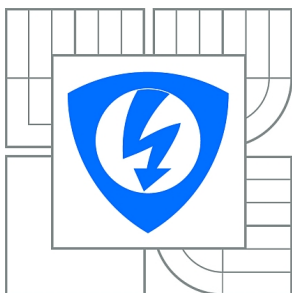


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

OPTIMALIZACE SKLONU FOTOVOLTAICKÉHO MODULU

OPTIMALIZATION OF TILT OF PHOTOVOLTAIC MODULE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

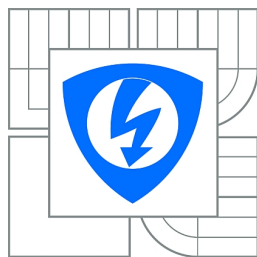
Bc. ROMAN ŠINDLER

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR KŘIVÍK, Ph.D.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Roman Šindler

ID: 83061

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Optimalizace sklonu fotovoltaického modulu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s metodou výpočtu polohy Slunce po obloze.

Osvojte si základy práce s programem VEE Pro 8.0.

Vytvořte program simulující polohu Slunce na obloze během dne pro proměnné zeměpisné šířky a dny v roce.

Vypočítejte výkon slunečního záření dopadajícího na fotovoltaický modul při proměnném náklonu modulu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 27.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Petr Křivík, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt:

Tato práce se zabývá slunečním zářením, které je jedním z možných zdrojů obnovitelné energie. Cílem práce je seznámit se s metodou výpočtu polohy Slunce na obloze, osvojit si základy v programu VEE Pro 8.0 a vytvořit program simulující polohu Slunce na obloze během dne pro proměnné zeměpisné šířky a dny v roce a následně vypočítat výkon slunečního záření dopadajícího na solární modul při proměnném náklonu.

Teoretická část se zabývá přenosem energie ze Slunce na Zemi a složkami záření, které vznikají při průchodu paprsků atmosférou a popisuje tyto složky záření na solární modul. Praktická část se věnuje vytváření programů čerpajících z teoretického základu, které jsou určeny pro následné simulace pozice slunce a simulace pro denní a celkový roční úhrn záření včetně jeho složek na solární modul při různém náklonu.

Abstract:

This thesis deals with the solar radiation, which is one of the potential sources of the renewable energy. The purpose of this thesis is to apprise of the methods how to calculate the Sun's position as well as to learn the basics of software VEE Pro 8.0. Also, create a program simulating the location of the Sun during the day according to the variable latitudes and days and consequently to calculate the Sun irradiation passing through the atmosphere onto the tilted solar module, considering the respective tilt.

Theoretical part describes the transmission of the energy between Sun and Earth, global irradiation and its components, which are generated by beams passing through the atmosphere and incident on a solar module. Practical part is dedicated to a program creation according the theoretical basis and it is used for further simulation of the Sun's position. Another program simulates the total daily and annual irradiation including its components onto the tilted solar module, considering the respective tilt.

Klíčová slova:

poloha Slunce, simulace, solární modul

Keywords:

Sun's position, simulation, solar module

Bibliografická citace díla:

ŠINDLER, R. *Optimalizace sklonu fotovoltaického modulu-diplomová práce*. Brno, 2010. 47 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Křivík, Ph.D. FEKT VUT v Brně

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 27. 5. 2010

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Křivíkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování diplomové práce.

1 OBSAH

1	OBSAH	5
2	ÚVOD	6
3	SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ.....	7
3.1	ZÁŘENÍ NA POVRCHU ZEMĚ	11
3.2	ZÁŘENÍ NA VODOROVNOU ROVINU	16
4	VÝPOČET POZICE SLUNCE	21
4.1	ALGORITMUS DIN,1985	22
4.2	SIMULACE POLOHY SLUNCE	25
5	VÝPOČET ÚHLU DOPADU NA SOLÁRNÍ MODUL	32
5.1	PŘÍMÉ ZÁŘENÍ NA NAKLONĚNOU ROVINU	33
5.2	SIMULACE DENNÍHO ZÁŘENÍ NA PŘÍMÝ A NAKLONĚNÝ SOLÁRNÍ MODUL	35
5.3	SIMULACE ROČNÍHO ÚHRNU ZÁŘENÍ NA PŘÍMÝ A NAKLONĚNÝ SOLÁRNÍ MODUL	40
6	ZÁVĚR:.....	45
7	SEZNAM OBRÁZKŮ	46
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:	47

2 Úvod

Slunce odjakživa vzbuzovalo zájem lidí o jeho studium a v posledních desetiletích se těší zájmu na poli výzkumu technologických aplikací využívajících právě jeho energii, také proto lze Slunce označit za zdaleka nejvýznamnější zdroj obnovitelné energie. Oproti tomu je energie z geotermálních zdrojů a planetární gravitace relativně bezvýznamná. Tento hojný zdroj energie může být využitý přímo jako tepelný nebo fotovoltaický systém. Znalost slunečního záření je důležitá pro četné obnovitelné energetické systémy. Tabulka 2.1 obsahuje nejdůležitější fotometrické a radiometrické jednotky pro použití sluneční energie. Následné kapitoly práce se zabývají teoretickým rozбором chování slunečních paprsků po průchodu atmosférou a jejich dopadem na povrch solárního modulu. V praktické části je využit algoritmus DIN, 1985 s jehož pomocí jsou vytvořeny programy simulující pozici slunce a následně i výkon dopadající na nakloněný solární modul.

Tab 2.1: Přehled některých radiometrických a fotometrických veličin [1]

Radiometrické			Fotometrické		
Jméno	symbol	jednotka	jméno	symbol	jednotka
zářivý tok	Φ_e	W	spektrální svítivost	I_v	$\text{lm}\cdot\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$
Zář	L_e	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{sr}^{-1}$	jas	L_v	$\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$
Záření	E_e	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	spektrální osvětlení	E_v	$\text{lm}\cdot\text{m}^{-3}$
intenzita vyzařování	H_e	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	spektrální světlení	H_v	$\text{lm}\cdot\text{m}^{-3}$

Pozn.: lm-lumen; sr-steradián; cd-kandela

3 Sluneční záření

Slunce je centrální bod naší sluneční soustavy, které pravděpodobně existuje už 5 miliard let a očekává se, že dalších 5 miliard let přežije. Slunce se skládá asi z 80 procent vodíku, 20 procent hélia a jen 0,1 procent dalších prvků. Tabulka 3.2 obsahuje data o Slunci v porovnání se Zemí.

Tab. 3.2: Hodnoty parametrů Slunce a Země [1]

	Slunce	Země	poměr
obvod [km]	1392520	12756	1:109
průměr [km]	4373097	40075	1:109
povrch [km ²]	$60874 \cdot 10^{12}$	$5,101 \cdot 10^8$	1:11934
objem [km ³]	$1,4123 \cdot 10^{18}$	$1,0833 \cdot 10^{12}$	1:1303670
hmotnost [kg]	$1,9891 \cdot 10^{30}$	$5,9742 \cdot 10^{24}$	1:332946
průměrná hustota [g/m ³]	1409	5,516	1:0,26
gravitace na povrchu [m/s ²]	274	9,81	1:28
teplota na povrchu [K]	5777	288	1:367
teplota ve středu [K]	15000000	6700	1:2200

Procesy termojaderné fúze tvoří zářivý výkon Slunce. Během těchto procesů se čtyři vodíková jádra (protony ^1p) spojí, aby vytvořily jedno jádro hélia (alfa částice $^4\alpha$). Alfa částice se skládá z dvou neutronů ^1n a dvou kladně nabitých protonů ^1p . Navíc tato reakce produkuje dva pozitrony e^+ a dvě neutrina ν_e a generuje energii, což je naznačeno na obrázku 3.1



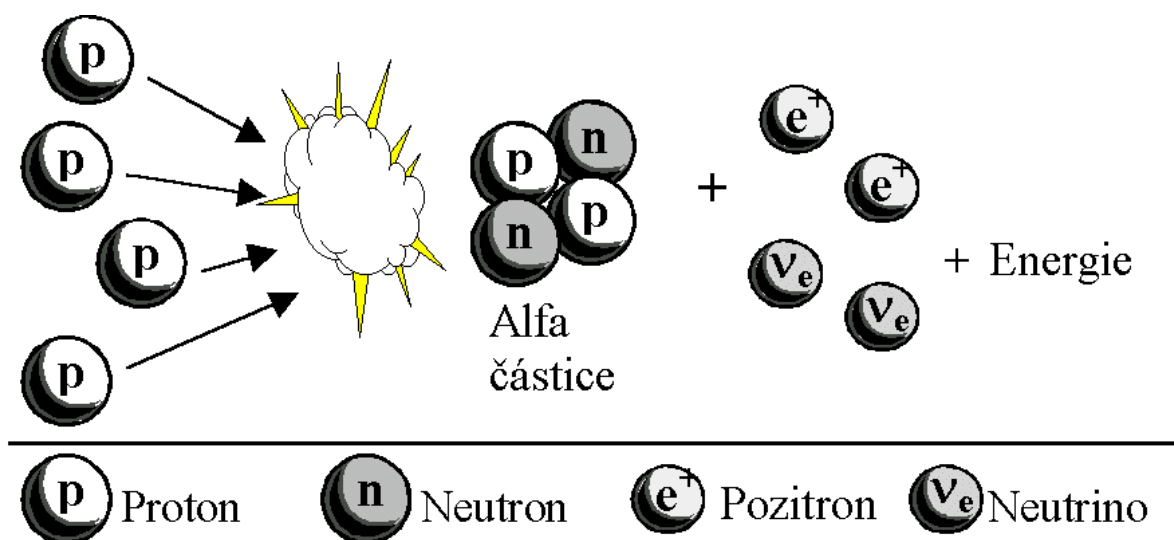
Porovnáním atomové hmotnosti před a po reakci zjistíme, že celková hmotnost je po reakci nižší. Tabulka 3.3 ukazuje hmotnosti částic pro výpočet hmotnostního rozdílu. Hmotnost neutronu ν_e může být v této rovnici zanedbána a hmotnost pozitronů e^+ je stejná jako elektronů e^- . Hmotnostní rozdíl Δm bude vypočten:

$$\Delta m = 4 \cdot m(^1\text{p}) - m(^4\alpha) - 2 \cdot m(e^+) \quad (3.2)$$

Tab. 3.3: Hmotnosti některých nuklidů a částic [1]

Částice nebo nuklid	Hmotnost	Částice nebo nuklid	Hmotnost
elektron (e^-)	0,00054858u	vodík (^1H)	1,007825032u
proton (^1p)	1,00727647u	hélium (^4He)	4,002603250u
neutron (^1n)	1,006664923u	alfa částice ($^4\alpha$)	4,0015060883u

Pozn.: Atomová hmotnostní konstanta $u=1,660565 \cdot 10^{-27}$ kg což je klidová hmotnost $1/12$ uhlíku $^{12}_6\text{C}$



Obr. 3.1. Syntéza čtyř vodíkových jader a vznik jádra hélia (alfa částice)[1]

Celková hmotnost všech složek po syntéze je menší o hodnotu vazební energie než před syntézou. Hmotnostní rozdíl se přemění v energii ΔE vyjádřenou dle vztahu:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 \quad (3.3)$$

Kde rychlost světla $c=2,99792458 \cdot 10^8$ m/s, tato rovnost určuje uvolnění energie termojadernou fúzí $\Delta E = 3,955 \cdot 10^{12}$ J = 24,687 MeV. Energie vazby ΔE jádra vysvětluje různé hmotnosti částic po syntéze stejně jako energetický rozdíl. Atomová jádra se skládají z N neutronů ^1_0n a Z protonů ^1_1p . Pro udržení rovnováhy musí být tato vazební energie uvolněna protony a neutrony během syntézy jader. Hmotnostní rozdíl alfa částice a dvou neutronů společně s dvěma protony určují energii vazby jádra hélia. V atomovém obalu vodíku ^1H je

jeden elektron, zatímco v atomu helia ${}^4\text{He}$ jsou elektrony dva. Během procesu jaderné syntézy dva ze čtyř elektronů vodíkových atomů přejdou do atomového obalu hélia. Dva další elektrony a pozitrony se přemění přímo v energii. Tato radioaktivní energie je rovna čtyřnásobku hmotnosti elektronu 2,044 MeV. Celková uvolněná energie během reakce je pak 26,731 MeV. Toto malé množství energie se na první pohled zdá nevýznamné, ale enormní množství fúzujících jader má za následek vydání obrovského množství energie. Slunce ztrácí 4,3 milion tun hmotnosti za sekundu. ($\Delta m = 4,3 \cdot 10^9 \text{ kg/s}$). čímž vzniká solární zářivý výkon $\varphi_{e,S}$:

$$\varphi_{e,S} = \Delta m \cdot c^2 = 3,845 \cdot 10^{26} \text{ W} \quad (3.4)$$

Ten je rozložen po slunečním povrchu A_S a vykazuje charakteristické záření:

$$M_{e,S} = \frac{\varphi_{e,S}}{A_S} = 63,11 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2} \quad (3.5)$$

