

# Slnčné žiarenie – základný zdroj informácií pre solárnu energetiku

Beták, J., Šúriová, N., Šúri, M., Cebecauer, T.: Solar Resource – Key Information for Solar Energy Industry. *Životné prostredie*, 2015, 49, 1, p. 15 – 21.

*Solar resource is fuel to solar power plants and local geography and climate determine their performance. Availability of reliable solar and meteorological data is the key information for effective development and operation of solar power plants. The objective of solar resource potential mapping is to develop a knowledge base and make it available in the form of online data services, data ready-for-applications, GIS data, maps and expert studies for investors, consultants, project developers, operators or strategic decision makers in governmental bodies and transmission companies.*

*Two approaches of measuring solar radiation are discussed in this paper: measurements by meteorological ground instruments and solar radiation models based on satellite and atmospheric data. Both approached have their pros and cons. Combination of both of them brings benefits and significantly decreases the uncertainty of data.*

*In the previous decade the progress of solar resource utilisation was the domain of some European countries, Japan, and USA. Presently, fast development of commercial solar power sector requires data services in global coverage. Not only rich economies are responsive in changing global energy patterns.*

*In this study, we introduce SolarGIS database and the approaches of how data can be used in the solar resource assessments. SolarGIS database, developed and operated by GeoModel Solar, is a unique source of data for solar energy applications. It contains historical and recent solar radiation, meteorological and geographic data covering almost entire World.*

*We also present our applied methodology on solar resource country mapping and show results from various regions. We cover methodology of acquisition, validation and uncertainty of provided data, assessments on solar resource potential and photovoltaic power potential of the region and recommendations on solar resource applications.*

*Key words: solar resource potential mapping, solar energy, SolarGIS*

Slnčné žiarenie je palivo pre solárne elektrárne. Na povrch kontinentov dopadá asi 1 500-krát viac slnečnej energie, ako v súčasnosti spotrebuje celé ľudstvo (Perez, Perez, 2009) vo všetkých formách energie. Otázkou je, aký podiel sme schopní z tohto energetického balíčka obnoviteľného zdroja využiť. Jedným z predpokladov efektívneho využitia je poznanie a manažment solárneho žiarenia.

V tomto príspevku prezentujeme moderné metódy mapovania solárneho energetického potenciálu. V poslednom desaťročí sa táto oblasť dynamicky rozvíja. V použitých prístupoch dochádza k výraznej kvalitatívnej a technologickej transformácii. Zvýšené požiadavky na kvalitu a dostupnosť dát prichádzajú predovšetkým z priemyselného sektora solárnej energetiky, ktorej podiel neustále rastie. Pri výstavbe a prevádzke solárnych elektrární je dostupnosť spoľahlivých údajov o slnečnom žiarení, ako aj ďalších meteorologických a geografických dát kľúčovým faktorom.

## Meranie slnečného žiarenia

Klasickým prístupom získania informácií o slnečnom žiarení sú dáta z *pozemných meraní*. V stredo-

rópskych krajinách boli v tradičnej meteorológii často používané *heliografy*, jednoduché prístroje na meranie slnečného svitu. Takéto údaje sú už dnes pre solárnu energetiku z hľadiska presnosti nepostačujúce. Vhodnejšími prístrojmi sú *rádiometrické prístroje* s automatickým zápisom dát, fungujúce na rôznych princípoch. Pre solárnu energetiku je dôležité meranie dvoch parametrov:

- Globálne horizontálne žiarenie (*Global Horizontal Irradiation – GHI*) je celkový sumár energie krátkovlnného slnečného žiarenia (cca 300 – 4000 nm) dopadajúceho na horizontálnu plochu povrchu Zeme. GHI je zložené z komponentov priameho, rozptýleného a v malej miere aj odrazeného žiarenia. Je základným parametrom pre dizajn fotovoltických inštalácií.
- Priame normálové žiarenie (*Direct Normal Irradiation – DNI*) je sumár energie priameho krátkovlnného slnečného žiarenia z oblasti slnečného disku a jeho najbližšieho okolia (cirkumsolárna plocha s polomerom 5° od stredu slnečného disku) na plochu, ktorá je vždy kolmá voči dopadajúcim slnečným lúčom. Známym príkladom je kvet slnečnice, ktorá vo vegetačnom období sleduje dráhu slnka po oblohe a tak maximalizuje príjem slnečnej radiácie. V technickej

Tab. 1. Porovnanie výhod a obmedzení dát z dvoch typov meraní

	Pozemné meranie	SolarGIS model
Výhody	<ul style="list-style-type: none"> <li>údaje s vysokou frekvenciou merania (sekundy, minúty)</li> <li>vyššia presnosť v lokalite merania (ak je senzor presný a správne udržiavaný)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>dostupné všade na svete</li> <li>priestorové rozlíšenie 3 – 5 km</li> <li>frekvencia merania 15 – 30 minút</li> <li>priestorová a časová konzistencia a kontinuita</li> <li>kalibračná stabilita</li> <li>disponibilita &gt;99 %, história až 20 a viac rokov</li> </ul>
Obmedzenia	<ul style="list-style-type: none"> <li>vyššie náklady, neustála údržba</li> <li>chýbajúce dáta</li> <li>kvalita senzorov, kalibrácia</li> <li>bez kontroly kvality nedôveryhodné údaje</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>nižšia okamihová presnosť (ak sa porovnáva s kvalitnými senzormi)</li> </ul>

