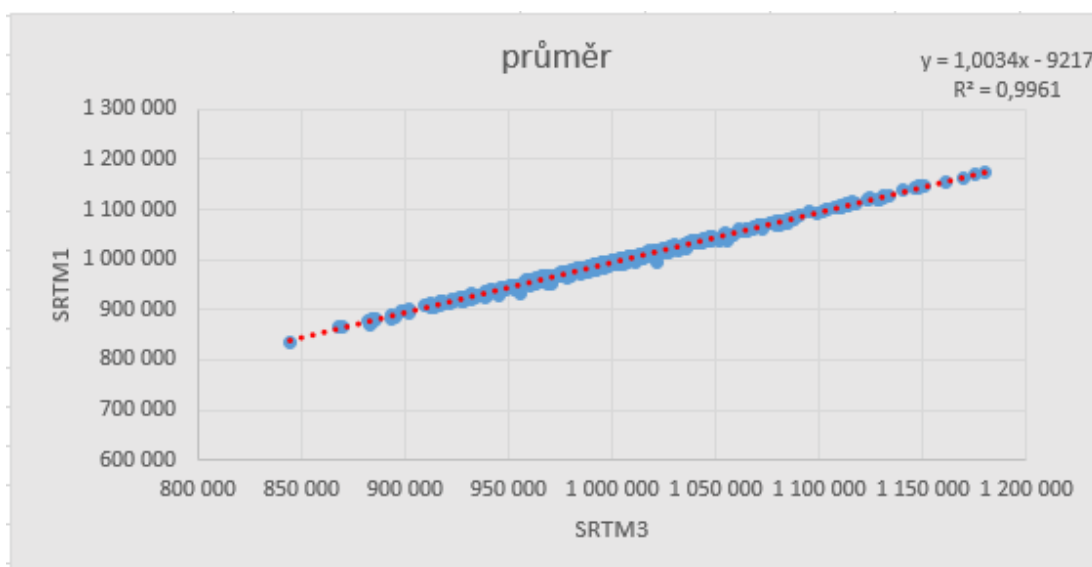


Obr. 11: Graf rozsahu hodnot

Vyhodnocený T-test je zobrazen v tabulce 1. Vyplývá z něj, že nelze zamítnout hypotézu H_0 , tedy že průměrné hodnoty solárního potenciálu, mezi datovými sadami SRTM-3 a SRTM-1 se na hladině významnosti $\alpha=0,05$ výrazně neliší. Graf závislosti průměrných hodnot solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-3 a SRTM-1 je na obr. 12. Korelační koeficient vychází $r = 0,998$, což znamená, že data jsou silně korelovaná.

Tabulka 1: Dvouvýběrový T-test průměrných hodnot solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-3 a SRTM-1 o rovnosti rozptylů

Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů		
	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$ $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$	
	Soubor 1	Soubor 2
Stř. hodnota	1005461,595	999701,4763
Rozptyl	3310930220	3346882668
Pozorování	471	471
Společný rozptyl	3328906444	
Hyp. rozdíl stř. hodnot	0	
Rozdíl	940	
t Stat	1,532061	
P(T<=t) (1)	0,062921923	
t krit (1)	1,646476266	
P(T<=t) (2)	0,125843846	
t krit (2)	1,962490875	
- t krit	t Stat	t krit
-1,962490875	< 1,53206100049391 <	1,962490875
nezamítáme H_0	výsledek:	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$



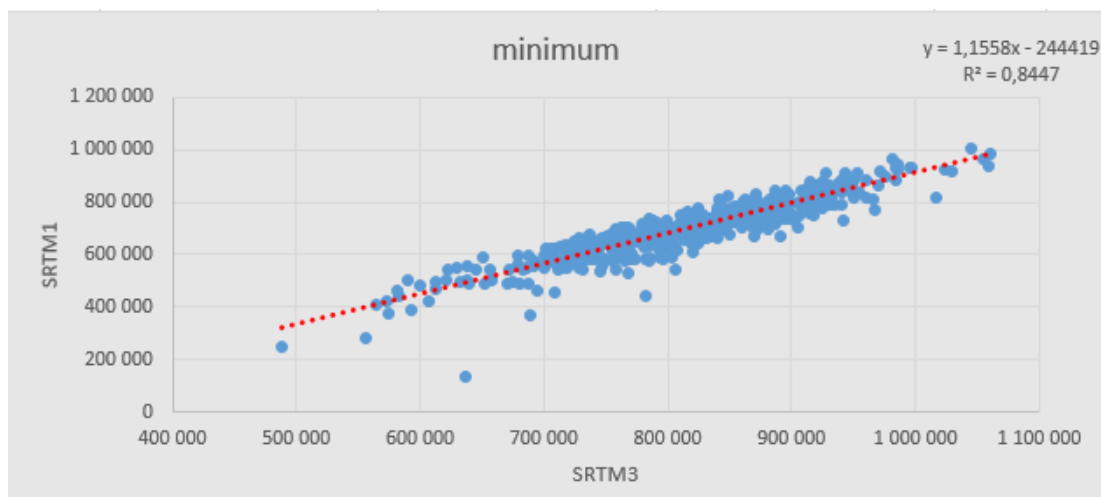
Obr. 12: Korelační graf průměrných hodnot solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-3 a SRTM-1

Minimální hodnoty solárního potenciálu byly vyhodnoceny obdobně jako průměrné. Vyhodnocený T-test je zobrazen v tabulce 2. Vyplývá z něj, že zamítáme hypotézu H_0 , nelze tedy tvrdit, že minimální hodnoty solárního potenciálu, mezi datovými sadami SRTM-3 a SRTM-1 se neliší na hladině významnosti $\alpha = 0,05$. Graf

závislosti minimálních hodnot solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-3 a SRTM-1 je na obr. 13. Korelační koeficient vychází $r = 0,919$, což znamená, že data jsou silně korelovaná.