Každý čtvereční metr slunečního povrchu vysílá zářivý výkon z 63,11 MW. Jedna pětina čtverečního kilometru slunečního povrchu vyzařuje energii 400 EJ ročně. Toto množství energie se rovná celkovému požadavku primární energie na Zemi. Sluneční záření může být přiblíženo využitím vyzařování absolutně černého tělesa pro které platí Stefan Boltzmannův zákon:

$$M_e(T) = \sigma \cdot T^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (3.6)$$

Lze ho využít pro odhad povrchové teploty Slunce $T_{\min.}$:

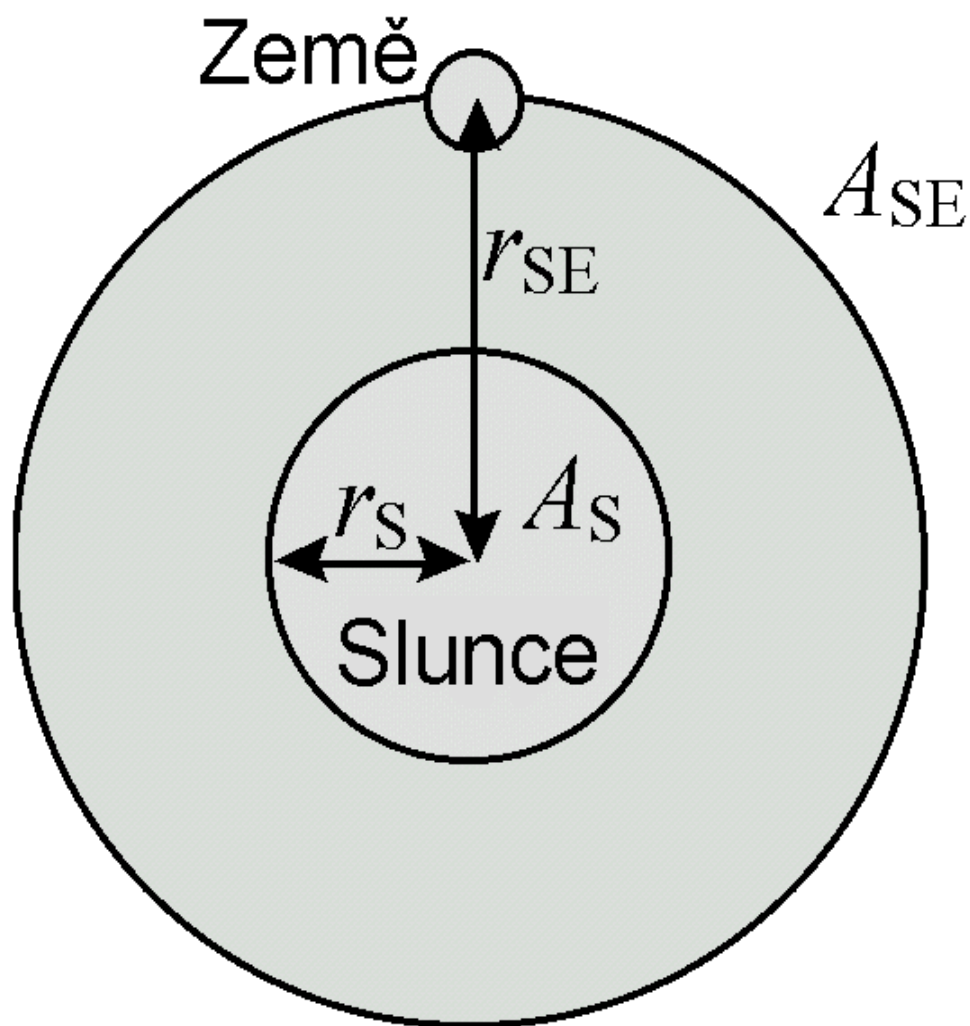
$$T_{\min} = \sqrt[4]{\frac{M_{e,S}}{\sigma}} = 5777 \text{ K} \quad (3.7)$$

kde $\sigma = 5.67051 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ je Stefan-Boltzmannova konstanta

Vezme-li se povrch A_{SE} koule se středem ve středu Slunce o poloměru průměrné vzdálenosti Země a Slunce ($r_{SE} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$), bude celkový zářivý výkon stejný jako na povrchu A_S Slunce (obrázek 3.2). Toto definuje specifické záření $M_{e,S}$ nebo-li koncentraci energie měřenou na jeden čtvereční metr, která je mnohem vyšší na slunečním povrchu než v prostoru, který Slunce obklopuje.

$M_{e,S} \cdot A_S = E_e \cdot A_{SE}$, kde $A_{SE} = 4\pi \cdot r_{SE}^2$ vyjadřuje záření dopadající na Zem E_e :

$$E_e = M_{e,S} \cdot \frac{A_S}{A_{SE}} = M_{e,S} \cdot \frac{r_S^2}{r_{SE}^2} \quad (3.8)$$



Obr. 3.2. Zářivý výkon na povrchu koule s poloměrem r_{SE} je stejný jako na povrchu Slunce[1]

Takto se určuje výsledné mimozemské záření pozorovatele na Zemi ve vzdálenosti od Slunce. Vzdálenost mezi Sluncem a Zemí není stálá po celý rok, mění se mezi $1,47 \cdot 10^8$ km a

$1,52 \cdot 10^8$ km. Toto způsobuje změnu záření E_e mezi 1325 W/m^2 a 1420 W/m^2 . průměrná hodnota se nazývá sluneční konstanta, E_0 je:

$$E_0 = 1367 \pm 2 \text{ W/m}^2 \quad (3.9)$$

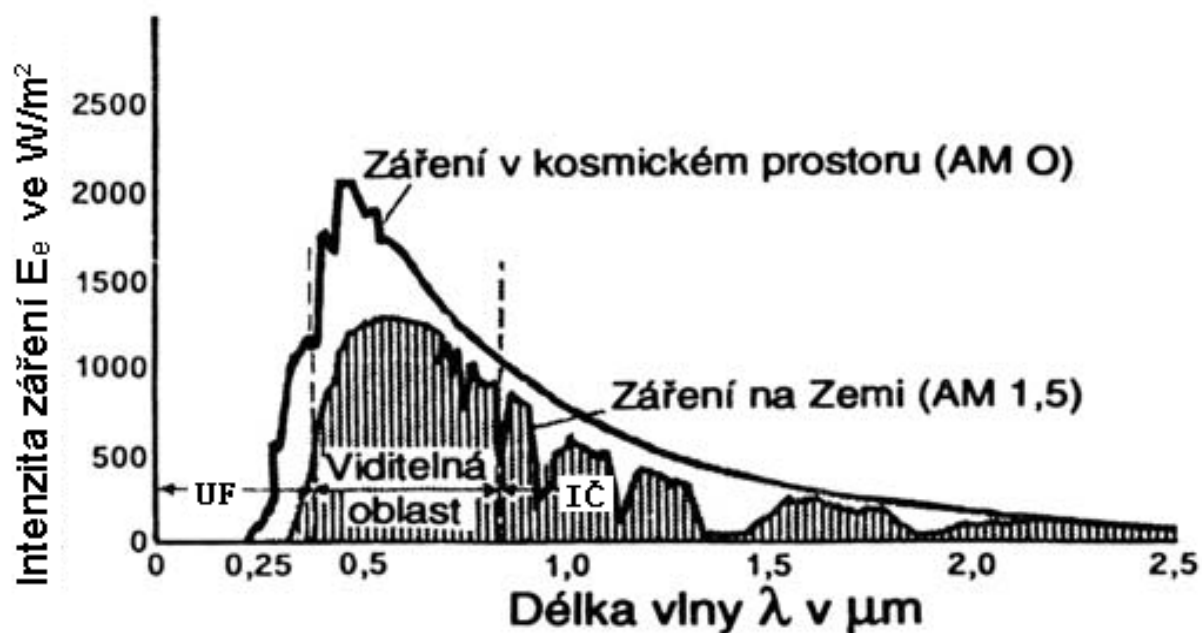
Tato hodnota může být měřena mimo zemskou atmosféru. Pro sluneční konstantu je také užívaný symbol I_0 . [1]

3.1 Záření na povrchu Země

Hodnoty záření, měřené na povrchu Země, jsou obvykle ovlivněny ztrátami při průchodu atmosférou, kterých je několik a jsou to zejména ztráty způsobené:

- odrazem od atmosféry
- absorpcí v atmosféře (hlavně $\text{O}_3, \text{H}_2\text{O}, \text{O}_2$ a CO_2)
- Rayleighovým rozptylem
- Mieovým rozptylem

Pohlcování světla v atmosféře různými plyny (vodní pára, ozón a kysličník uhličitý) je vysoce selektivní a ovlivňuje jen některé části spektra. Obrázek 3.3 ukazuje spektrum vně atmosféry (AM 0) a na povrchu Země (AM 1,5). Spektrum popisuje složení světla a příspěvek různých vlnových délek k celkovému záření. 7 procent z mimozemského spektra (AM 0) připadá do ultrafialového rozsahu, 47 procent do viditelného rozsahu a 46 procent zbývá na infračervený rozsah spektra. Pozemské spektrum AM (1,5) vykazuje významné ztráty způsobené pohlcením v jistých vlnových délkách různými atmosférickými plyny. Molekuly plynu s průměry menšími než je vlnová délka světla způsobí Rayleighův rozptyl. Velikost Rayleighova rozptylu vzrůstá se zmenšující se vlnovou délkou světla. Částičky prachu a další nečistoty ovzduší způsobí Mieův rozptyl. Průměr těchto složek je větší než vlnová délka světla. Mieův rozptyl významně závisí na geografické poloze, ve vysokohorských oblastech je relativně nízký, zatímco v průmyslových oblastech je obvykle vysoký. Tabulka 3.4 ukazuje příspěvky Mieova a Rayleighova rozptylu a pohlcení pro různé výšky Slunce γ_s . Přírodní vlivy, jako jsou mraky, sníh, déšť nebo mlha, můžou způsobit dodatečné ztráty. [1]



Obr. 3.3. Spektrum slunečních paprsků[2]

Pozn.: AM0 je kosmické spektrum, AM 1,5 je spektrum na zemském povrchu pro výšku Slunce nad obzorem $\gamma_s = 41,5^\circ$

Souvislost mezi γ_s a AM je vyjádřena vztahem:

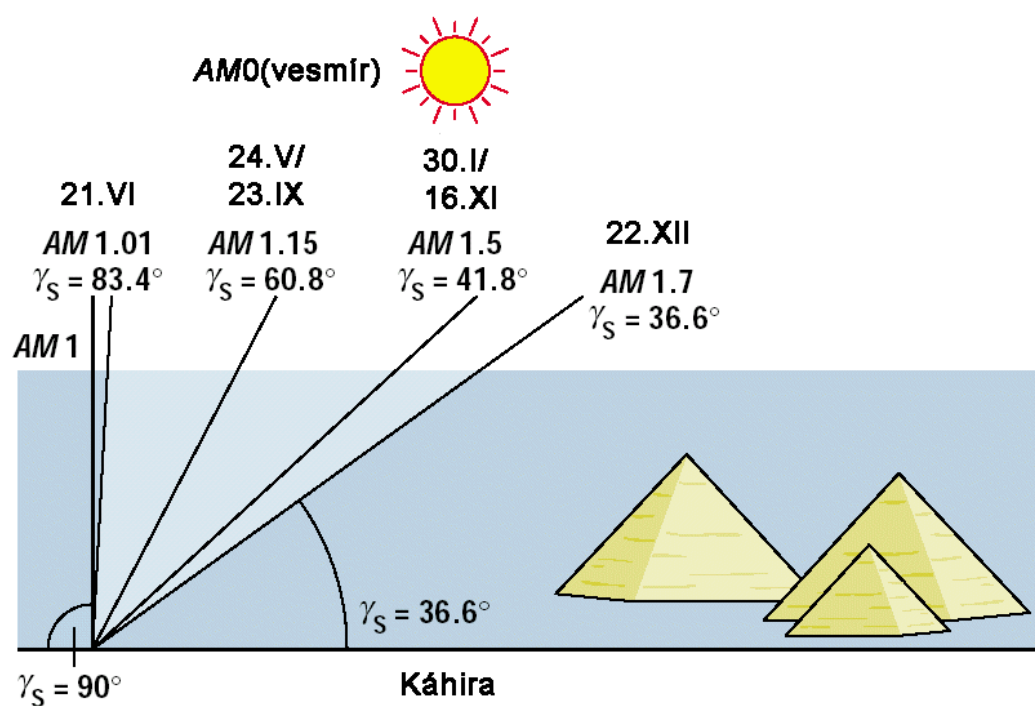
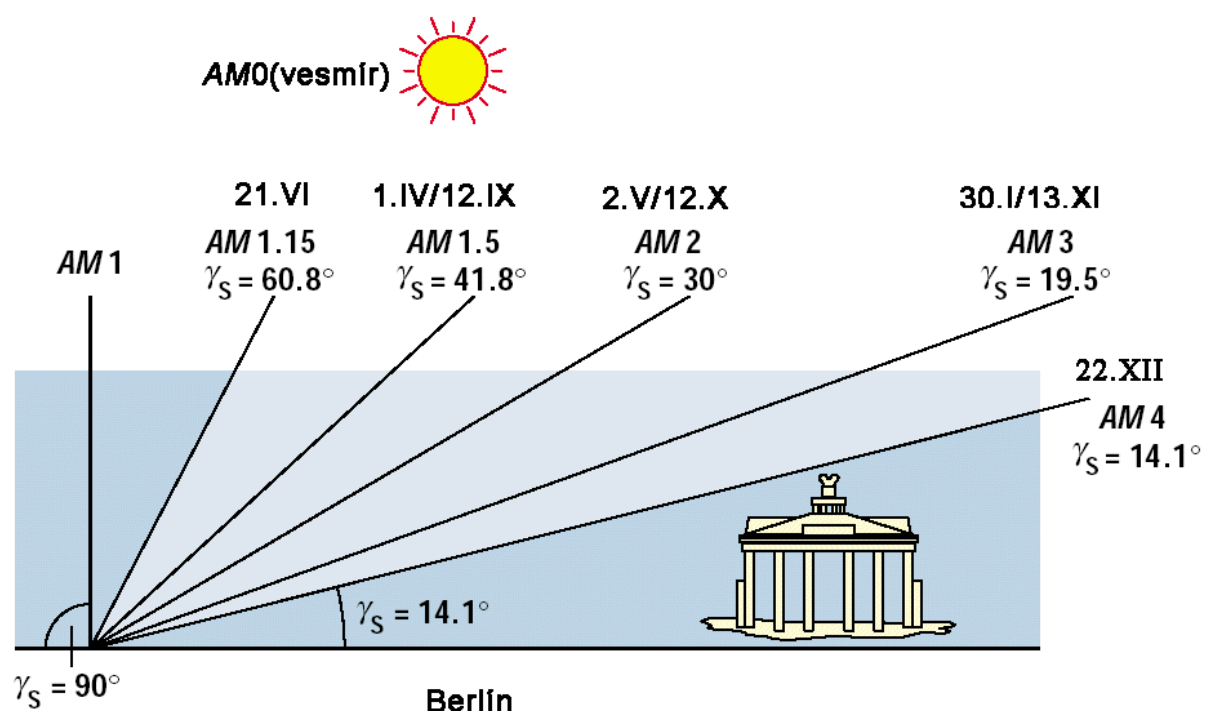
$$AM = \frac{1}{\sin \gamma_s} \quad (3.10)$$