Tab. 2. Teoretická neurčitosť denných a hodinových meraní s 95 % pravdepodobnosťou prekročenia (P95)

Parameter	Prístroj	Denná neurčitosť	Hodinová neurčitosť
Priame normálne žiarenie (DNI)	First class pyrheliometer	±1,0 %	± 1,5%
	RSR (po spracovaní)	približne ±3,5 %	±3,5 % až ±4,5 %
Globálne horizontálne žiarenie (GHI)	Secondary standard pyranometer	±2 %	±3 %
	First class pyranometer	±5 %	± 8%
	Second class pyranometer	±10 %	±20 %
	RSR (po spracovaní)	približne ± 3,5%	±3,5 % až ±4,5 %

praxi sa na tento účel využívajú tzv. *trackery*. DNI je najdôležitejším parametrom pre energetické systémy s trakovacími a koncentračnými technológiami (*Concentrated Solar Power – CSP* a *Concentrated Photovoltaic – CPV*).

Vo všeobecnosti, kvalitný a dobre udržiavaný a prevádzkovaný *meteorologický prístroj* najvyššej presnosti poskytuje pre danú lokalitu najpresnejšie dáta. Dáta je možné zapisovať v akomkoľvek časovom kroku (hodiny, minúty, sekundy) a tak získavať pomerne presný obraz o lokálnych pomeroch. Pozemné merania však majú aj nevýhody (tab. 1):

1. Pozemné merania sú bodové. S narastajúcou vzdialenosťou od lokality merania narastá aj neurčitosť dát. V regiónoch s komplexnou topografiou je extrapolácia či interpolácia medzi viacerými pozemnými stanicami z metodologického hľadiska problematická.
2. Nadobúdacia cena a prevádzka prístrojov s vyššou mierou presnosti sú finančne nákladné.
3. Interpretácia dát z meracej stanice je expertnou činnosťou. Pre správnu interpretáciu meraných dát je priebežná kontrola a analýza dát odborníkom v príslušnej oblasti nevyhnutnosťou.

Iným prístupom je získavanie dát o slnečnom žiarení použitím *solárnych numerických modelov* využívajúcich satelitné a atmosférické dáta. Prvé metódy takéhoto spracovania boli známe už v 80. rokoch 20. storočia, kedy začali fungovať prvé meteorologické satelity. Avšak až v posledných rokoch sa presnosť numerického modelovania dostáva na úroveň, ktorá je porovnateľná s pozemnými meraniami. Modelovanie s použitím satelitných dát má niekoľko zásadných výhod (tab. 1). Zdôraznime predovšetkým možnosť výpočtu dát spätne do

histórie v rámci rozsiahlych územných celkov. Vďaka existencii archívu satelitných dát dnes môžeme modelovať históriu slnečnej radiácie za posledných 15 – 20 rokov v 15- a 30-minútovom časovom kroku a tak získať cenné informácie o solárnej klíme pre ktorékoľvek miesto na svete medzi 60 stupňom severnej a južnej zemepisnej šírky. Takéto údaje sa oceňujú predovšetkým v krajinách, ktoré nemajú žiadnu históriu pozemných meraní.

#### Pozemné merania

V praxi sa používa niekoľko typov meteorologických prístrojov. Pyranometre sú zariadenia určené na meranie GHI. Pyrheliometre sú špecializovanými prístrojmi pre meranie DNI. Prístroje typu RSR (*Rotating Shadowband Radiometer*) zasa kombinujú obe merania. Dôležitou vlastnosťou prístrojov je presnosť, akou sú schopné zaznamenať meranú veličinu. V tab. 2 je rozptýlená neurčitosť merania v prípade, že prístroj je správne nainštalovaný a je vykonávaná pravidelná údržba stanovená výrobcom prístroja.

Zároveň je však nutné poznamenať, že teoretické hodnoty uvádzané v tab. 2 nie sú v reálnych podmienkach dosiahnuteľné. Neurčitosť meraní môže dramaticky vzrásť v extrémnych operačných podmienkach alebo v prípade nedostatočnej údržby prístroja. K častým chybám (obr. 1) patrí predovšetkým povrchové znečistenie prístroja (napr. usadený nános prachu redukuje namerané hodnoty oproti skutočným), systematické alebo občasné zatienenie snímača prístroja či zanedbanie kalibrácie (v dátach sa prejavuje degradáciou v dlhodobom trende).

#### Numerické modelovanie – SolarGIS model

Modely, využívajúce satelitné a atmosférické dáta, sú v súčasnosti štandardným riešením pre výpočet his-

torických, recentných a aktuálnych dát o slnečnej radiácii, ako aj jej krátkodobú či dlhodobú predpoveď. Podrobný prehľad súčasných modelov a techník popisujú Perez, Cebecauer, Šuri (2014).

Všetky súčasné operačné modely majú semi-empirickú povahu. Vstupné informácie zahŕňajú fyzikálne vlastnosti atmosféry, vlastnosti satelitného snímača atď., v zjednodušenej forme. Výsledky modelovania sú validované a adaptované na základe empirických dát z pozemných meraní najvyššej triedy presnosti. Na základe empirických dát je model pre rôzne typy situácií nakonfigurovaný tak, aby dosahoval čo najlepšie výsledky.