Tabulka 2: Dvouvýběrový T-test minimálních hodnot solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-3 a SRTM-1 o nerovnosti rozptylů

Dvouvýběrový t-test s nerovností rozptylů:		
	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$	
	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$	
	Soubor 1	Soubor 2
Stř. hodnota	815209,6096	697804,7376
Rozptyl	8509178984	13457871034
Pozorování	471	471
Hyp. rozdíl stř. hodnot	0	
Rozdíl	895	
t Stat	17,19137855	
P(T<=t) (1)	9,34946E-58	
t krit (1)	1,646557937	
P(T<=t) (2)	1,86989E-57	
t krit (2)	1,962618094	
	-t krit	t krit
	-1,962618094	1,962618094
	t Stat < 17,1913785479642 <	
	zamítáme H_0	výsledek: $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$



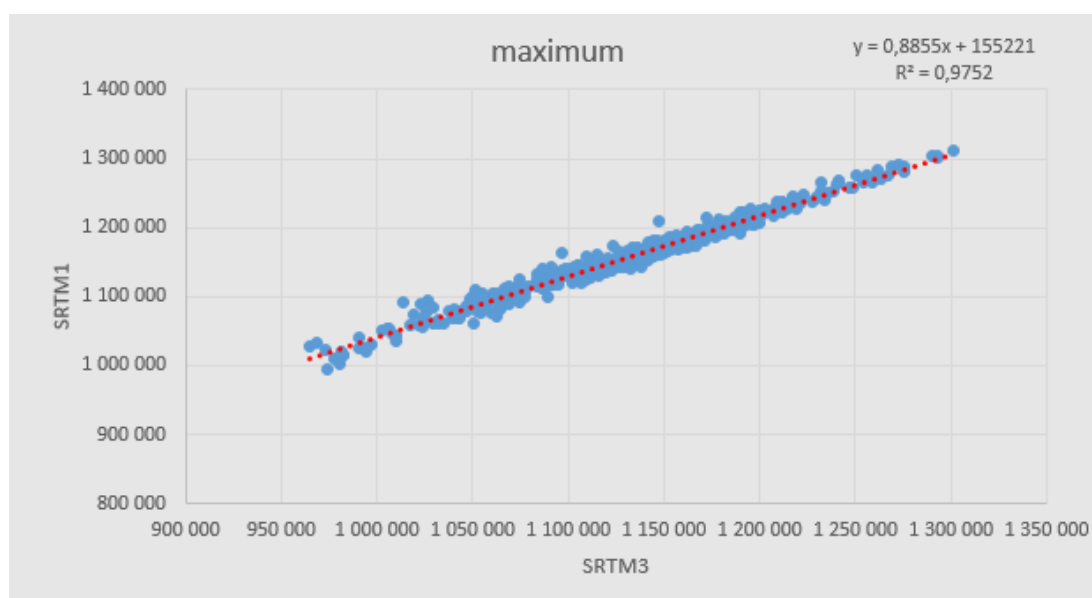
Obr. 13: Korelační graf minimálních hodnot solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-3 a SRTM-1

T-test maximálních hodnot solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-3 a SRTM-1 je zobrazen v tabulce 3. Vyplývá z něj, že zamítáme hypotézu H_0 , nelze tedy tvrdit, že maximální hodnoty solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-

3 a SRTM-1 se neliší na hladině významnosti $\alpha = 0,05$. Graf závislosti maximálních hodnot solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-3 a SRTM-1 je na obr. 14. Korelační koeficient vychází $r = 0,988$, což znamená, že data jsou silně korelovaná.

Tabulka 3: Dvouvýběrový T-test maximálních hodnot solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-3 a SRTM-1 o nerovnosti rozptylů

Dvouvýběrový t-test s nerovností rozptylů:		
	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$	
	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$	
	Soubor 1	Soubor 2
Stř. hodnota	1131758,243	1157377,113
Rozptyl	4147368591	3334603924
Pozorování	471	471
Hyp. rozdíl stř. hodnot	0	
Rozdíl	929	
t Stat	-6,427800096	
P(T<=t) (1)	1,03336E-10	
t krit (1)	1,646495499	
P(T<=t) (2)	2,06672E-10	
t krit (2)	1,962520833	
- t krit	t Stat	t krit
-1,962490875	< -6,42780009583153 <	1,962490875
zamítáme H_0	výsledek:	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