AM je poměrná jednotka délky cesty paprsku procházejícího atmosférou. Když je Slunce ve svém nadhlavníku, je AM rovno jedné, což znamená, že světlo projde svisle skrz atmosférou. AM hodnota vně atmosféry je nula. Obrázek 3.4 ukazuje nejvyšší pozici Slunce v poledni a tomu odpovídající AM hodnoty pro různé dny roku pro Berlín a Káhiru. Výška, do které Slunce vystoupí, je závislá na ročním období a ovlivňuje záření přijaté na povrchu Země. [1]

Tab 3.4: Útlum a rozptyl paprsků v závislosti na poloze Slunce nad obzorem [1]

výška Slunce nad obzorem γ_s [°]	poměrná délka světla prostupujícího atmosférou (AM)	absorpce %	Rayleighův rozptyl %	Mieův rozptyl %	Celkový útlum %
90	1,00	8,7	9,4	0-25,6	17,3-38,5
60	1,15	9,2	10,5	0,7-29,5	19,4-42,8
30	2,00	11,2	16,3	4,1-44,9	28,8-59,1
10	5,76	16,2	31,9	15,4-74,3	51,8-85,4
5	11,50	19,5	42,5	24,6-86,5	65,1-93,8

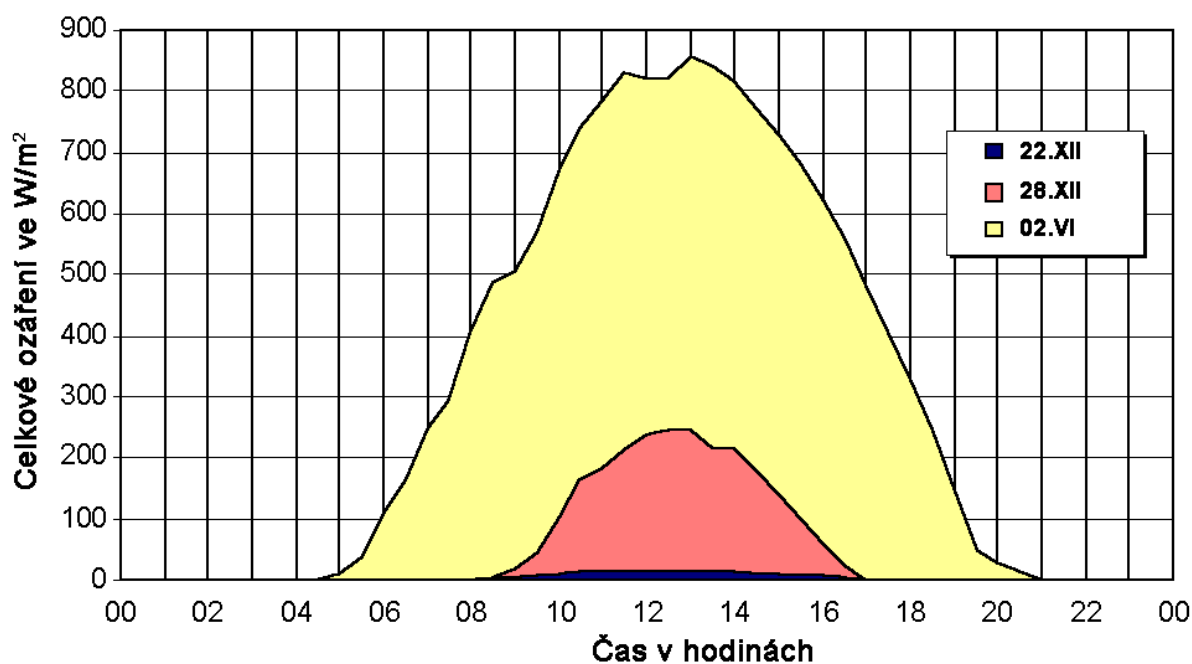
Oblačnost a počasí mají vliv na sluneční záření. Denní záření ve střední Evropě může dosáhnout hodnot nad $7,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{den})$ v létě, zatímco jednotlivé dny v zimě mohou mít méně než $0,1 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{den}$. Obrázek 3.5 ukazuje změnu záření pro bezoblačný den v létě (2. červenec) a v zimě (28. prosinec), stejně jako velmi zachmuřený den v zimě (22. prosinec) pro Karlsruhe v jižním Německu. Roční záření se mění významně po celém světě. Například v Evropě jsou velké rozdíly mezi severem a jihem. Na severu jsou rozdíly mezi létem a zimou mnohem vyšší, než na jihu. V Bergenu (Norsko $60,4^\circ \text{N}$) je poměr celkového záření (celkové záření na horizontálním povrchu na Zemi) v červnu ku celkovému záření v prosinci 40:1 zatímco v Lisabonu (Portugalsko $38,72^\circ \text{N}$) je toto procento jen 3,3:1. Centrální a severní Evropa má roční souhrn hodnot záření mezi $700 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$ a $1000 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$. V jižní Evropě toto záření může být větší než $1700 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$ a v pouštních oblastech zemského slunečního pásu (obrázek 3.5) je kolem $2500 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$. Zeměpisná šířka určuje pouze hrubý odhad sumy ročního záření, protože místní faktory mají významnější vliv na celkovou energii ze záření dopadajícího na zemský povrch. Například roční záření ve Stockholmu (Švédsko) a Berlíně (Německo) jsou téměř stejná, ačkoli zeměpisná šířka Stockholmu je o $7''$ vyšší než v Berlíně. Na druhé straně je roční záření v Londýně významně nižší, než v Berlíně který leží více na jih. Tabulka 3.5 demonstruje pohled celkových průměrných hodnot záření pro určité světové lokality za dobu jednoho měsíce, což ukazuje významné rozdíly mezi různými lokalitami. Znalost přesného záření v daném místě je důležitým požadavkem pro plánování energetických solárních systémů. Je výhodné používat odhady z již existujících databází. Některé bezplatné internetové databáze nabízejí hodnoty o měsíčním záření pro mnoho míst na světě, (například www.satellight.com a další). [1]



Obr. 3.4. Přehled úhlů γ_S a hodnot AM v poledni pro různé měsíce v roce pro Berlín a Káhiru[1]

Tab 3.5: Průměr měsíčních hodnot celkového denního přímého a difúzního záření v kWh(m²·den) [1]

Město	Bergen	Berlín	Londýn	Řím	LA	Káhira	Bombaj	Upington	Sydney
Stát	Norsko	Německo	Anglie	Itálie	USA	Egypt	Indie	JAR	Austrálie
Zem. šířka	60,40°S	52,47°S	51,52°S	41,80°S	33,93°S	30,08°S	19,12°S	28,40°J	33,95°J
leden	0,20	0,61	0,56	1,70	2,88	3,09	4,74	8,08	6,41
únor	0,72	1,14	1,10	2,54	3,97	4,00	5,56	7,45	5,57
březen	1,71	2,44	2,07	3,78	5,14	5,15	6,29	6,26	4,72
duben	3,27	3,49	3,04	4,99	6,47	6,27	6,72	5,19	3,47
květen	4,13	4,77	4,12	6,03	6,55	7,03	6,77	4,26	2,63
červen	4,85	5,44	4,99	6,59	6,57	7,56	4,99	3,72	2,38
červenec	4,15	5,26	4,38	6,86	7,38	7,34	3,84	4,04	2,52
srpen	3,49	4,58	3,62	6,16	6,85	6,76	3,86	4,95	3,47
září	1,86	3,05	2,71	4,69	5,26	5,87	4,65	6,09	4,66
říjen	0,94	1,59	1,56	3,29	4,24	4,69	5,11	7,21	5,63
listopad	0,30	0,76	0,81	2,02	3,22	3,45	4,73	8,27	6,40
prosinec	0,12	0,45	0,47	1,51	2,72	2,86	4,46	8,49	6,69
Průměr	2,15	2,81	2,46	4,19	5,10	5,34	5,14	6,17	4,55



Obr. 3.5. Celkové záření přes den v Karlsruhe (Německo) pro 2.6; 22 a 28.12.1991[1]

Počítačové programy jako program meteonorm mohou být využívány pro interpolaci meteorologických parametrů daného místa založeného na měřeních uskutečněných v lokalitách blízko u navrhovaného místa. Roční záření na Sahaře je asi 2350 kWh/(m²·rok). Celkové roční záření přijaté povrchem Sahary (okolo 8,7 milion km²) je téměř 200 krát vyšší než primární celosvětové roční energetické požadavky. V podstatě by primární spotřeba energie mohla být pokryta využitím sluneční energie přijaté na plochu Sahary (48,500 km²), což je oblast mírně větší než Švýcarsko nebo jedna devítina Kalifornie. Tato čísla zřetelně ukazují, že je možné celkové globální požadavky na spotřebu energie pokrýt výhradně sluneční energií. [1]