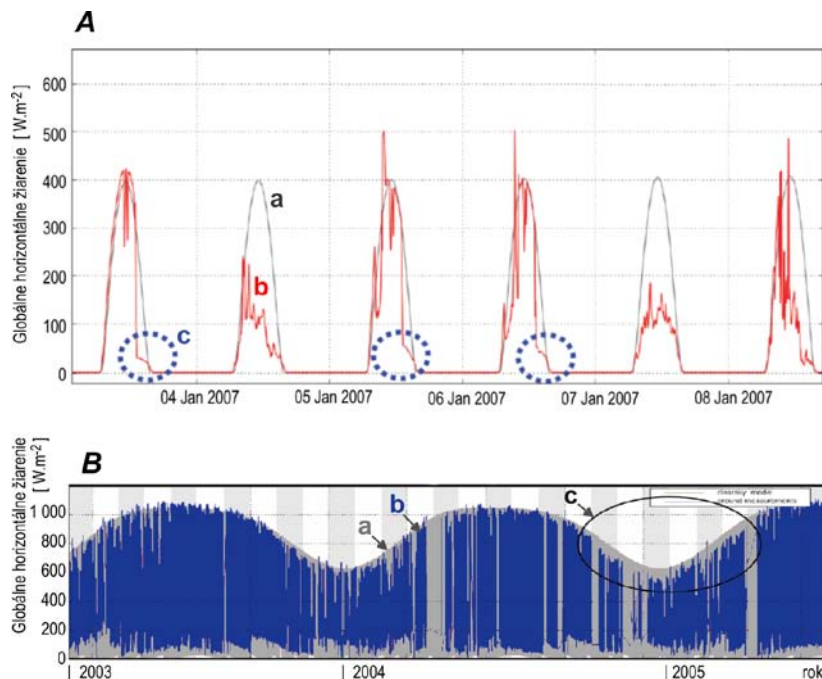
V tejto štúdii prezentujeme a použijeme dáta zo SolarGIS modelu, ktorý bol opakovane nezávisle vyhodnotený ako najpresnejší globálny model (Ineichen, 2011, 2014).

SolarGIS model zahŕňa niekoľko skupín vstupných dát. Solárna geometria popisuje dráhu slnka po oblohe v každom momente počas roku. Z atmosférických údajov sú najdôležitejšie informácie o aerosóloch, ktoré ovplyvňujú podiel difúzneho a priameho žiarenia. SolarGIS spracováva dáta s využitím globálnych numerických modelov atmosféry. Dôležitou súčasťou modelu sú dáta z meteorologických satelitov, na základe ktorých je identifikovaný charakter a transmisivita oblačnosti. Dnes spracováva SolarGIS model údaje z piatich geostacionárnych satelitných misií lokalizovaných nad rovníkom okolo celej Zeme. Mozaikovaním údajov dosahujeme globálne pokrytie.

Zjednodušená schéma krokov od vstupných dát k výsledným hodnotám slnečného žiarenia sa skladá z troch základných krokov:

1. Výpočet slnečného žiarenia dopadajúceho na zemský povrch za predpokladu bezoblačnej oblohy.
2. Údaje zo spektrálnych kanálov satelitných dát sú použité na kvantifikáciu pohlteneho a rozptýleného žiarenia aktuálnou oblačnosťou, výslednou hodnotou je index oblačnosti.
3. Výsledné slnečné žiarenie je dané vzťahom medzi celkovým žiarením za predpokladu bezoblačnej oblohy a indexom oblačnosti. Výstupnými hodnotami sú GHI a DNI, z ktorých sú následne odvodené ďalšie charakteristiky, napr. difúzne horizontálne žiarenie, žiarenie na naklonenú rovinu, príp. na povrch sledujúci Slnko (traker).

Výsledné hodnoty sú vyjadrené ako energia na plochu (napr. MJ.m<sup>-2</sup>, v technickej praxi sa viac používa kWh.m<sup>-2</sup>).



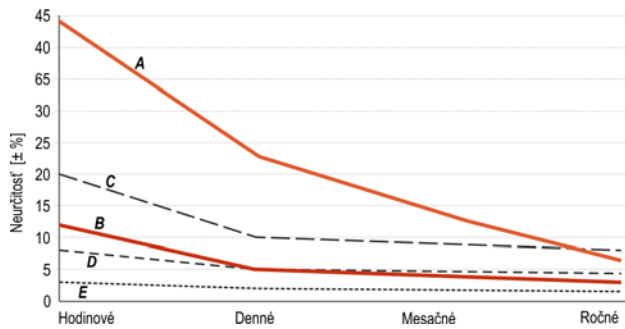
Obr. 1. Detekcia chýb v dátach z pozemných meraní. Zdroj: SolarGIS

Vysvetlivky: obr. A) a – teoretický profil dát, b – dáta vyhodnoteného meracím prístrojom, c – obdobia s chýbajúcimi meraniami a systematické podhodnocovanie; obr. B) a – teoreticky dosiahnuteľné maximum, b – dáta vyhodnoteného meracím prístrojom, c – periodicky opakujúce sa zatienenie senzora

Rozlíšenie výstupov je determinované veľkosťou satelitného pixla, ktorá v sub-satelitnom bode tvorí plochu asi 3 x 3 km. V priestore strednej Európy je to dôsledkom geometrického skreslenia približne 4 x 5 km. Následne je aplikovaná disagregácia dát pomocou digitálneho modelu terénu, ktorá zohľadňuje efekt lokálneho zatienenia okolitým terénom.