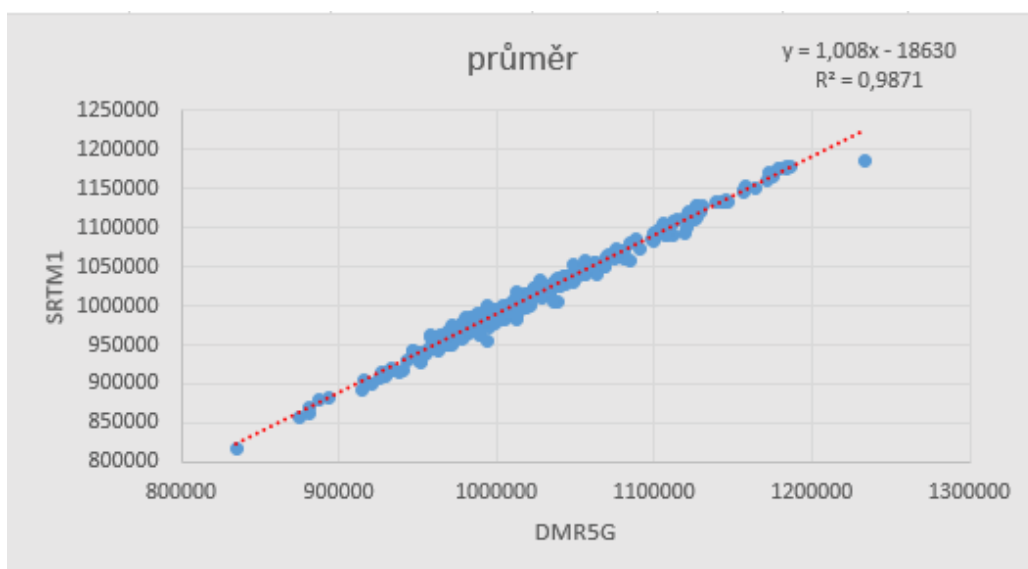


Obr. 14: Korelační graf maximálních hodnot solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-3 a SRTM-1

T-test průměrných hodnot solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-1 a DMR5G je zobrazen v tabulce 4. Vyplývá z něj, že zamítáme hypotézu H_0 , nelze tedy tvrdit, že průměrné hodnoty solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-1 a DMR5G se neliší na hladině významnosti $\alpha = 0,05$. Graf závislosti průměrných hodnot solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-1 a DMR5G je na obr. 15. Korelační koeficient vychází $r = 0,994$, což znamená, že data jsou silně korelovaná.

Tabulka 4: Dvouvýběrový T-test průměrných hodnot solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-1 a DMR5G o nerovnosti rozptylů

Dvouvýběrový t-test s nerovností rozptylů		
	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$	
	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$	
	Soubor 1	Soubor 2
Stř. hodnota	1021875,143	1011442,328
Rozptyl	3716045615	3825361708
Pozorování	350	350
Hyp. rozdíl stř. hodnot	0	
Rozdíl	698	
t Stat	2,247549701	
P(T<=t) (1)	0,012458205	
t krit (1)	1,647039595	
P(T<=t) (2)	0,02491641	
t krit (2)	1,963368455	
- t krit		t Stat
-1,963368455		< 2,24754970122267 <
		t krit
		1,963368455
zamítáme H_0	výsledek:	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

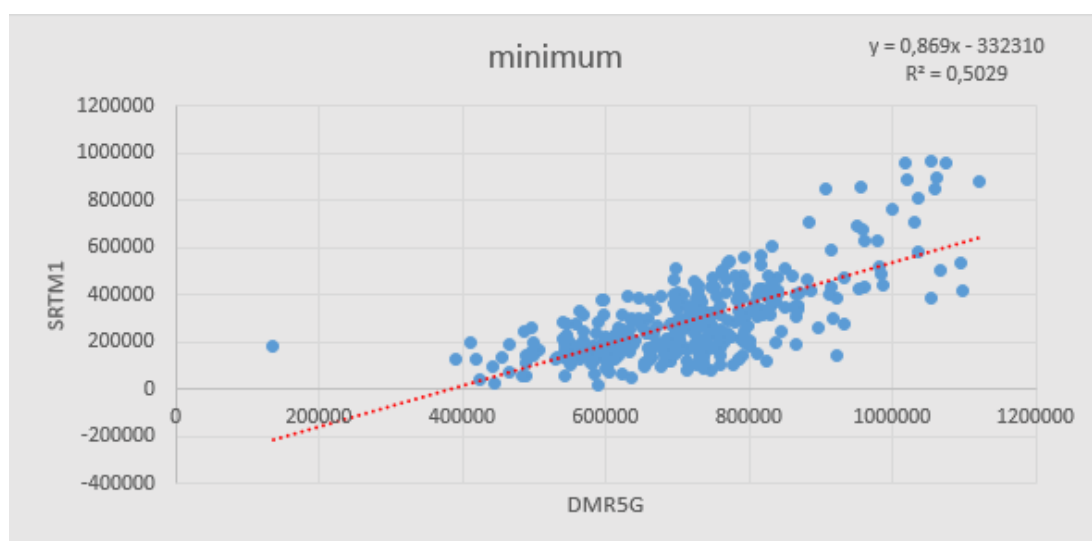


Obr. 15: Korelační graf průměrných hodnot solárního potenciálu mezi datovými sadami DMR5G a SRTM-1

T-test minimálních hodnot solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-1 a DMR5G je zobrazen v tabulce 5. Vyplývá z něj, že zamítáme hypotézu H_0 , nelze tedy tvrdit, že minimální hodnoty solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-1 a DMR5G se neliší na hladině významnosti $\alpha = 0,05$. Graf závislosti minimálních hodnot solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-1 a DMR5G je na obr. 16. Korelační koeficient vychází $r = 0,709$, což znamená, že data mají lineární závislost.