3.2 Záření na vodorovnou rovinu

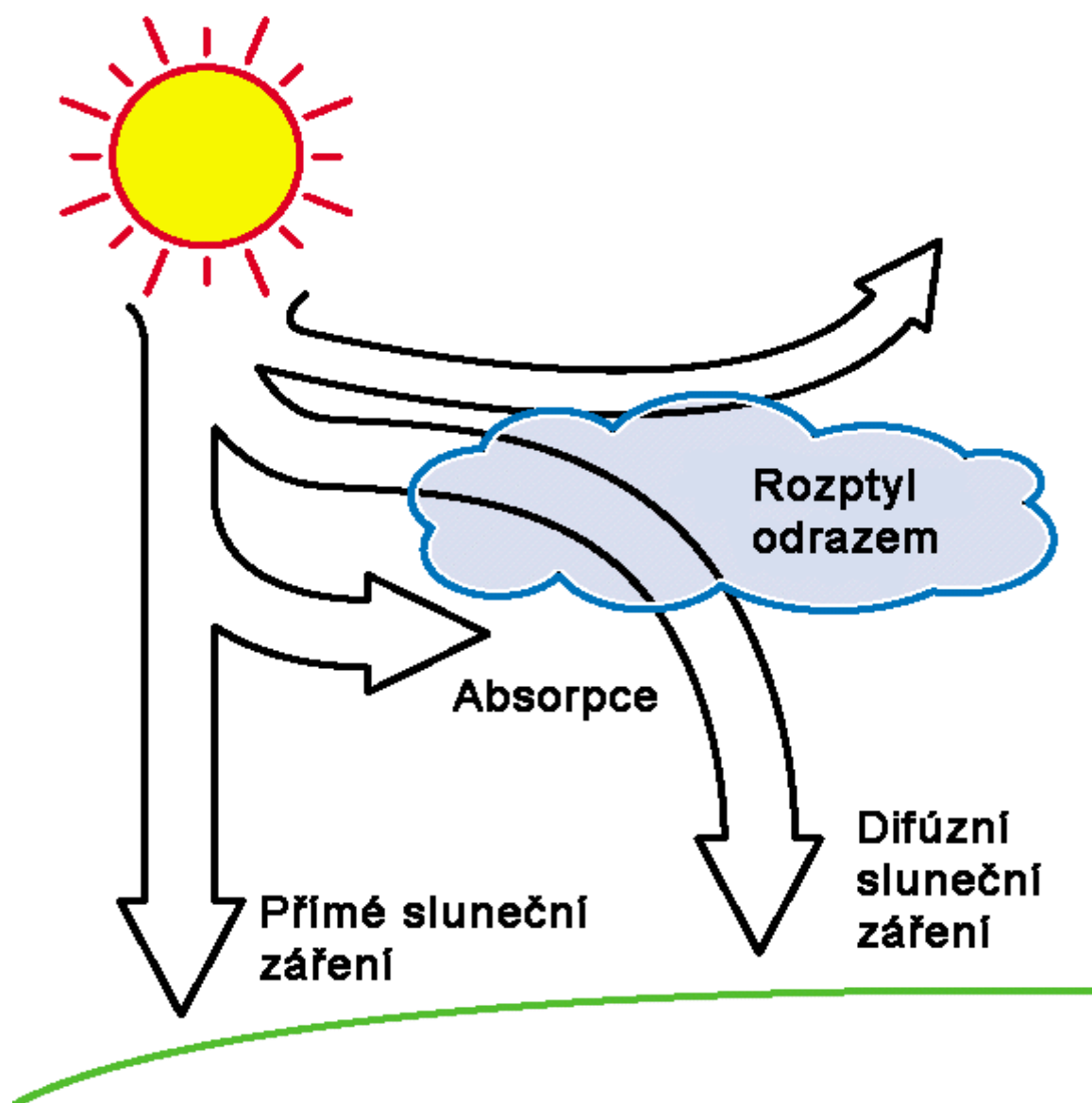
Jak je popsáno výše, sluneční záření se při průchodu atmosférou rozptyluje nebo odráží. Paprsky mimozemského slunečního světla jsou prakticky paralelní, kdežto pozemské sluneční světlo se skládá z přímé a difúzní složky (viz obrázek 3.6). Přímé sluneční záření přicházející rovnou ze Slunce, vytváří za překážkami stíny, protože je směrově orientované, kdežto difúzní záření nemá žádný definovaný směr. Celkové záření na horizontálním povrchu Země se nazývá globální záření $E_{G,hor}$. Je to suma přímého záření $E_{dir,hor}$ a difúzního záření $E_{diff,hor}$ na horizontálním povrchu: [1]

$$E_{G,hor} = E_{dir,hor} + E_{diff,hor} \quad (3.11)$$

Tabulka 3.6 ukazuje měsíční průměr denního přímého a difúzního záření v Berlíně a Káhiře. V Berlíně převládá difúzní záření, zatímco přímé záření je mnohem vyšší v Káhiře, dokonce i v zimě. Roční difúzní záření nemusí mezi lokalitami velmi kolísat navzdory vysokým rozdílům mezi ročním celkovým zářením (viz tabulka 3.7).

Tab 3.6: Průměr měsíčních hodnot denního přímého a difúzního záření v Berlíně a Káhiře v kWh(m²·den) [1]

	záření/měsíc	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec
Berlín	přímé	0,17	0,40	1,03	1,42	2,13	2,58	2,29
	difúzní	0,44	0,74	1,41	2,07	2,64	2,86	2,97
Káhira	přímé	1,74	2,37	3,07	3,78	4,56	5,16	4,93
	difúzní	1,35	1,63	2,08	2,49	2,47	2,40	2,41
	záření/měsíc	srpen	září	říjen	listopad	prosinec	průměr	
Berlín	přímé	2,05	1,38	0,54	0,22	0,10	1,20	
	difúzní	2,53	1,67	1,05	0,54	0,35	1,61	
Káhira	přímé	4,57	3,86	3,07	1,96	1,58	3,39	
	difúzní	2,19	2,01	1,62	1,49	1,28	1,95	



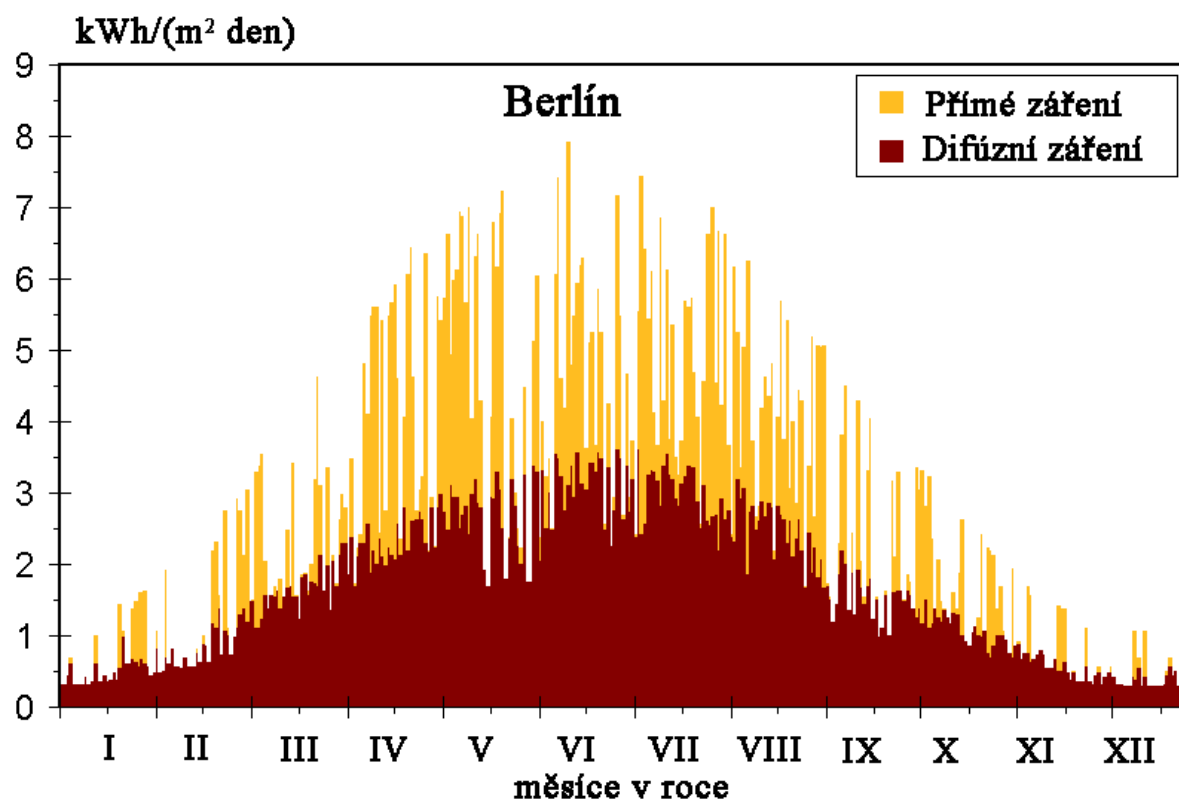
Obr. 3.6. Cesta paprsků procházejících atmosférou[1]

Tab 3.7: Roční průměr denního přímého a difúzního záření v kWh(m² · den) [1]

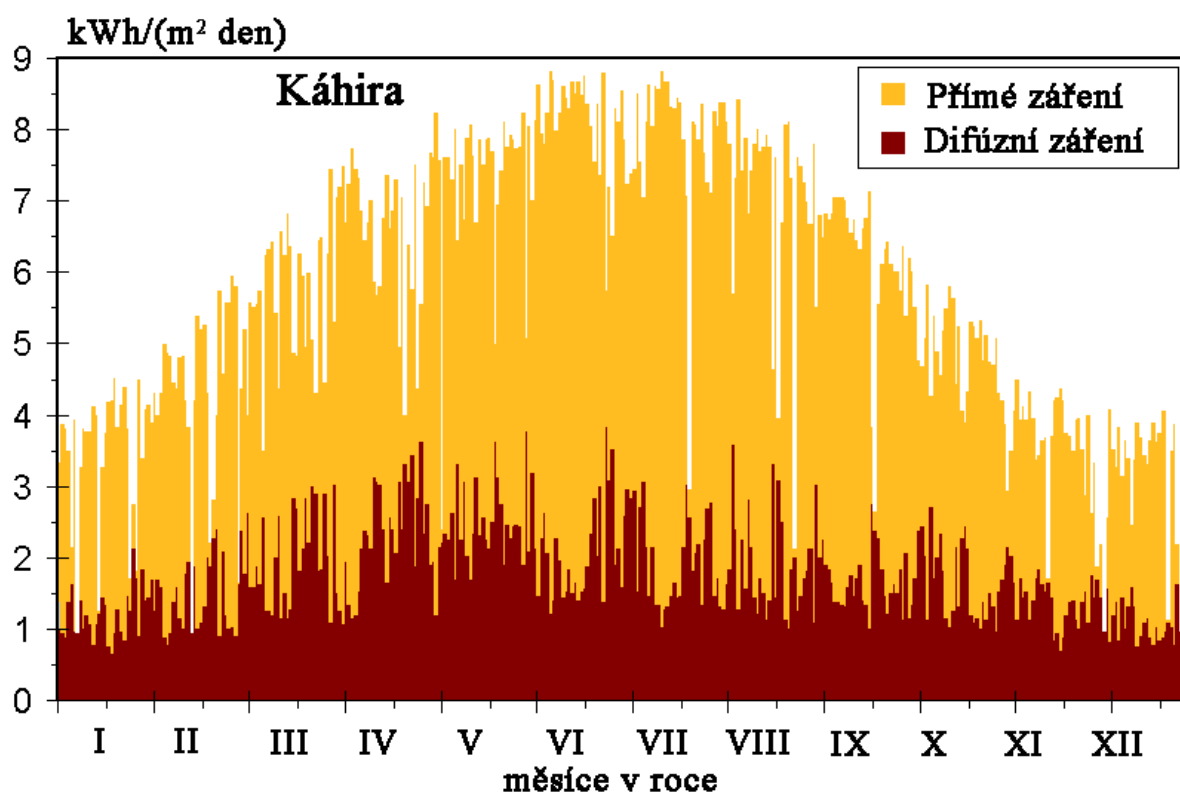
Město	Bergen	Berlín	Londýn	Řím	LA	Káhira	Bombaj	Uppington	Sydney
přímé	0,86	1,20	0,99	2,41	3,03	3,39	2,75	4,70	2,42
difúzní	1,29	1,61	1,47	1,78	2,07	1,95	2,39	1,47	2,13

Upington v jižní Africe a Londýn mají stejné roční množství difúzního záření, třebaže roční celkové záření v Upingtonu je dvakrát větší než to v Londýně. Regiony s vysokým znečištěním ovzduší nebo tropické regiony mají významně zvýšený příspěvek difúzního záření. Rozdíly mezi ročním přímým zářením jsou mnohem vyšší. Například roční přímé záření v Upingtonu je skoro pětikrát vyšší než v Londýně.

Dny s nízkým globálním zářením mají vysoké procento difúzního záření, blíží se někdy ke 100 procentům, takže příspěvek difúzního záření se snižuje na méně než dvacet procent ve dnech s velmi vysokými hodnotami celkového záření. Obrázek 3.7 ukazuje střídání přímého a difúzního záření během jednoho roku v Berlíně, který je místo s relativně nízkým ročním zářením. Obrázek 3.8 ukazuje hodnoty záření v Káhiře, která je místo s relativně vysokým ročním zářením. Zde jsou průkazné rozdíly mezi těmito lokalitami. V Berlíně je přes rok střídání jak přímého, tak difúzního záření mnohem častější než v Káhiře. [1]



Obr. 3.7. Denní záření přímé a difúzní v Berlíně[1]



Obr. 3.8. Denní záření přímé a difúzní v Káhiře[1]