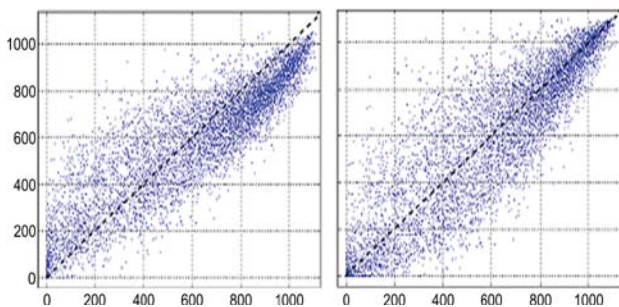
Časový krok údajov je taktiež ovplyvnený technickými parametrami satelitov. V euro-africkom priestore sú v súčasnosti dáta k dispozícii v 15-minútovom kroku, z ostatných satelitných misií v 30-minútovom kroku. Dostupnosť satelitných údajov dosahuje až 99 %. Zvyšné chýbajúce dáta sú automaticky doplnené pomocou špecifických algoritmov. Takýmto spôsobom SolarGIS poskytuje plne harmonizovaný časový rad dát, v euro-africkom priestore od roku 1994, v ostatných oblastiach od roku 1999 po súčasnosť. Časové obdobie 21 a viac, resp. 16 a viac rokov dobre charakterizuje strednodobú solárnu klímu v danom regióne.

Neurčitosť ročnej sumarizácie GHI s 90 % pravdepodobnosťou prekročenia sa v priemere pohybuje medzi 3 – 5 %, v náročnejších geografických podmienkach môže stúpnuť na 7 – 8 %. Pre DNI môže neurčitosť údajov dosahovať približne dvojnásobok. Hodnoty neurčitosti sú získané na základe validácie pomocou meraní z viac ako 200 pozemných staníc vysokej triedy presnosti, lokalizovaných v rôznych klimatických regiónoch sveta.



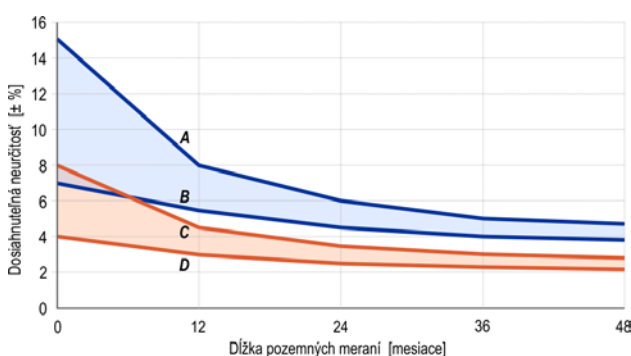
**Obr. 2. Porovnanie presnosti modelu SolarGIS s kvalitnými pozemnými meraniami na príklade globálneho žiarenia (GHI). Zdroj: SolarGIS**

Vysvetlivky: Modely: A) SolarGIS GHI dáta – vyššia miera neurčitosti, B) SolarGIS GHI dáta – nižšia miera neurčitosti, C) *Second class* senzor, D) *First class* senzor, E) *Secondary standard* senzor; s agregáciou dát sa presnosť modelu zvyšuje



**Obr. 3. Lokálna adaptácia 1 roka priameho normálového žiarenia (DNI) dát v časovom kroku 15 minút pre lokalitu Tamanrasset (Alžírsko). Zdroj: SolarGIS**

Vysvetlivky: Graf vľavo prezentuje porovnanie originálnych DNI dát z pozemnej stanice a SolarGIS modelu; graf vpravo prezentuje korigované SolarGIS dáta po adaptácii



**Obr. 4. Presnosť solárneho modelu vo vybranej lokalite alebo regióne je možné zvýšiť využitím kvalitných lokálnych meraní slnečného žiarenia. Zdroj: SolarGIS**

Vysvetlivky: Priame normálové žiarenie: A) DNI P99,5 %, B) DNI P90 %; Globálne horizontálne žiarenie: C) GHI P99,5 %, D) GHI P90 %; Hodnota P reprezentuje štatistickú pravdepodobnosť prekročenia daného parametra (napr. GHI P90 % – odchýlka GHI vypočítaného SolarGIS modelom s 90 % pravdepodobnosťou nebude presahovať hodnotu uvedenú v grafe)

## Kombinácia pozemných meraní a dát zo SolarGIS modelu

Výhodou pozemných meraní je ich schopnosť poskytovať bodové dáta vyššej presnosti a kratšej časovej frekvencie (platí pre kvalitné prístroje s profesionálnou údržbou). SolarGIS dáta sú poskytované v dlhšom časovom kroku, avšak numerickým modelovaním získavame dlhodobý časový rad (charakter solárnej klímy) s kontinuálnym globálnym pokrytím. Neurčitosť modelovaných dát, najmä okamihových meraní môže dosahovať vyššie hodnoty, a to najmä pri počasí s premenlivou oblačnosťou. Vyplýva to z povahy merania: pozemné merania sú bodové, hodnoty z numerických modelov reprezentujú jednotkovú plochu. V prípade SolarGIS dát táto plocha reprezentuje veľkosť satelitného pixla. Neurčitosť dát však progresívne klesá v agregovaných hodnotách (denné, mesačné, ročné, dlhodobé priemery) (obr. 2).