Tabulka 5: Dvouvýběrový T-test minimálních hodnot solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-1 a DMR5G o nerovnosti rozptylů

Dvouvýběrový t-test s nerovností rozptylů		$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$
		$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$
	Soubor 1	Soubor 2
Stř. hodnota	1021875,143	1011442,328
Rozptyl	3716045615	3825361708
Pozorování	350	350
Hyp. rozdíl stř. hodnot	0	
Rozdíl	698	
t Stat	2,247549701	
P(T<=t) (1)	0,012458205	
t krit (1)	1,647039595	
P(T<=t) (2)	0,02491641	
t krit (2)	1,963368455	
- t krit	t Stat	t krit
-1,963368455	< 2,24754970122267 <	1,963368455
zamítáme H_0	výsledek:	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

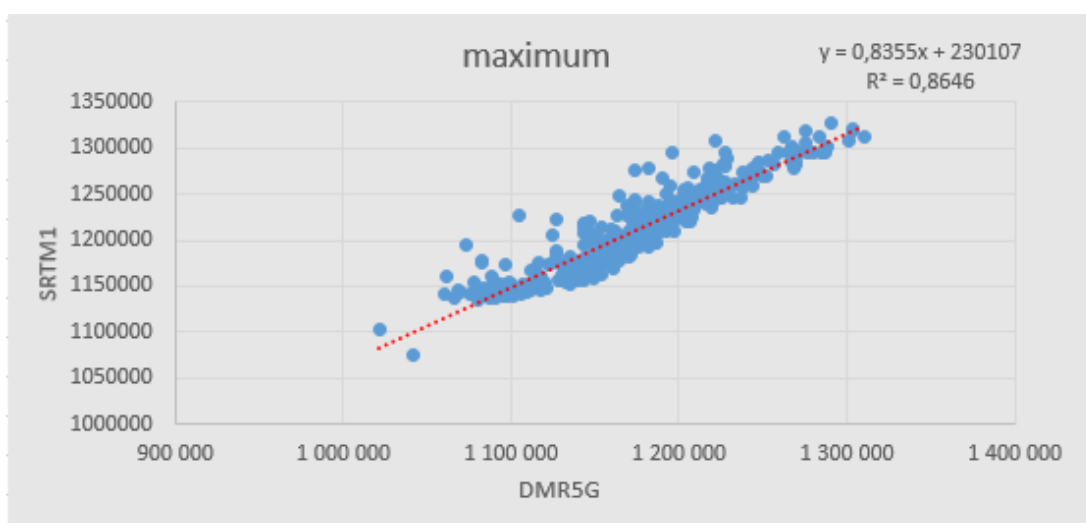


Obr. 16: Korelační graf minimálních hodnot solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-1 a DMR5G

T-test maximálních hodnot solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-1 a DMR5G je zobrazen v tabulce 6. Vyplývá z něj, že zamítáme hypotézu H_0 , nelze tedy tvrdit, že maximální hodnoty solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-1 a DMR5G se neliší na hladině významnosti $\alpha = 0,05$. Graf závislosti maximálních hodnot solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-1 a DMR5G je na obr. 17. Korelační koeficient vychází $r = 0,929$, což znamená, že data jsou silně korelovaná.

Tabulka 6: Dvouvýběrový T-test maximálních hodnot solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-1 a DMR5G o nerovnosti rozptylů

Dvouvýběrový t-test s nerovností rozptylů		$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$
		$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$
	Soubor 1	Soubor 2
Stř. hodnota	1171286,178	1208718,269
Rozptyl	2839197952	2292436969
Pozorování	350	350
Hyp. rozdíl stř. hodnot	0	
Rozdíl	690	
t Stat	-9,775753202	
P(T<=t) (1)	1,58265E-21	
t krit (1)	1,647064974	
P(T<=t) (2)	3,16531E-21	
t krit (2)	1,963407995	
- t krit	t Stat	t krit
-1,963407995	< -9,77575320156177 <	1,963407995
zamítáme H_0	výsledek:	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$



Obr. 17: Korelační graf maximálních hodnot solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-1 a DMR5G

Byly zaznamenávány také délky jednotlivých výpočtů, hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 7: Doba výpočtu solárního potenciálu

Rastr	Rozlišení	doba výpočtu
SRTM3	90m	< 0,5 h
SRTM1	30m	< 1 h
DMR5G	2m	> 1 měsíc