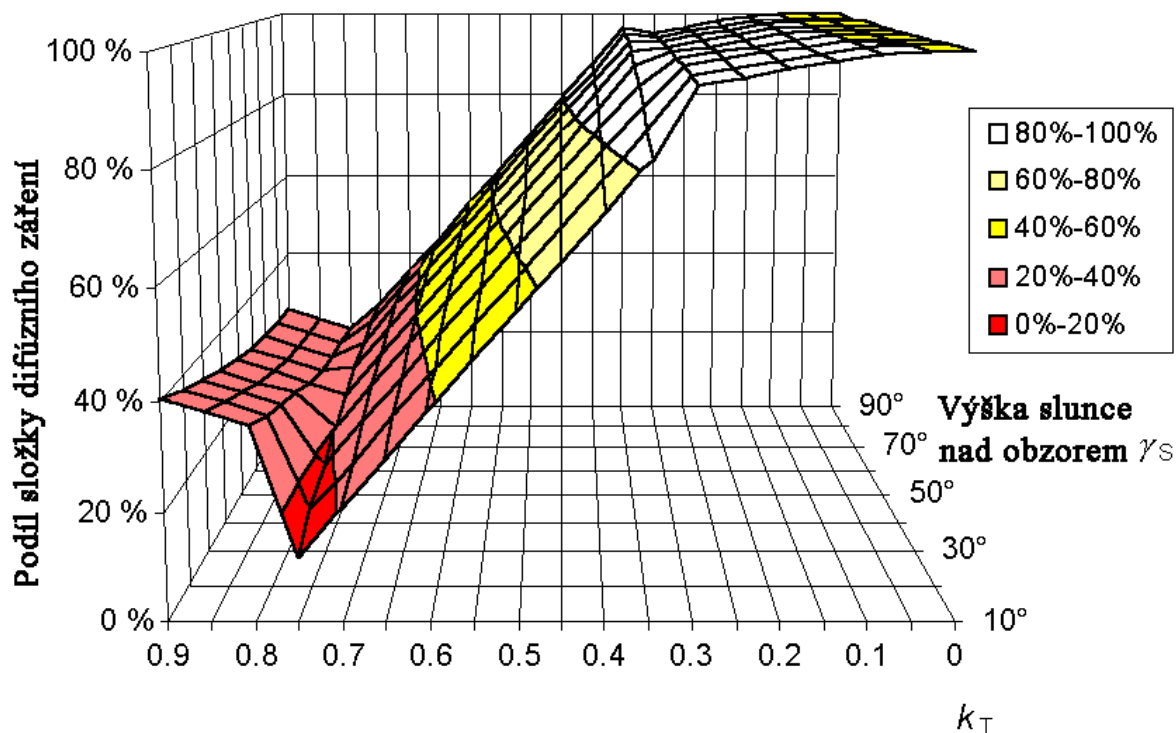
Mnoho meteorologických stanic měří jen celkové záření. Ale většina kalkulací pro solární energetické systémy potřebuje tyto složky rozdělit na přímé a difúzní záření. Empirické funkce nalezeny statistickými šetřeními mohou rozdělit celkové záření do přímého a difúzního záření, např. (Reindl et al, 1989). Hodinové hodnoty celkového záření $E_{G,hor}$ mimozemské záření E_0 a výška Slunce γ_s (se kterými se počítá v následující části) definuje koeficient k_T tímto způsobem:

$$k_T = \frac{E_{G,hor}}{E_0 \cdot \sin \gamma_s} \quad (3.12)$$

S tímto koeficientem může být vypočteno difúzní záření $E_{diff,hor}$ s použitím celkového záření $E_{G,hor}$ a výšky Slunce nad obzorem γ_s :

$$\begin{aligned} E_{diff,hor} &= E_{G,hor} \cdot (1,020 + 0,254 \cdot k_T + 0,0123 \cdot \sin \gamma_s) && \text{pro } k_T \leq 0,3 \\ E_{diff,hor} &= E_{G,hor} \cdot (1,400 - 1,749 \cdot k_T + 0,177 \cdot \sin \gamma_s) && \text{pro } 0,3 < k_T < 0,78 \\ E_{diff,hor} &= E_{G,hor} \cdot (0,486 \cdot k_T - 0,182 \cdot \sin \gamma_s) && \text{pro } \geq 0,78 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Obrázek 3.9 ukazuje tuto korelaci graficky. Je zřejmé, že difúzní složka záření je velmi nízká za jasných dnů, kdy jsou globální hodnoty záření vysoké ($k_T \rightarrow 1$), ale i tak je difúzní složka záření zřídka pod 20 procent. Jestliže je velmi zamračený den a celkové záření je nízké ($k_T \rightarrow 0$), difúzní složka záření může dosáhnout 100 procent. Následující část popisuje metody jak počítat solární úhel, nebo-li výšku Slunce γ_s . [1]



Obr. 3.9. Denní záření přímé a difúzní v Káhiře[1]

Koeficient propustnosti atmosféry (závisí na jejím „zašpinění“) se většinou pohybuje mezi hodnotami 0,7 až 0,9 pro slunný den. [4]

4 VÝPOČET POZICE SLUNCE

Pozice Slunce je podstatná pro mnohé další kalkulace pro solární energetické systémy. Dva úhly výška Slunce (úhlová výška nebo výška Slunce nad obzorem) γ_s a solární nebo-li sluneční azimut α_s definují pozici Slunce. Konvence pro tyto úhly a symboly se různí dle použité literatury. Konvence, použité v této práci, definují výšku Slunce jako úhel mezi středem Slunce a obzorem viděným pozorovatelem. Azimutální úhel Slunce popisuje úhel mezi zeměpisným severem a kolmým průmětem obíhající kružnice ze středu Slunce. EN ISO 9488 definuje sluneční azimut jak úhel mezi pravděpodobným postavením Slunce a jihu měřeného ve směru hodinových ručiček na severní polokouli a mezi pravděpodobným postavením Slunce a severu měřeného proti směru hodinových ručiček na jižní polokouli (CEN 1999). Toto může způsobit zmatek při porovnání kalkulací s různými definicemi úhlů. Tabulka 4.8 ukazuje rozdílné sluneční azimuty různých zdrojů. Výška Slunce a sluneční azimut závisí na zeměpisných umístěních pozorovatele, datu, času a časovém pásmu. Pozice Slunce je silně ovlivňována úhlem mezi plochou procházející světovým rovníkem a rotační plochou Země kolem Slunce a tento úhel nazýváme solární deklinací. Ta kolísá během roku mezi $+23^{\circ}26.45'$ a $-23^{\circ}26.45'$. Jelikož oběžná dráha Země kolem Slunce není kruhová, mění se délka světelného dne po celý rok. Toto obvykle bere v úvahu, tzv. časová rovnice eqt (equation of time). Na výpočet pozice Slunce bylo vyvinuto mnoho algoritmů. [1]

Tab 4.8: Různé definice solárních úhlů [1]

Reference	Symbol	S	SV	V	JV	J	JZ	Z	SZ
NREL,2000	γ	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
CEN 1999 pro $\varphi > 0^a$	γ	180°	225°	270°	315°	0°	45°	90°	135°
CEN 1999 pro $\varphi < 0^b$	γ	0°	315°	270°	225°	180°	135°	90°	45°
DIN 1985	α_s	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°

Pozn.: φ zeměpisná šířka; a severně od rovníku; b jižně od rovníku

4.1 Algoritmus DIN,1985

Relativně jednoduchý algoritmus (DIN, 1985) je popisovaný takto:

Denní úhel: $v^{\circ} = 360^{\circ} \cdot \frac{\text{den v roce}}{\text{počet dnů v roce}}$

Vypočítá se solární deklinace:

$$\delta(v^{\circ}) = \{0,3948 - 23,2559 \cdot \cos(v^{\circ} + 9,1^{\circ}) - 0,3915 \cdot \cos(2 \cdot v^{\circ} + 5,4^{\circ}) - 0,1764 \cdot \cos(3 \cdot v^{\circ} + 26,0^{\circ})\}^{\circ} \quad (4.14)$$

Rovnice času eqt

$$eqt(v^{\circ}) = [0,0066 + 7,3525 \cdot \cos(v^{\circ} + 85,9^{\circ}) + 9,9359 \cdot \cos(2 \cdot v^{\circ} + 108,9^{\circ}) + 0,3387 \cdot \cos(3 \cdot v^{\circ} + 105,2^{\circ})] \text{ min} \quad (4.15)$$

Dále se počítá s lokálním časem, (časem na nultém poledníku v Greenwichi (GMT=0), centrálním evropským časem CET= 1h, pacifickým standardním časem PST = -8h) a zeměpisnou délkou λ se hlavní lokální čas MLT vyjádří:

$$\text{MLT} = \text{lokální čas} - \text{časové pásmo} + 4\lambda / 60 \quad (4.16)$$

Přidáním rovnice času eqt se obdrží výraz pro solární čas:

$$\text{Solární čas} = \text{MLT} + eqt / 60 \quad (4.17)$$

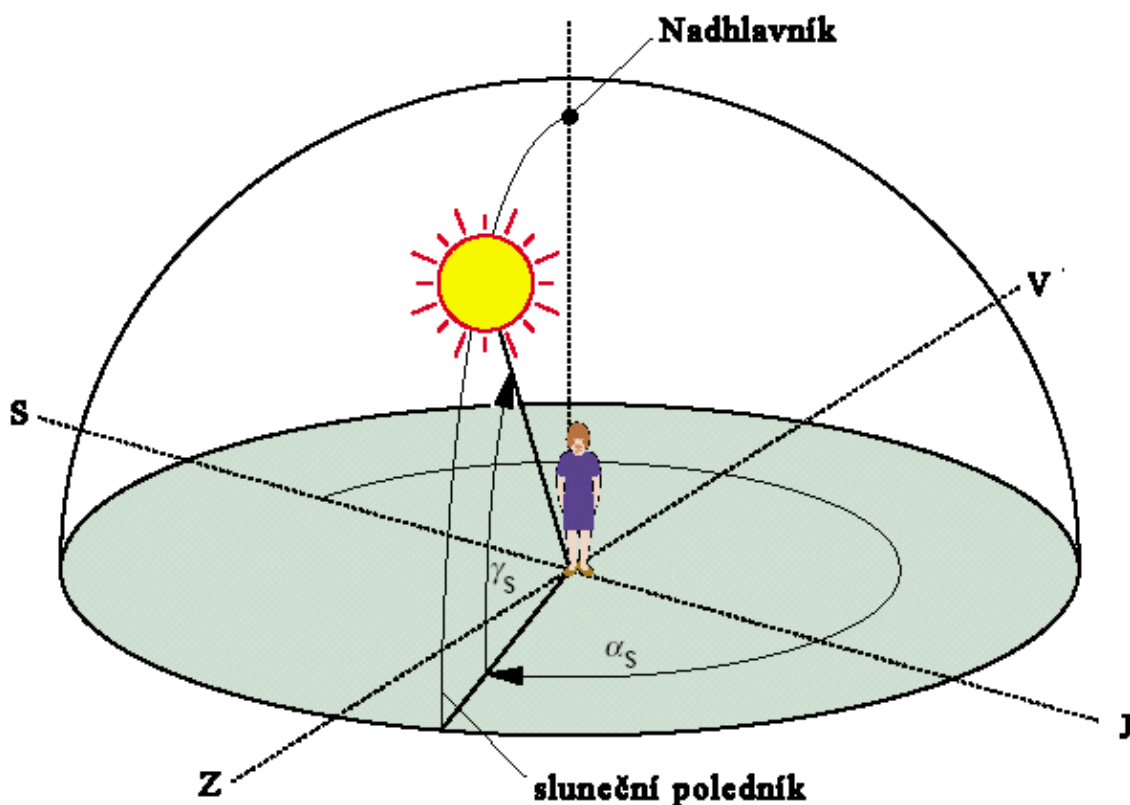
Se zeměpisnou šířkou φ daného místa a hodinovým úhlem ω :

$$\omega = (12:00h - \text{solární čas}) \cdot 15^{\circ} / h \quad (4.18)$$

dostaneme hledané úhly Slunce nad obzorem γ_s a solární azimut α_s :

$$\gamma_s = \arcsin(\cos \omega \cdot \cos \varphi \cdot \cos \delta + \sin \varphi \cdot \sin \delta) \quad (4.19)$$

$$\alpha_s = \begin{cases} 180^{\circ} - \arccos \frac{(\sin \gamma_s \cdot \sin \varphi - \sin \delta)}{\cos \gamma_s \cdot \cos \varphi} & \text{pokud je solární čas} \leq 12:00h \\ 180^{\circ} + \arccos \frac{(\sin \gamma_s \cdot \sin \varphi - \sin \delta)}{\cos \gamma_s \cdot \cos \varphi} & \text{pokud je solární čas} \geq 12:00h \end{cases} \quad (4.20)$$



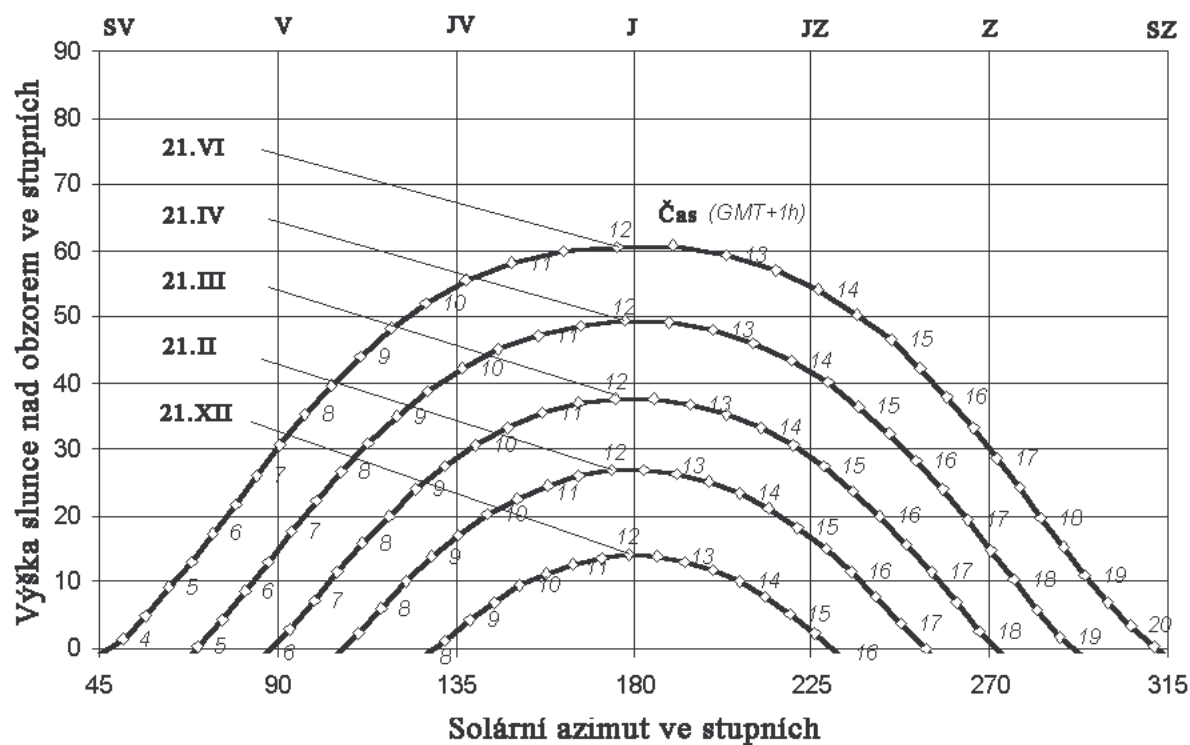
Obr. 4.10. Definice úhlů α_s a γ_s popisujících pozici Slunce[1]