Využitím predností oboch zdrojov dát môžeme dosiahnuť najpresnejšie výsledky pri mapovaní solárneho potenciálu konkrétneho regiónu. Krátke obdobie pozemných meraní (optimálne 1 – 2 roky) realizovaných prístrojmi s najvyššou triedou presnosti využívame na lokálnu alebo regionálnu adaptáciu dlhodobého radu dát zo SolarGIS modelu. Na základe vzájomného porovnania hodnôt sú identifikované systematické rozdiely oboch dátových zdrojov a korigované pomocou štatistických metód (obr. 3). Korekcie z analýzy 1 – 2 rokov dát z pozemných meraní sú následne aplikované na celý historický rad SolarGIS dát (teda napr. 21-ročný časový rad). Týmto procesom sa výrazne spresnia modelované dáta a zníži sa ich neurčitosť v mesačných a ročných sumách (obr. 4). Nižšia neurčitosť dát znamená menšie riziko pre investora a pre inžinierske činnosti. Neurčitosť je dôležitým parametrom predovšetkým pre financovanie a prevádzkovanie solárnych energetických projektov.

## Mapy slnečného energetického potenciálu

Vo veľkej väčšine krajín nemajú presné pozemné merania slnečnej radiácie prakticky žiadnu históriu, resp. budovanie sietí rádiometrických staníc sa vďaka potrebám solárnej energetiky začalo len v nedávnej dobe. Numerické modely sú v týchto oblastiach jediným zdrojom historických dát, na základe ktorých môžeme predpovedať parametre slnečného žiarenia a dlhodobú výrobu energie zo slnečných elektrární.

Aj keď satelitné modely poskytujú pomerne presné odhady dlhodobého priemeru, nároky na presnosť v priemysle, najmä v prípade veľkých elektrární, vyžadujú ich spresnenie. Efektívne sa to dá dosiahnuť kombináciou krátkodobých (1 – 2 roky) pozemných meraní s matematickými modelmi.

V posledných rokoch vzniklo viacero iniciatív s cieľom umožniť spresnenie dát z numerických modelov na

regionálnej úrovni. Úspešnou štúdiou bola adaptácia GHI a DNI dát na území Juhoafrickej republiky, v lokalite Lesotha a Svazijska. Výsledkom sú mapy zobrazujúce dlhodobý ročný priemer GHI a DNI. Dáta boli vypočítané z 15- a 30-minútových harmonizovaných časových radov reprezentujúcich obdobie 20 rokov (1994 – 2013). Na spresnenie modelu SolarGIS bolo využitých 14 pozemných staníc, ktoré poskytovali dáta v priemere za posledné 1 až 3 roky. Okrem merania slnečnej radiácie a základných meteorologických parametrov boli použité niektoré stanice merajúce údaje o obsahu aerosólov v atmosfére. Dáta z pozemných meraní boli dôsledne validované a následne bola vykonaná regionálna adaptácia modelu. Spresnenie pôvodných SolarGIS dát sa v prípade GHI pohybovalo v intervale od  $-0,5\%$  do  $+1\%$ , v extrémnych regiónoch do  $+2\%$ ; v prípade DNI od  $-3\%$  do  $+6\%$ , v extrémnych regiónoch do  $+12\%$  (obr. 5).

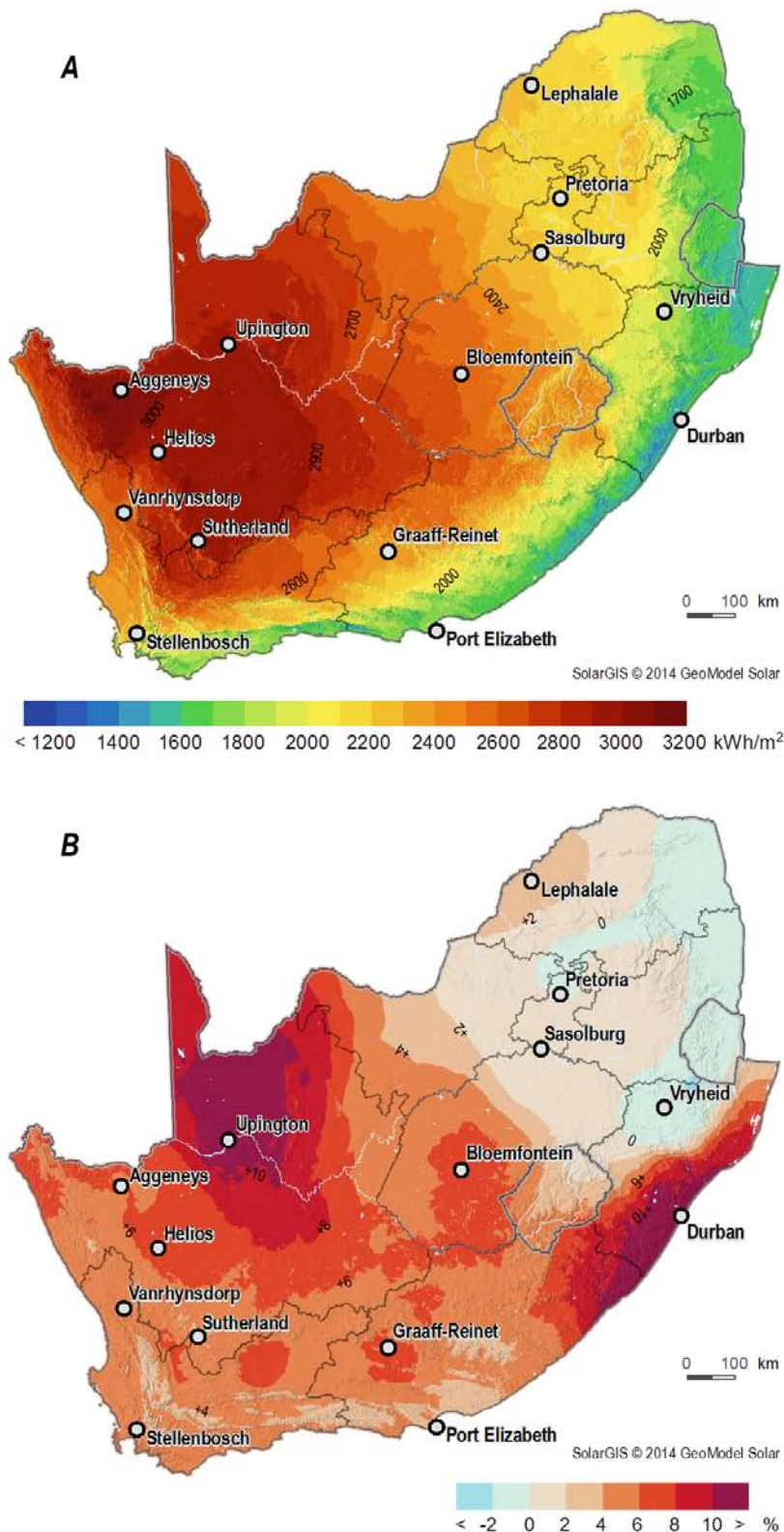
O regionálnu adaptáciu solárnych zdrojov majú záujem vládne a medzinárodné inštitúcie za účelom strategického plánovania investícií na úrovni krajín a väčších regiónov. Príkladom môže byť iniciatíva Svetovej banky ESMAP, ktorá prostredníctvom máp potenciálu najchudobnejších krajín sveta má za cieľ podporiť zrýchlené investovanie do čistých energetických technológií, ale aj ekonomický rozvoj a rozvoj podnikateľského prostredia v týchto krajinách (príkladom sú Zambia, Malawi, Pakistan a i.).