5 Diskuze

Rozlišení DEM používaných v modelování druhové distribuce se pohybuje od 20m (Pascador, et al., 2006), 50m (Falk & Mellert, 2011), až po 90m (Attorre, et al., 2007). Mnoho studií používá pro modelování druhové distribuce data SRTM, např. (Summers, et al., 2012) používající SRTM-3 pro určení dopadu změn klimatu na 584 druhů rostlin v Austrálii, nebo (Attorre, et al., 2007) používající stejnou datovou sadu pro určení druhové distribuce jemenského stromu *Dracaena cannabari* (dračice). Z naměřených výsledků vyplývá, že průměrné hodnoty solárního potenciálu mezi datovými sadami SRTM-3 a SRTM-1 se od sebe významně neliší. Mohli bychom tedy říct, že pro studie zabývající se modelováním druhové distribuce pouze běžných rostlinných či živočišných druhů, které nemají výrazné specifické nároky na své prostředí, by mohlo být rozlišení 90 m pro odhad solárního potenciálu dostačující. Jinak tomu však může být u studií, které se zaměřují na rostlinné či živočišné druhy, mající velmi specifické nároky a vyhledávající místa s extrémními hodnotami solární radiace. Takováto místa mohou být například tzv. *microrefugia* (Franklin, 1995), tedy místa, která byla v historii nějakým způsobem izolována od okolního prostředí a přežívají v něm rostlinné či živočišné druhy, které mají užší ekologickou valenci a v minulosti byly hojně rozšířeny, a nyní jejich přežití závisí na zachování jejich přirozeného prostředí. V takovém případě může být vhodnější použít odhadnutá minima nebo maxima solárního potenciálu, nicméně současné studie používají většinou průměrné hodnoty (Pidellu & Gégout, 2008; Falk & Mellert, 2011). Z naměřených výsledků vyplývá, že minimální a maximální hodnoty mezi SRTM-3, SRTM-1 a DMR5G se od sebe mohou lišit, a proto je pro identifikaci těchto prostředí důležité použít vstupní DEM s vyšším rozlišením, kde nedochází ke ztrátě extrémních hodnot, které mohou být pro takovéto druhy důležité. Z naměřených výsledků lze soudit, že u nedostatečně vysokého rozlišení dochází k významné ztrátě nízkých hodnot radiace. Pro efektivní odhad solárního potenciálu v ArcGIS je zapotřebí volit měřítko odpovídající danému účelu, nicméně není-li nezbytně nutné použít velmi podrobné rozlišení, je vhodné hledat určitý kompromis mezi přesností a dobou výpočtu, protože doba výpočtu může dosahovat velmi vysokých hodnot (týdny, měsíce). V mém případě byla doba výpočtu, mezi datovými sadami SRTM-3, SRTM-

1 a DMR5G, propastná. Zatímco výpočet prvních dvou datových sady s nižším rozlišením trval do jedné hodiny, výpočet DMR5G trval na stejném počítači 35dní.

Je nezbytné uvést, že vypočtený solární potenciál v této práci neodpovídá plně reálným hodnotám, což je zapříčiněno ponecháním defaultních hodnot při nastavování výpočtu v ArcGIS. Nicméně výpočet co nejpřesnějšího solárního potenciálu nebyl cílem mé práce, která se zaměřovala pouze na vstupní DEM. Další možností jak zkoumat výpočet solárního potenciálu v ArcGIS je soustředit se na hodnoty jednotlivých parametrů výpočtu. To však nebylo v rozsahu mé práce, je možné se tím zabývat do budoucna a následně získané poznatky propojit s touto prací, pro zhotovení co nejkompaktnějšího návodu na výpočet solárního potenciálu v ArcGIS.

6 Závěr

Všechny cíle práce byly splněny. Výsledky mé práce ukazují, že volba správného rozlišení vstupního DEM pro daný účel je prvním předpokladem pro dostatečně přesný odhad solárního potenciálu. U studií zkoumajících microrefugia je zapotřebí volit podrobnější rozlišení, vzhledem ke ztrátě nízkých hodnot solárního potenciálu, při zvolení nedostatečně velkého. Výsledky naznačují, že při modelování druhové distribuce je vhodné použít kromě průměrných hodnot také minimální nebo maximální, tato aplikace může vést k lepšímu pochopení druhové distribuce.

7 Zdroje

ArcGIS Help, 2016. *ArcGIS Resources*. [Online]

Available at: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/>

[Přístup získán 6 1 1016].

Attorre, F., Francesconi, F. & Taleb, N., 2007. Will dragonblood survive the next period of climate change? Current and future potential distribution of *Dracaena cinnabari* (Socotra, Yemen). *Biological Conservation*, 138(3), p. 430–439.

Bambulová, I., 2013. Analýza využitelnosti solární energie. *České vysoké učení v Praze*.

Calvert, K. & Mabee, W., 2015. More solar farms or more bioenergy crops? Mapping and assessing. *Applied Geography*, Issue 56, pp. 209-221.

Davis, F. W. & Goetz, S., 1990. Modeling vegetation pattern using. *Landscape Ecology*, Svazek 4, pp. 69-80.

Dirnbock, T. a další, 2003. Mapping alpine vegetation based on image. *Applied Vegetation Science*, Svazek 6, pp. 85-96.

Falk, W. & Mellert, K., 2011. Species distribution models as a tool for forest management planning under climate change: risk evaluation of *Abies alba* in Bavaria. *Journal of Vegetation Science*, 22(4), pp. 621 - 634.

Franklin, J., 1995. Predictive vegetation mapping geographic in modeling of biospecial patterns in relation to enviromenal gradients. *Progress in Physical Geography*, Svazek 19, pp. 474-499.

Franklin, J., 1998. Predicting the distribution of shrub species in. *Journal of Vegetation Science*, 5(9), pp. 733-748.

Freitas, S., Catita, C., Redweik, P. & Brito, M. C., 2015. Modelling solarpotentialintheurbanenvironment:. *RenewableandSustainableEnergyReviews*, Svazek 41, pp. 915-931.

Fu, P. & Rich, P., 1999. Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. *Proceedings of the Nineteenth Annual ESRI User Conference*.