Tabulka 4.9 je přehledkou úhlů zeměpisné šířky a délky pro vybrané lokality. Další algoritmy např. SUNAE algoritmus (Walraven, 1978; Wilkinson, 1981; Kambezidis a Papanikolaou, 1990) nebo NREL SOLPOS algoritmus (NREL, 2000) zlepšily přesnosti hlavně v nízkých slunečných nadmořských výškách. Navíc tyto algoritmy zahrnují lom paprsku průchodem atmosférou. [1]

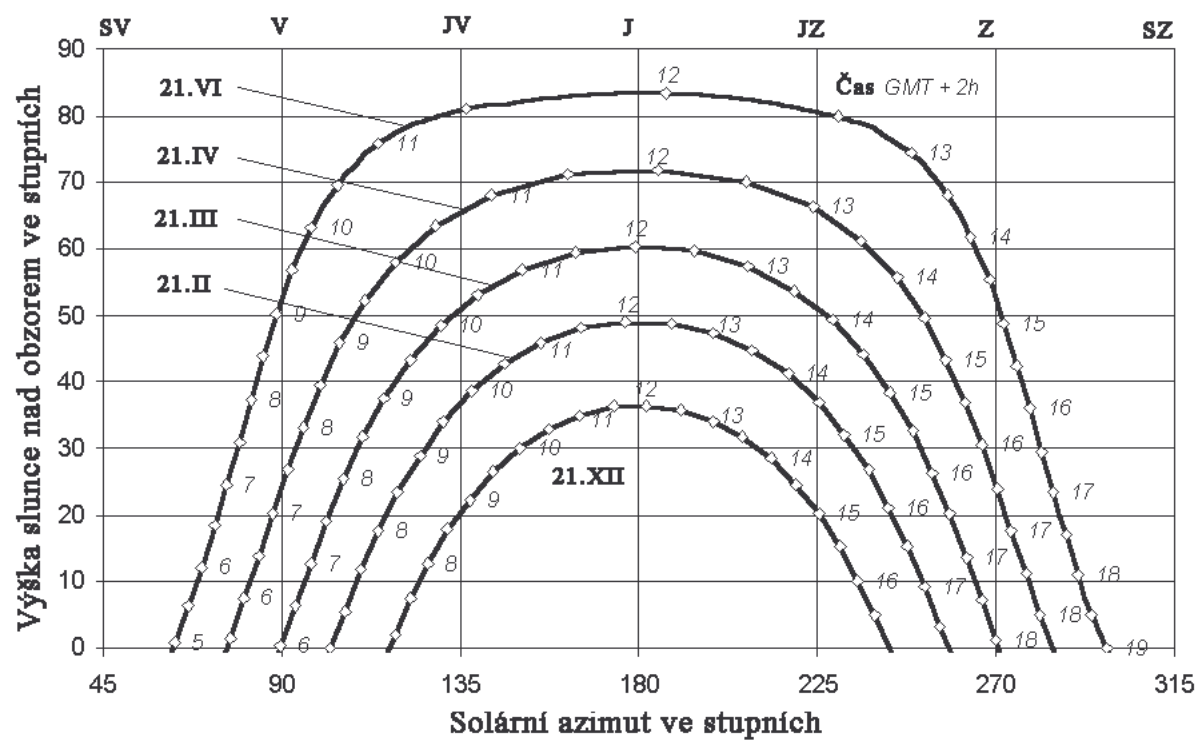
Tab 4.9: Zeměpisná šířka φ a délka λ ve vybraných lokalitách [1]

Město	Bergen	Berlin	Londýn	Řím	LA	Káhira	Bombaj	Uppington	Sydney
φ	60,40°	52,47°	51,52°	41,80°	33,93°	30,08°	19,12°	-28,40°	-33,95°
λ	5,32°	13,30°	-0,11°	12,58°	118,40°	31,28°	72,85°	21,27°	151,18°

Následující obrázky ukazují výšku Slunce a sluneční azimut pro každou hodinu vybraných dnů s křivkou taženou skrz body. Obrázek 4.11 ukazuje schéma slunečních pozic Berlína a obrázek 4.12 Káhiry.



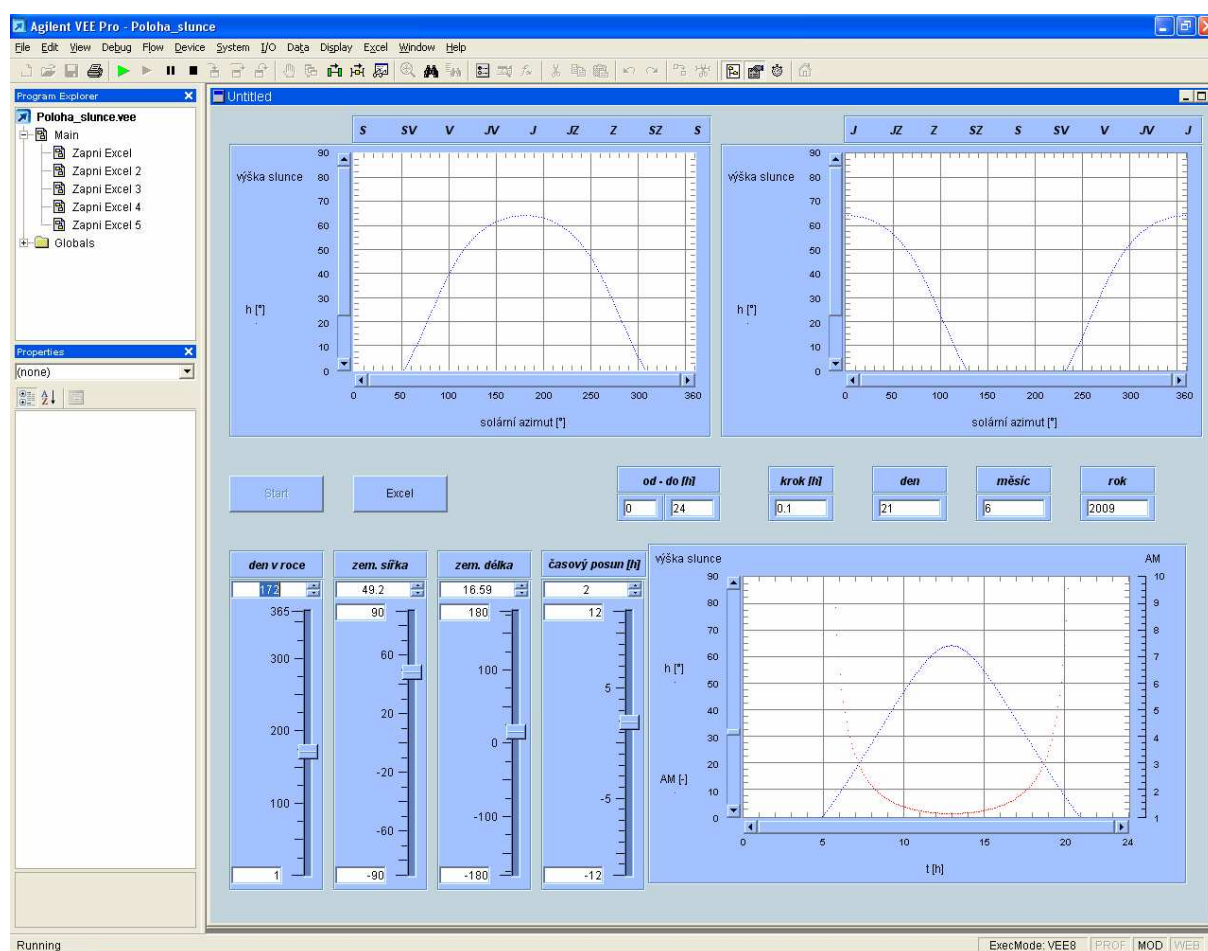
Obr. 4.11. Úhly solárního azimutu α_s a výšky Slunce γ_s popisující pozici Slunce v Berlíně[1]



Obr. 4.12. Úhly solárního azimutu α_s a výšky Slunce γ_s popisující pozici Slunce v Káhiře[1]

4.2 Simulace polohy Slunce

Pohled na uživatelský panel souboru Poloha_slunce.vee v simulačním prostředí Agilent VEE Pro, kde je pro tento konkrétní případ simulována poloha Slunce pro den 21.6.2009 a místo 49°11'53" severní šířky a 16°35'32" východní délky (Brno, Údolní 53). Pro další simulace budou tyto zeměpisné souřadnice uváděny ve formátu GPS s převodem na stupně s přesností dvou desetinných míst takto: [49,20N;16,59E].