#### Variabilita slnečného žiarenia v ukážkach

Variabilita slnečného žiarenia má niekoľko dimenzií, pričom výrazne určuje technologické možnosti integrácie väčších kapacít solárnej energie do elektrických sietí.

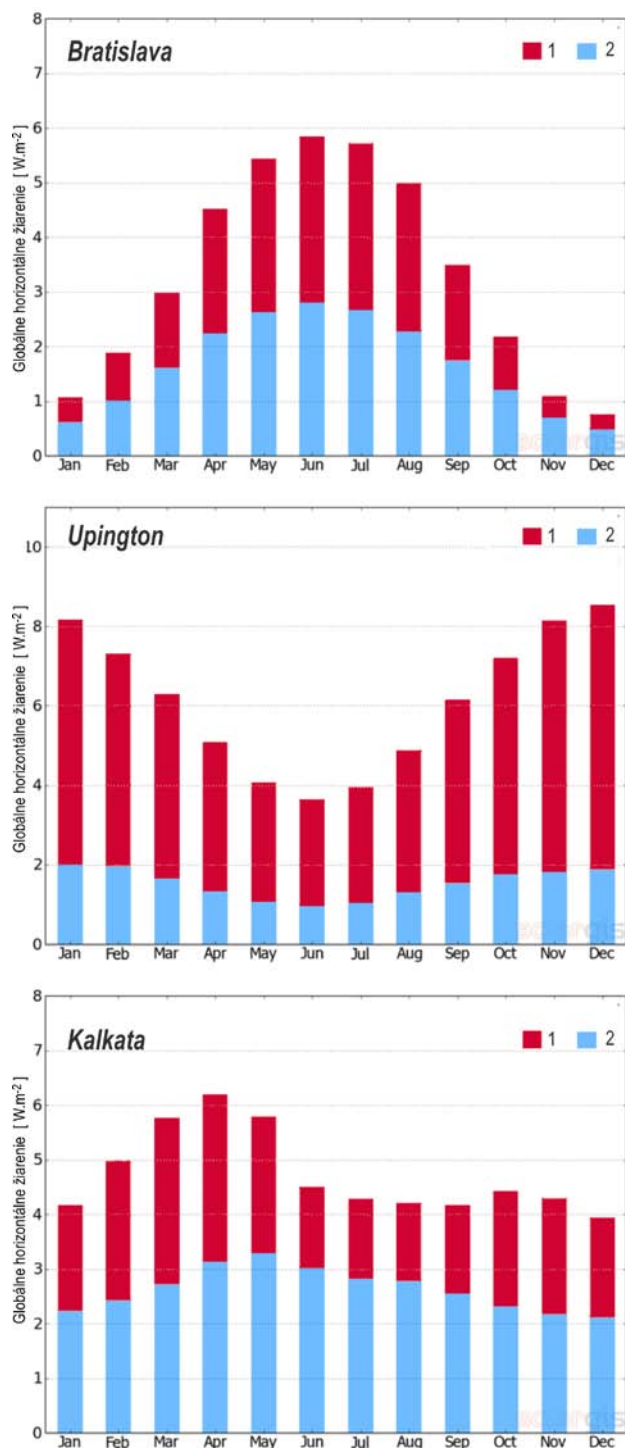
#### Medziročná variabilita

Zaujímavé porovnanie medziročnej variability slnečného žiarenia v Európe v rokoch 2011, 2012 a 2013 v porovnaní s 20-ročným priemerom podáva obr. na str. 3 obálky. Rozdiely ročného úhrnu slnečnej radiácie v intervale do  $\pm 5\%$