- Gates, D. M., 1980. Biophysical Ecology. *Journal of Vegetation Science*, 16(2), pp. 257-260.
- Geoimage Pti Ltd., 2012. *Geoimage*. [Online]
Available at: <http://www.geoimage.com.au/DEMS/dems-overview>
[Přístup získán 5 1 2016].
- Goodchild, M. F., 2011. Scale in GIS: An overview. *Geomorphology*, Svazek 130, pp. 5-9.
- Grohmann, C. H., 2015. Effects of spatial resolution on slope and aspect derivation for regionalscale. *Computers & Geosciences*, Svazek 77, pp. 111-117.
- Hofierka, J. & Kuňak, J., 2009. Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar. *Renewable Energy*, Issue 34, pp. 2206-2214.
- Horn, B., 1981. Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE*, 69(1), pp. 14-47.
- Illán, J. G., Gutiérrez, D. & Wilson, R. J., 2010. The contributions of topoclimate and. *Global Ecology and Biogeography*, Svazek 19, pp. 159-173.
- Institute of energy, E., 2012. *Joint reserch centre*. [Online]
Available at: <http://re.jrc.ec.europa.eu/>
[Přístup získán 15 11 2015].
- Janalik, R., 2012. Zdroje energie. *Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava*, pp. 9-10.
- Jochem, A., Hofle, B., Hollas, M. & Rutzner, M., 2009. OBJECT DETECTION IN AIRBORNE LIDAR DATA FOR IMPROVED SOLAR. *Laser scanning*, Issue 3, pp. 1- 6.
- Jones, K. H., 1998. A COMPARISON OF ALGORITHMS USED TO COMPUTE. *Computers & Geosciences*, IV(24), pp. 315-323.
- Klusáček, P. a další, 2014. FROM WASTED LAND TO MEGAWATTS:. *ACTA UNIVERSITATIS AGRICULTURAE ET SILVICULTURAE MENDELIANAE BRUNENSIS*, 62(3), pp. 517-527.

Kodysh, J. B., Omitaomu, O. A., Bhauduri, B. L. & Neish, B. S., 2013. Methodology for estimating solar potential on multiple building rooftops for. *Sustainable Cities and Society*, pp. 31-41.

Libra, M. & Poulek, V., 2005. *Solární energie: fotovoltaika - perspektivní trend současnosti i blízké budoucnosti*. Praha: ČZU.

Masný, P., Drápal, J. & all, e., 2011. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze.

Meentemeyer, R., Moody, A. & Franklin, J., 2001. Landscape-scale patterns of shrub-species abundance in California chaparral: the role of topographically mediated resource gradients. *Plant Ecology*, Svazek 156, pp. 19-41.

Meteotest, 2012. *Meteonorm*. [Online]

Available at: <http://www.meteonorm.com/>

[Přístup získán 12 11 2015].

Murtinger, K. & Truxa, J., 2006. *Solární energie pro váš dům*. Brno: ERA.

Pascador, J. T. a další, 2006. On the use of the digital elevation model to estimate the solar radiation in areas of complex topography. *Meteorol*, Svazek 13, pp. 279-287.

Pidellu, C. & Gégout, J.-c., 2008. Efficient assessment of topographic solar radiation to. *ScienceDirect*, Svazek 148, pp. 1696-1706.

Pierce, K. B., Lookingbill, T. & Urban, D., 2005. A simple method for estimating potential relative radiation for landscape-scale vegetation analysis. *Landscape Ecology*, 20(2), pp. 137-147.

Randin, C. & Vittoz, P., 2009. Land use improves spatial predictions of mountain plant abundance but not presence-absence. *Journal of Vegetation Science*, Svazek 20, pp. 996 - 1008.

Santos, T. a další, 2014. Applications of solar mapping in the urban environment. *Applied Geography*, 51(I), pp. 48-57.

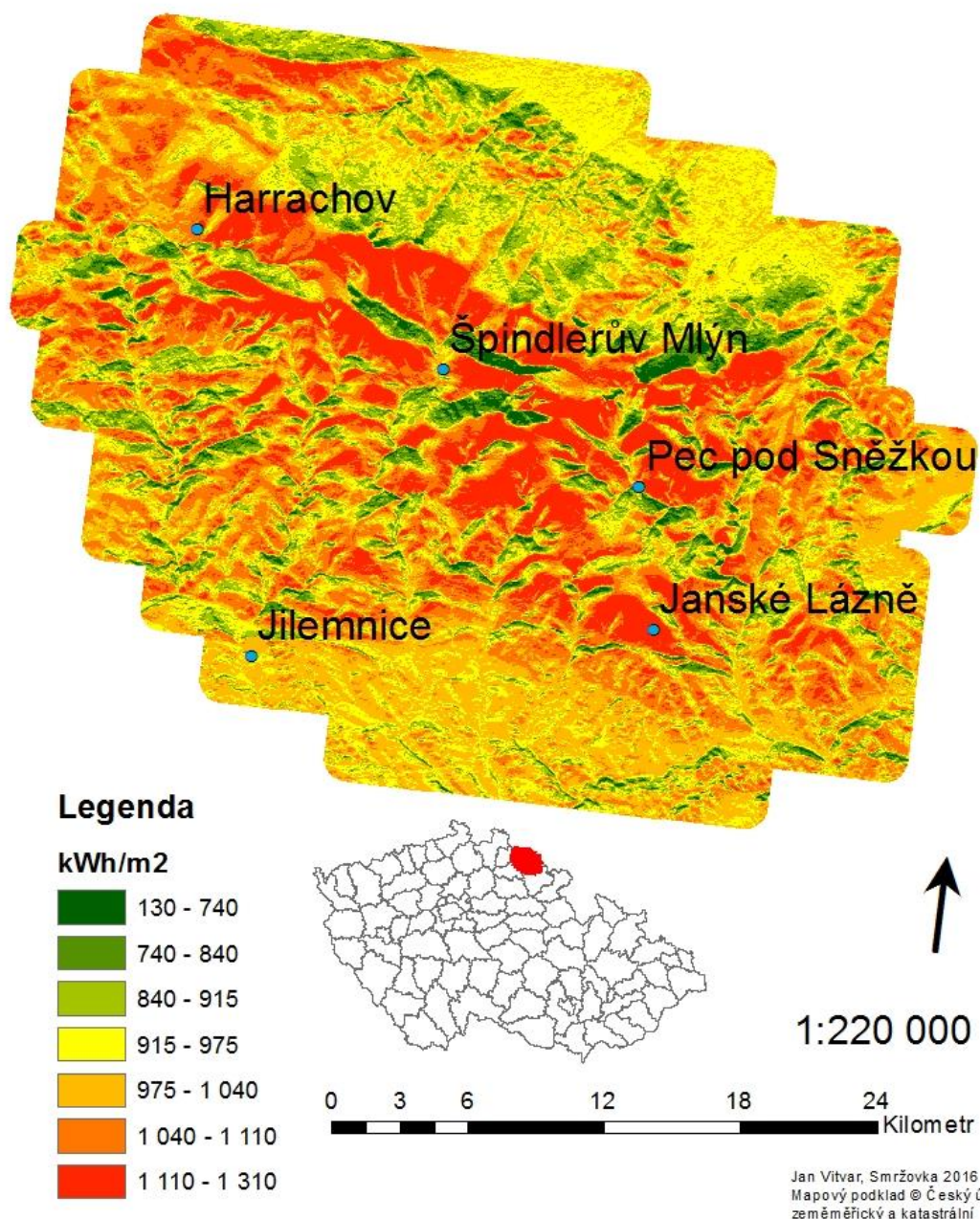
Summers, D., Bryan, B., Crossman, N. & Meyer, W., 2012. Species vulnerability to climate change: impacts on spatial conservation priorities and species representation. *Global change biology*, 18(7), p. 2335–2348.