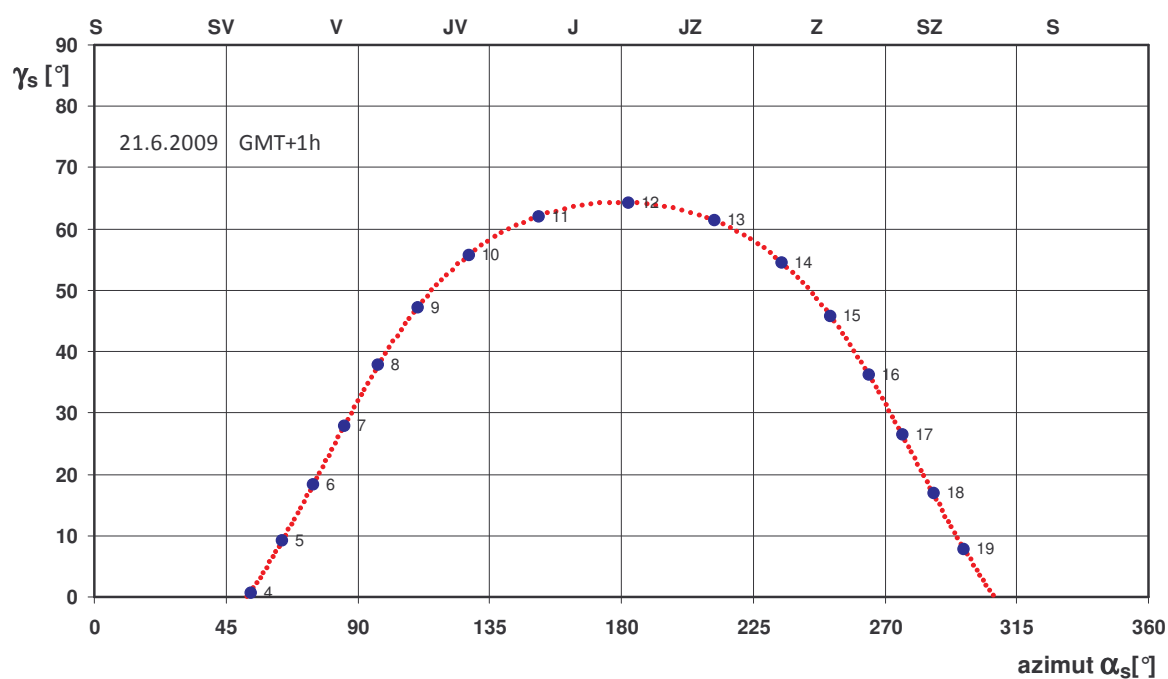


Obr. 4.13. Pohled na uživatelský panel Agilent VEE Pro

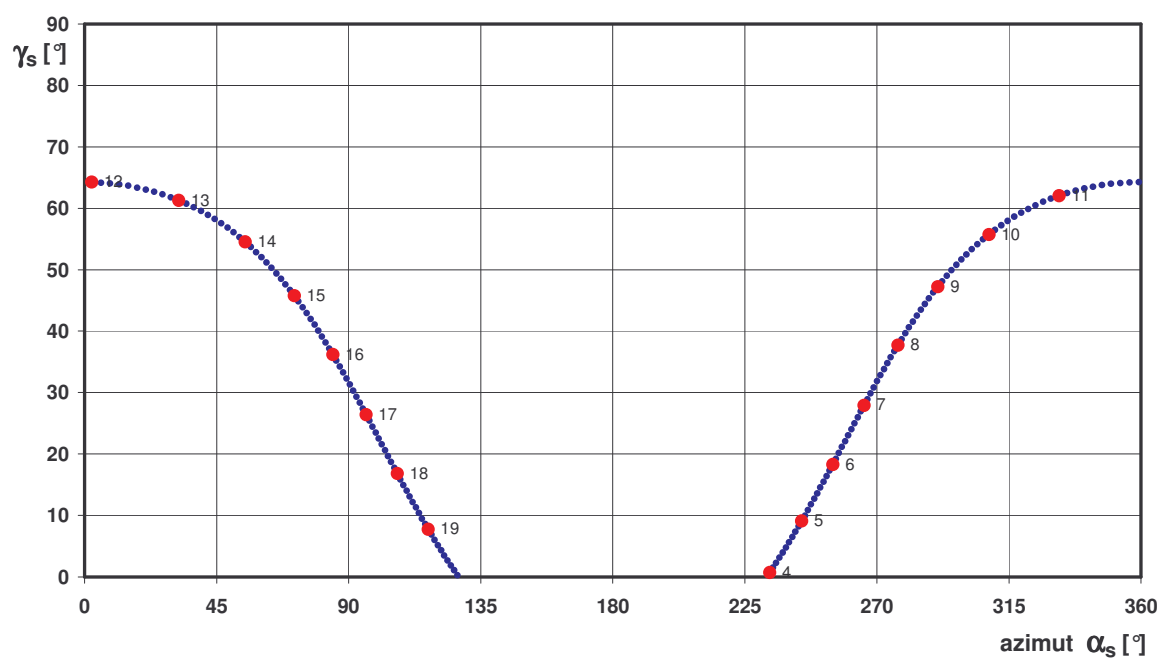
Uživatelský panel obsahuje vstupní data, kterými jsou den, měsíc a rok, zeměpisná šířka a délka, časový úsek dne a krok se kterým je výpočet v tomto úseku generován. Krok 0,1 znamená, že za časový interval 24 hodin je vygenerováno 240 hodnot do grafu a poloha Slunce je tímto krokem simulována každých 6 minut. Pro účel polohování solárních panelů jsou záporné hodnoty výšky Slunce (Slunce je pod obzorem pozorovatele) irelevantní, a proto může být tento interval uživatelem vhodně zkrácen.

Tlačítko “Start” spustí naprogramovaný algoritmus DIN, 1985. Jádrem tohoto výpočtu je cyklus, který sleduje, zda nebyly uživatelem provedeny změny ve vstupních proměnných, pokud ano, ihned přepočte výstupní data, která se po změně aktualizují do 3 grafů v uživatelském panelu a po stisknutí tlačítka “Excel” lze provést export dat až pro 5 různých dnů do tabulkového procesoru Microsoft Excel a tyto následně dále zpracovávat. Pro tento účel je určen přednastavený soubor slunce.xls, který je nutno v počítači nainstalovat do kořenového adresáře C:\\slunce.xls. Po každém stisku tlačítka “Excel” se po řadě plní jednotlivé listy a vykreslují grafy, které budou dále následně podrobněji popsány.

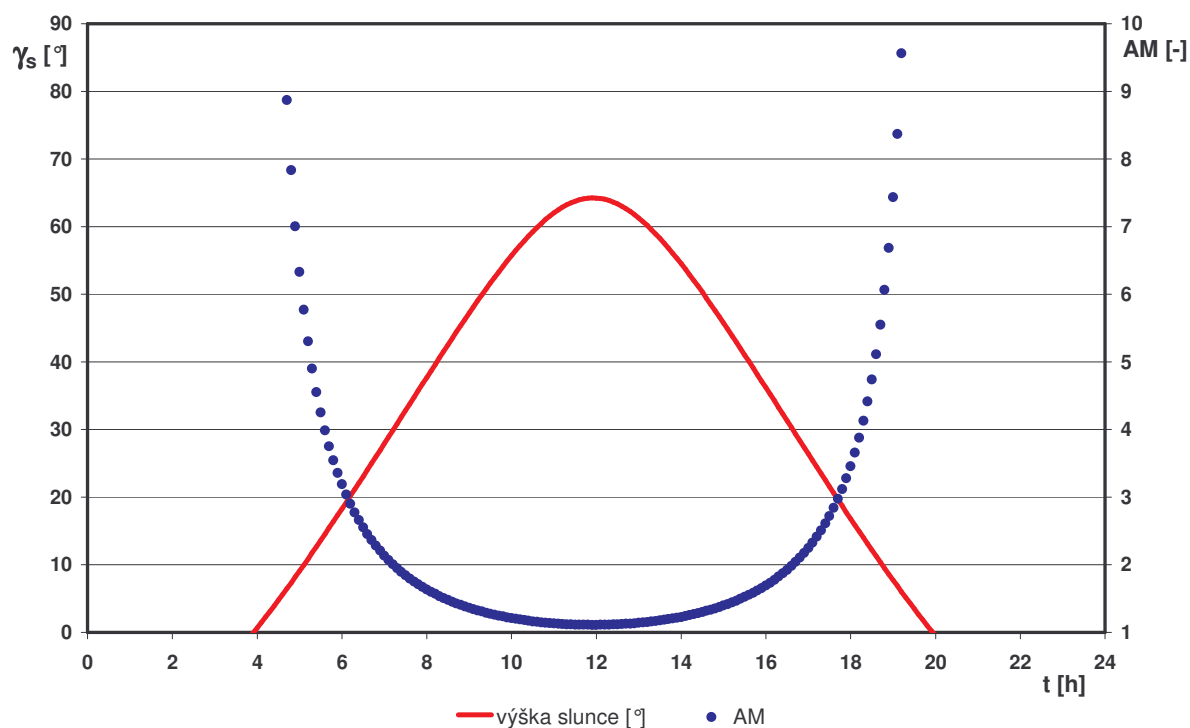
V horním řádku uživatelského panelu jsou vedle sebe dva grafy, které zobrazují výšku Slunce nad obzorem v závislosti na solárním azimutu. Levý graf, v jehož středu leží jižní zeměpisný směr, je vhodnější pro zobrazení trajektorie Slunce na severní polokouli od zeměpisných šířek nad obratníkem raka, tedy v intervalu $< 23,45^\circ, 90^\circ$ severní šířky. Pravý graf, který je posunutý o 180° aby jeho střed zobrazoval severní zeměpisný směr, je vhodný pro zobrazení simulací na jižní části polokoule v intervalu $< 23,45^\circ, 90^\circ$ jižní šířky. Mezi obratníky kozoroha a raka nastáva zenit dvakrát do roka, a proto v těchto simulovaných šířkách v pásmu $< -23,45^\circ, 23,45^\circ$ s výhodou využijeme obou grafů. V tomto pásmu se trajektorie Slunce po obloze po část roku odklání od nadhlavníku jedním směrem (např. severním) až do dne, kdy Slunce dosáhne svého zenitu, po kterém se překlápí do opačného směru (jižního). Spodní graf zobrazuje výšku Slunce γ_s a hodnotu AM v závislosti na čase. Hodnota $AM = 1$ pro $\gamma_s = 90^\circ$ a pro jiné úhly γ_s nabývá větších hodnot a jde teoreticky do nekonečna viz rovnice (3.10). Pro praktické účely a vhodné srovnání je dostačující zobrazovat hodnotu AM v grafu pouze do hodnoty 10, při které je výška Slunce $\gamma_s = 5^\circ 44'$. Nižší hodnoty výšky Slunce mají jen velmi malý výkon, a proto je lze považovat za irelevantní.



Obr. 4.14. Pohled na levý horní panel simulace pro Brno [49,20;16,59E]

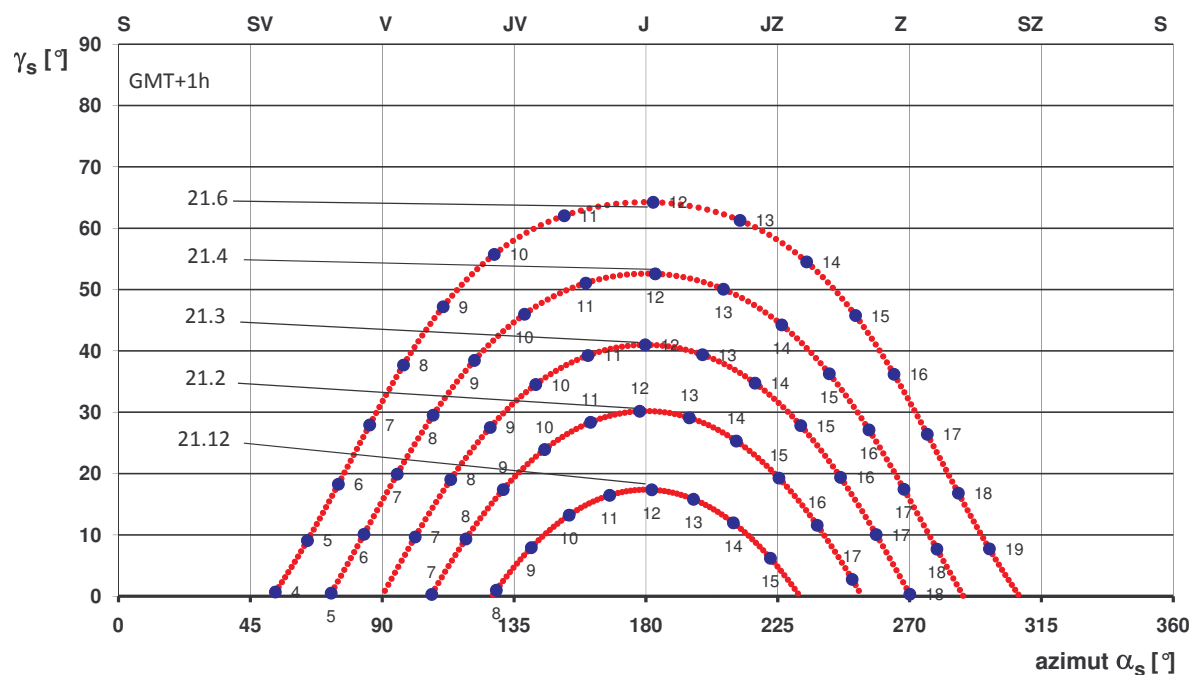


Obr. 4.15. Pohled na pravý horní panel simulace pro Brno [49,20N;16,59E]



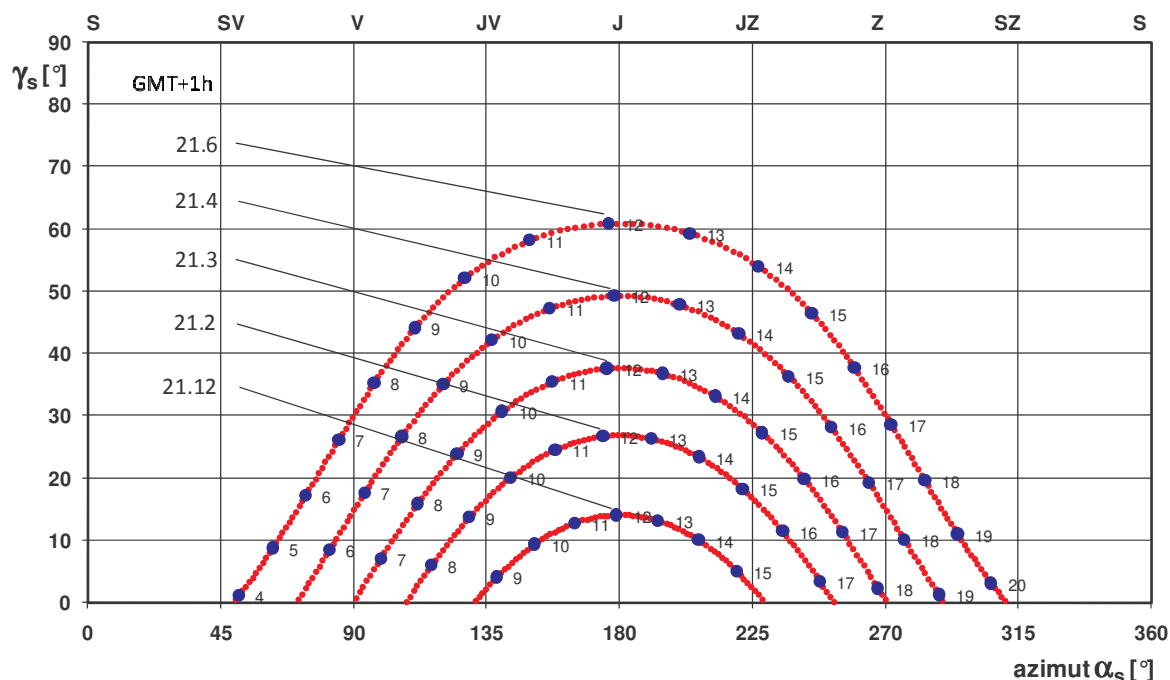
Obr. 4.16. Pohled na dolní panel simulace pro Brno [49,20N;16,59E]

Obrázek 4.17 poskytuje představu o změně výšky Slunce γ_s během roku pro Brno.