Obr. 5. Regionálne adaptovaná mapa priameho normálneho žiarenia Juhoafrickej republiky. Zdroj: SolarGIS

Vysvetlivky: A) Dlhodobý priemerný ročný úhrn priameho normálneho žiarenia po adaptácii SolarGIS modelu pomocou údajov z pozemných staníc, lokalizovaných na mape, B) mapa odchýlok oproti nekorigovaným dátam zo SolarGIS modelu



Obr. 6. Dlhodobé mesačné priemery globálneho horizontálneho žiarenia pre vybrané lokality. Zdroj: SolarGIS iMaps

Vysvetlivky: 1 – priame žiarenie, 2 – rozptýlené žiarenie

sú bežným javom. Zaznamenávame však aj vyššie odchýlky, napr. v centrálnych regiónoch Balkánu bol rok 2012 až o 11 – 12 % „slnecnejší“ ako priemerný rok za posledné dve desaťročia.

### Sezónna variabilita

Sezonalita slnečného žiarenia má počas roka rôznu amplitúdu v rôznych klimatických regiónoch. Dlhodobý priemer úhrnu jednotlivých komponentov GHI z troch lokalít zobrazuje obr. 6. V prvých dvoch prípadoch jednoznačne dominuje rozdiel medzi letným a zimným obdobím (na severnej a južnej pologuli), v treťom prípade je hlavným faktorom striedanie suchých a monzúnových (teda oblačnejších) období. V našich podmienkach je takmer 600 % rozdiel medzi najslnecnejším a najmenej slnečným mesiacom. Asi len 30 % tvorí tento rozdiel v Kalkate. V niektorých oblastiach (napr. na Maldivách) nepresahuje mesačná variabilita hranicu 10 %.

Zaujímavý je tiež podiel komponentov GHI. V našich oblastiach tvorí podiel difúzneho žiarenia k priamemu asi 50 %. V polopúštnych oblastiach centrálnej časti Juhoafrickej republiky je to napr. len cca 25 %, v extrémnych oblastiach (napr. v Číne, v oblasti Chengdu) presahuje až 75 %. Takéto dáta sú prístupné cez online aplikácie SolarGIS iMaps alebo pvPlanner prakticky pre ktorúkoľvek lokalitu na Zemi. Pre solárnu energetiku sú extrémne dôležitou informačnou bázou najmä v prípravnej časti projektov pre výber vhodnej lokality, technológie, dizajnu a správneho nadimenzovania systému.

### Denná variabilita

Dennú variabilitu slnečného žiarenia ovplyvňujú najmä aktuálne synoptické situácie a znečistenie atmosféry. Aplikácia SolarGIS pvSpot prezentuje potenciál výroby elektriny zo zadefinovaného fotovoltaického systému na dennej alebo mesačnej báze (obr. 7).

### Efektívna výroba solárnej elektriny

Solárny potenciál je geograficky diferencovaný, jeho využívanie v regiónoch a krajinách sveta má však odlišné charakteristiky. Okrem ekonomickej sily regiónu (pozitívny príklad Nemecka a ďalších európskych krajín) dôležitým faktorom je i typ energetického hospodárstva, dostupnosť iných alternatív (relatívne málo využitý potenciál v Austrálii), úroveň technického know-how a financií (slabý prienik v afrických krajinách) a pod.

Dnes, okrem tradičných regiónov, mnoho nových krajín integruje slnečnú elektrinu do svojho hospodárstva (obr. 8). Uvedme aspoň niekoľko príkladov toho, ako je možné efektívne začleniť a riadiť výrobu zo solárnych elektrární v rámci kombinovaných energetických systémov.

**Inteligentné siete (smart grids)** sú založené na maľazmente množstva malých, distribuovaných zdrojov elektrickej energie. Mnohé z elektrární využívajú niektorý z obnoviteľných zdrojov energie alebo ich kombináciu. Pre prípady extrémneho poklesu elektriny v

prenosovej sústave je nutné mať k dispozícii záložné zdroje (vhodné sú napr. paroplynové turbíny). Ekonomickým riešením môže byť aj dopĺňanie energie nákupom. Energetické zdroje sú riadené centrálné, sú prioritizované (pokiaľ je dostatok elektriny produkovaný napr. slnečnou a veternou energiou, naplňajú sa vodné nádrže, paroplyn je spúšťaný len v prípade potreby v čase odberových špičiek). Princíp *smart gridov* je škálovateľný, funguje v malej komunite i veľkej prenosovej sústave. Touto filozofiou sa uberajú niektoré vyspelé ekonomiky s rozľahlou prenosovou sústavou (Nemeccko, Rakúsko, Japonsko atď.).

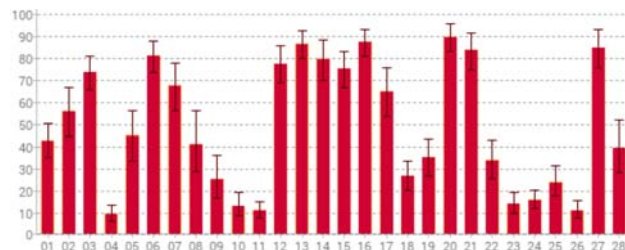
Zavádzanie *hybridných systémov* pomáha transformovať energetiku založenú na výrobe elektriny z konvenčných zdrojov (dieselové agregáty, uhlie). Tie sa vďaka zvyšujúcej cene fosílnych palív stávajú ekonomicky nerentabilné. Príklady z mnohých krajín ukazujú, že najjednoduchším a ekonomicky efektívnym riešením je nahradiť čo najväčšiu časť tradičnej výroby fotovoltikou.