Tappeiner, U., Tasser, E. & Tappeiner, G., 1998. Modelling vegetation patterns using natural and anthropogenic influence factors: preliminary experience with a GIS based model applied to an Alpine area. *Ecological Modelling*, 113(1-3), pp. 225-237.

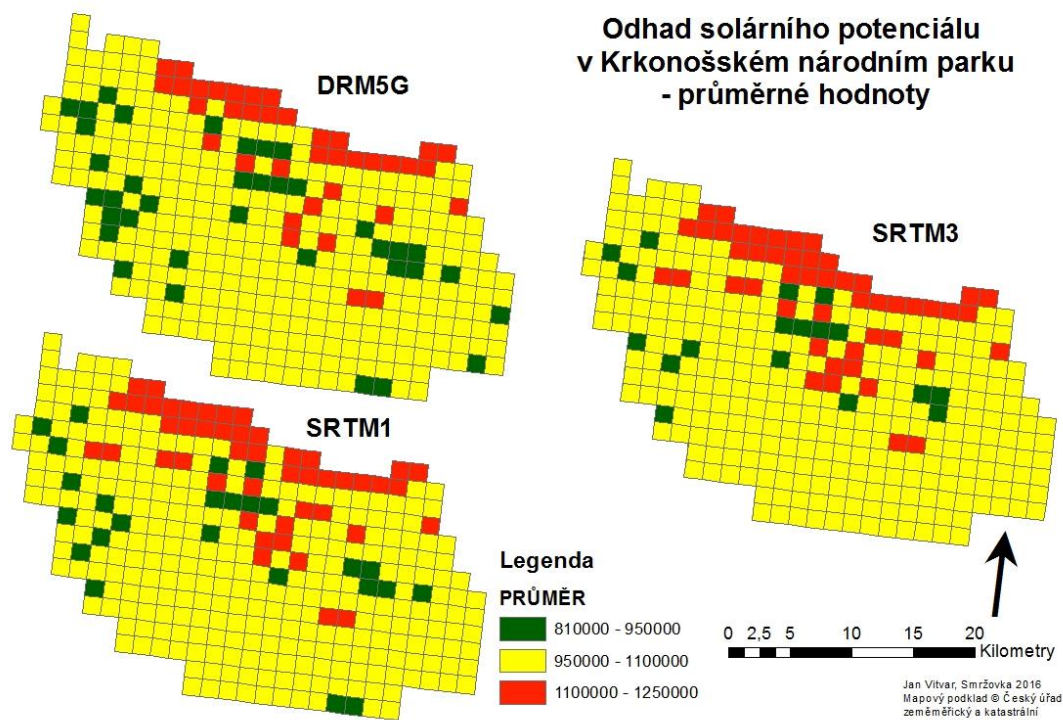
Zimmermann, N. E. & Kienast, F., 1999. Predictive mapping of alpine grasslands in Switzerland: species versus community approach. *Journal of Vegetation Science*, 10(4), pp. 469-482.

Zink, R., Camargo, L. R., Reidelsturz, P. & Dorgen, W., 2015. Photogrammetric Point Clouds for GIS-Based High-Resolution Estimation of Solar Radiation for Roof-Top Solar Systems. *Surface Models for Geosciences*, pp. 293-305.