Keďže fotovoltika je takmer bezúdržbová technológia, je veľmi vhodná aj na výrobu energie v izolovaných alebo nedostupných oblastiach. Rýchlo sa rozvíjajúcim segmentom sú *offgrid* technológie, teda *ostrovne systémy*. Typicky je vyrobená energia z týchto systémov uchovávaná v batériách a spotrebovaná na rovnakom mieste.

Staronová téma *skladovania energie (storage)* je opäť veľkou technologickou výzvou nielen pre ostrovne systémy, ale aj pre implementáciu vo veľkých prenosových sústavách. Prečerpávací vodná elektrárň Čierny Váh je tiež typom skladovania energie a jej využitia v potrebnom čase. V súčasnosti je rozvíjaných niekoľko sofistikovaných princípov skladovania energie (chemické väzby a procesy, termické princípy). Vzhľadom na variabilitu výroby elektriny zo solárnych elektrární má vývoj skladovacích systémov obrovský význam. Vývoj vhodnej technológie skladovania bude ďalším akcelerátorom rozvoja obnoviteľných zdrojov energie.

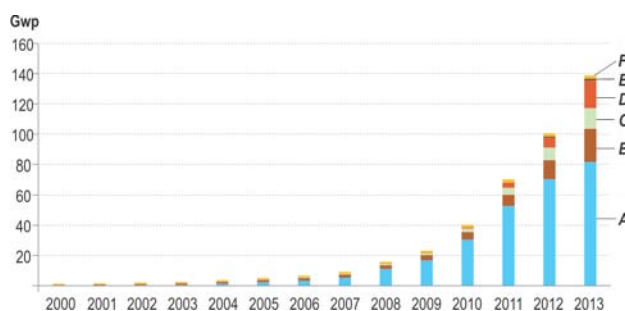
\* \* \*

Mapovanie slnečného potenciálu s využitím historických dát (ktoré znižujú mieru neurčitosti výsledných hodnôt) je dnes postavené na overených metodikách. SolarGIS je prvou platformou, ktorá je schopná poskytovať dáta vo vysokom priestorovom aj časovom rozlíšení s prakticky globálnym pokrytím. Použitím overených konverzných modelov vieme nielen odhadnúť solárny potenciál v súčasnosti, ale poskytnúť aj predpoveď výroby elektrickej energie z rôznych technologických systémov na dobu životnosti fotovoltickej elektrárne. Súčasou výzvou je predovšetkým krátkodobá (teda 1 až 6 hodín) a strednodobá predpoveď (niekoľko dní) úhrnu slnečného žiarenia v čase a priestore, ktorá podlieha momentálnym zmenám a výkyvom počasia.



Obr. 7. Odhad dennej výroby elektrickej energie z fotovoltického systému vo februári 2015 vypočítaný SolarGIS modelom. Zdroj: SolarGIS pvSpot

Vysvetlivky: Hrubé vertikálne línie znázorňujú odhad výroby elektrickej energie, tenké línie znázorňujú mieru neurčitosti výpočtu. Fotovoltický (FV) systém je umiestnený na streche Strednej priemyselnej školy elektrotechnickej v Bratislave-Dúbravke, s inštalovanou kapacitou 19,1 kWp



Obr. 8. Vývoj inštalovanej kapacity fotovoltických elektrární vo svete v rokoch 2000 – 2013 podľa regiónov. Zdroj: Rowe et al. (2014)

Vysvetlivky: A – Európa, B – Ázia a oblasť Tichého oceána, C – Amerika, D – Čína, E – Blízky východ a Afrika, F – iné regióny

## Literatúra

- Ineichen, P.: Five Satellite Products Deriving Beam and Global Irradiance Validation on Data from 23 Ground Stations. Geneva: University of Geneva, 2011, 36 p.
- Ineichen, P.: Long Term Satellite Global, Beam and Diffuse Irradiance Validation. Energy Procedia, 2014, 48, p. 1586 – 1596.
- Perez, R., Cebeacauer, T., Šúri, M.: Semi-Empirical Satellite Models. In: Kleissl, J. (ed.): Solar Energy Forecasting and Resource Assessment. Oxford: Academic Press, 2014, p. 21 – 46.
- Perez, R., Perez, M.: A Fundamental Look at Energy Reserves for the Planet. SHC Solar Update, 2009, 50, p. 8 – 10.
- Rowe, T. et al.: Global Market Outlook for Photovoltaics 2014 – 2018. Brussels: EPIA, 2014, 57 p.
- Šúri, M., Cebeacauer, T., Meyer, A. J., van Niekerk J. L.: Accuracy-Enhanced Solar Resource Maps of South Africa. Proceedings of SASEC2015, Third Southern African Solar Energy Conference. Skukuza (in press).

Mgr. Juraj Beták, PhD., [contact@geomodel.eu](mailto:contact@geomodel.eu)  
 RNDr. Nad'a Šúriová, [contact@geomodel.eu](mailto:contact@geomodel.eu)  
 RNDr. Marcel Šúri, PhD., [contact@geomodel.eu](mailto:contact@geomodel.eu)  
 Mgr. Tomáš Cebeacauer, PhD., [contact@geomodel.eu](mailto:contact@geomodel.eu)  
 GeoModel Solar, s. r. o., Pionierska 15, 831 02 Bratislava