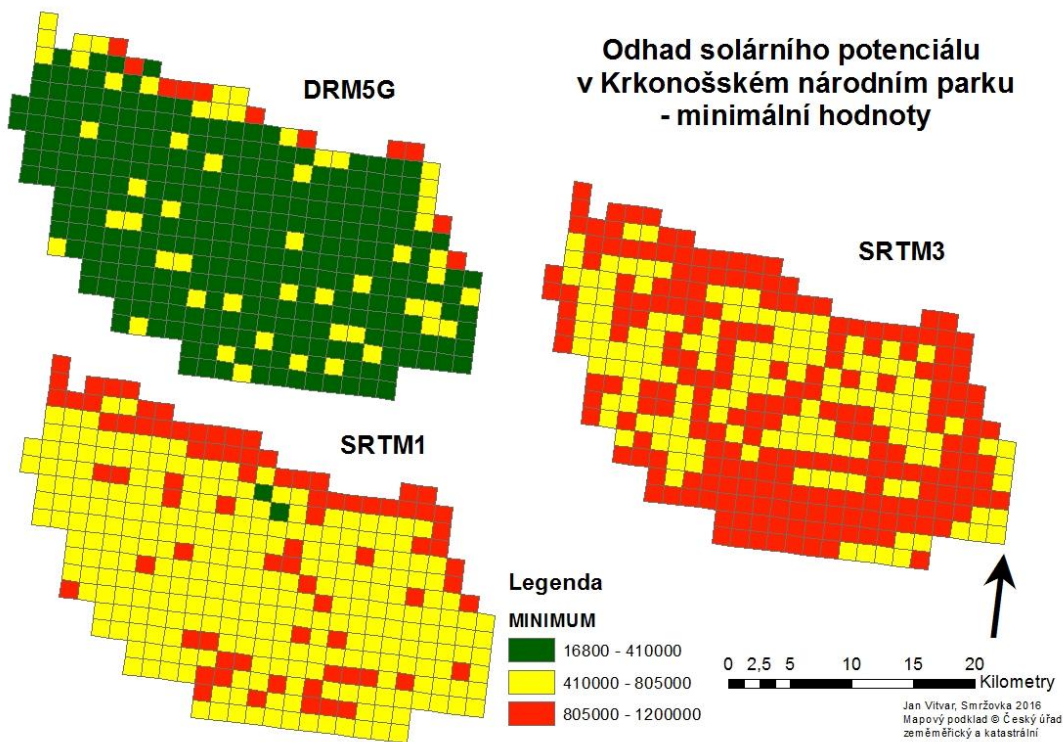
ODHAD SOLÁRNÍHO POTENCIÁLU V KRKONOŠLÉM NÁRODNÍM PARKU



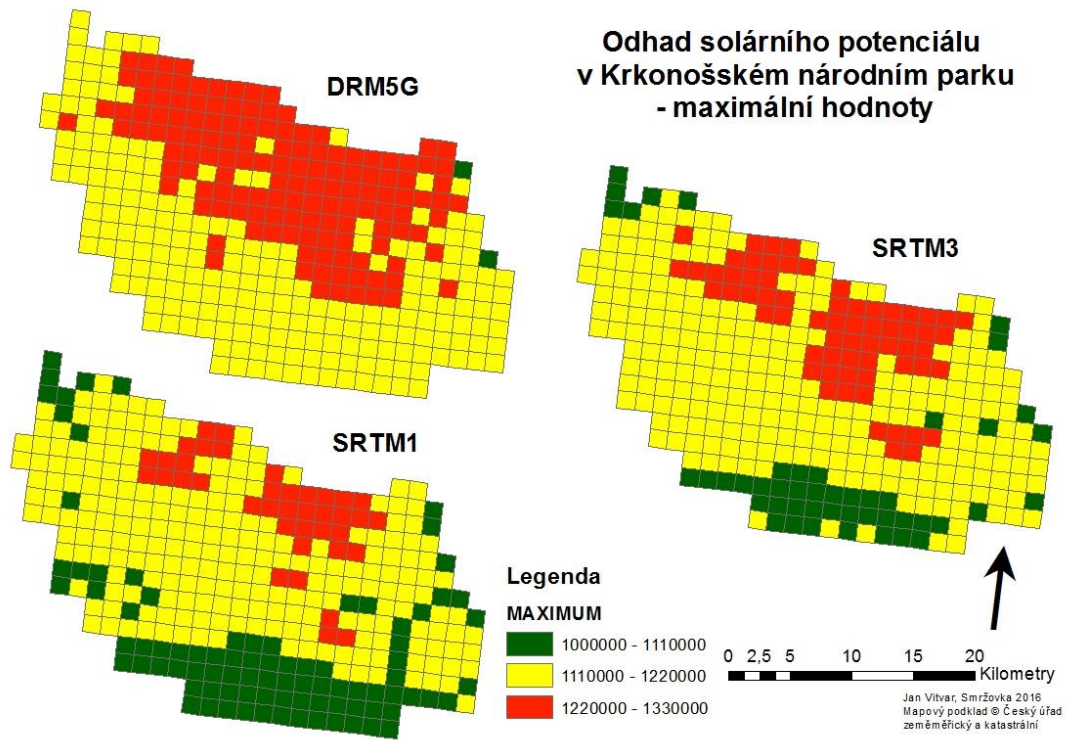
Příloha 1: Mapa solárního potenciálu vytvořená z datové sady SRTM-1



Příloha 2: Mapa solárního potenciálu pro porovnání průměrných hodnot



Příloha 3: Mapa solárního potenciálu pro porovnání minimálních hodnot



Příloha 4: Mapa solárního potenciálu pro porovnání maximálních hodnot