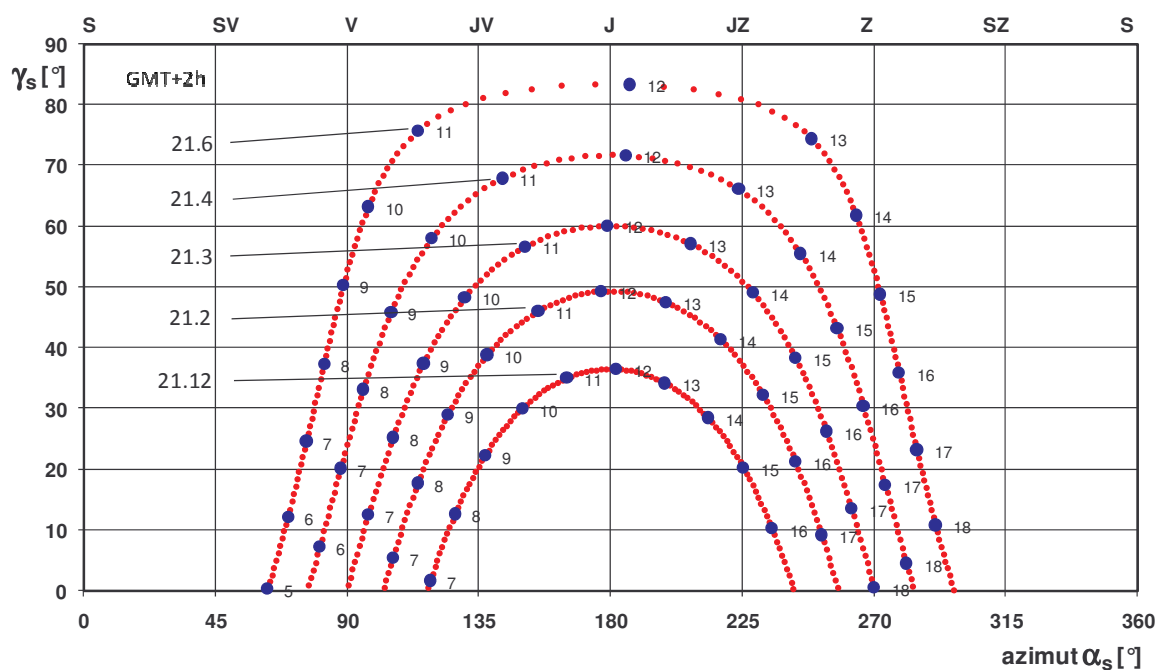


Obr. 4.17. Simulace různých měsíců pro Brno [49,20N;16,59E]

Následující grafy budou ukázkou flexibility vytvořeného programu a přehledkou dosažených výsledků simulací pro různá místa na zeměkouli. Srovnáním obrázků 4.11 a 4.12, převzatých z literatury, s obrázky 4.18 a 4.19, generovanými programem, je patrná shoda.

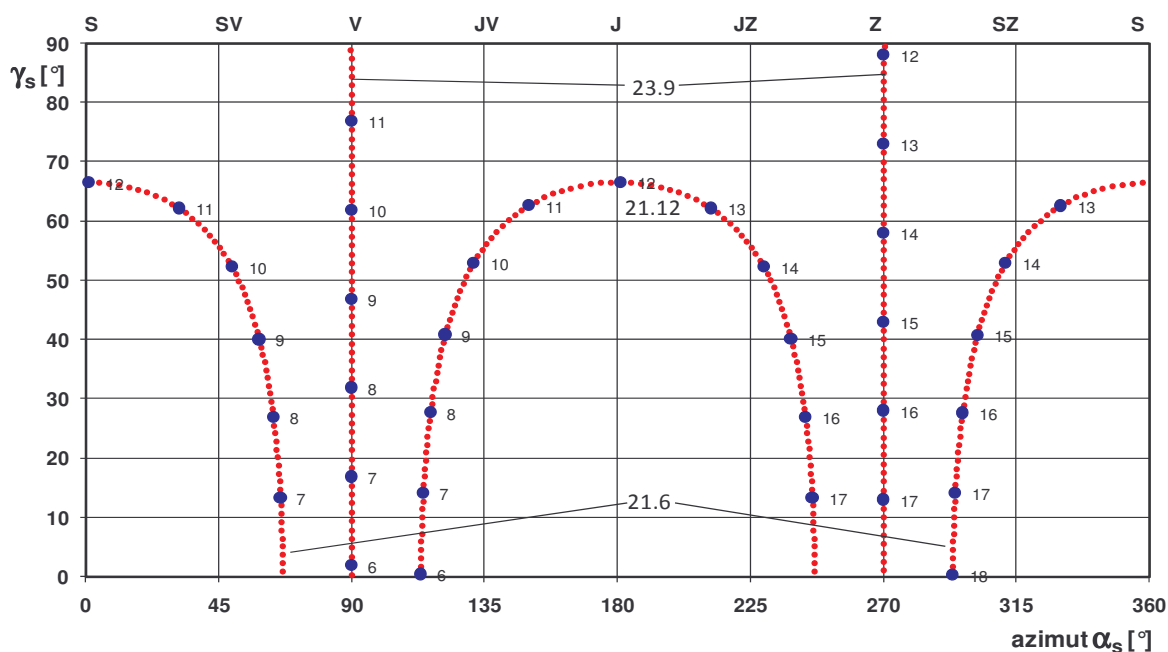


Obr. 4.18. Simulace různých měsíců pro Berlín [52,50N;13,40E]

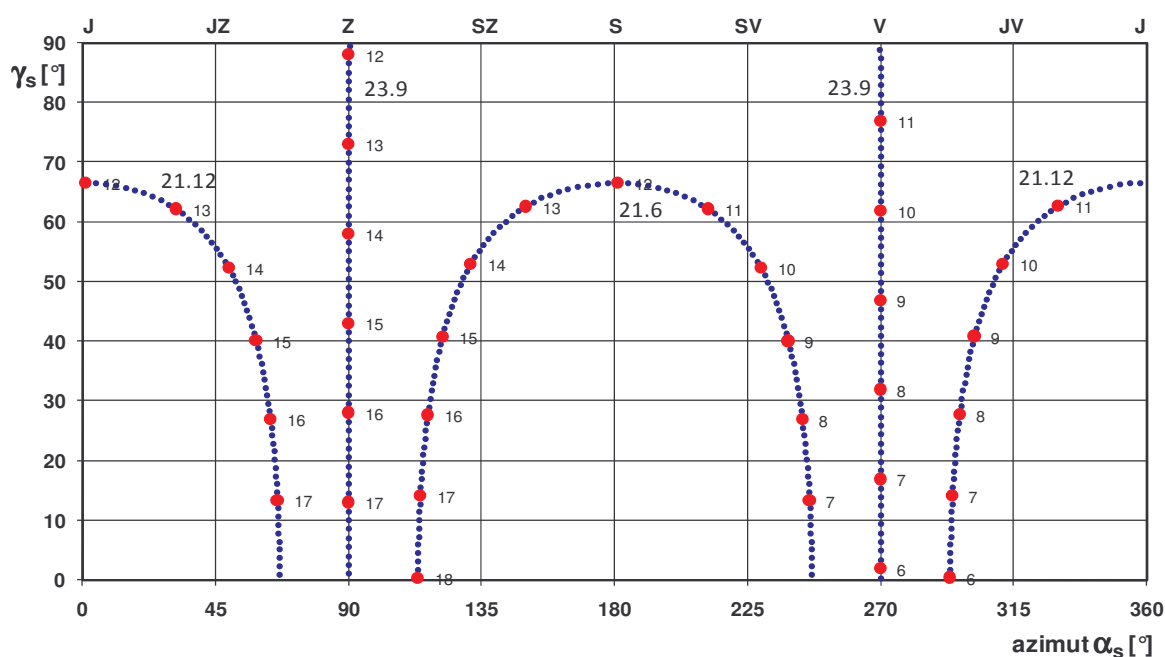


Obr. 4.19. Simulace různých měsíců pro Káhiru [30,06N;31,26E]

Na obrázku 4.20 je zobrazena simulace na levém panelu pro rovník 23.9, kdy Slunce vychází přesně na východě, prudce stoupá po obloze až dosahuje zenitu. Poté prudce klesá přesně na západ, přičemž se neodchyluje na žádný jiný zeměpisný směr. Dále jsou zobrazeny oba slunovraty letní 21.6 a zimní 21.12, tedy polohy Slunce, při kterých vrcholí nad obratníky.



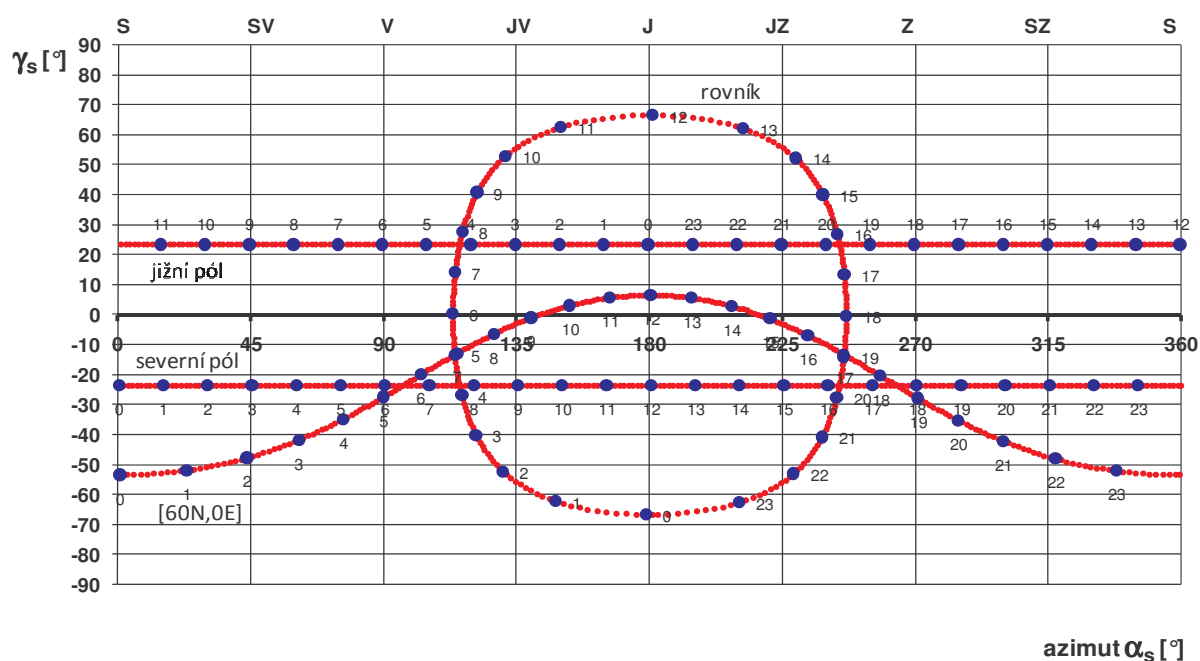
Obr. 4.20. Simulace různých měsíců pro rovník [0N;0E]



Obr. 4.21. Simulace různých měsíců pro rovník [0N;0E]

Na obrázku 4.21 jsou stejné parametry jako na obrázku 4.20 avšak zobrazeny na pravém panelu.

Obrázek 4.22 Ukazuje komplexní polohu Slunce na rovníku, mírném pásu a obou pólech 21.12 a demonstruje tak možnost zobrazení i těch pozic, které leží pod obzorem. Křivka trajektorie Slunce tvaru „jablka“ na rovníku se zvyšováním zeměpisné šířky mění až do tvaru přímky, kdy na severním pólu nastává polární noc nebo naopak na jižním pólu polární den.



Obr. 4.22. Simulace pro rovník [0N;0E], jižní [90S;0E] a severní [90N;0E] pól a místo mírného pásu [60N;0E]

5 VÝPOČET ÚHLU DOPADU NA SOLÁRNÍ MODUL

Pro nejvyšší hodnoty výkonu dopadajícího záření je potřeba směřovat solární modul na jih (v případě severní polokoule) a přímo na Slunce. Úhel náklonu závisí na zeměpisné šířce a období roku ve kterém je požadavek na nejvyšší výkon. [3]

Výpočet úhlu dopadu θ_{tilt} na nakloněnou rovinu je více komplikovanější. Povrchový azimutální úhel α_t popisuje odchylku od severního zeměpisného směru. Pokud je povrch orientován západním směrem je α_t kladné. Úhel náklonu roviny γ_t popisuje náklon roviny nebo-li šikmost vůči vodorovnému povrchu. Pokud je povrch vodorovný je úhel γ_t roven nule. Úhel dopadu na nakloněnou rovinu θ_{tilt} je úhel mezi vektorem s dopadajících paprsků ze směru Slunce a normálou nakloněné plochy n . Poloha Slunce je definována ve sférických souřadnicích a tyto je třeba převést do karteziánských se základními vektory severu, západu a zenitu, které jsou nutné pro další výpočty. Vektory s a n jsou:

$$s = (\cos \alpha_s \cdot \cos \gamma_s, -\sin \alpha_s \cdot \cos \gamma_s, \sin \gamma_s)^T \quad (5.21)$$

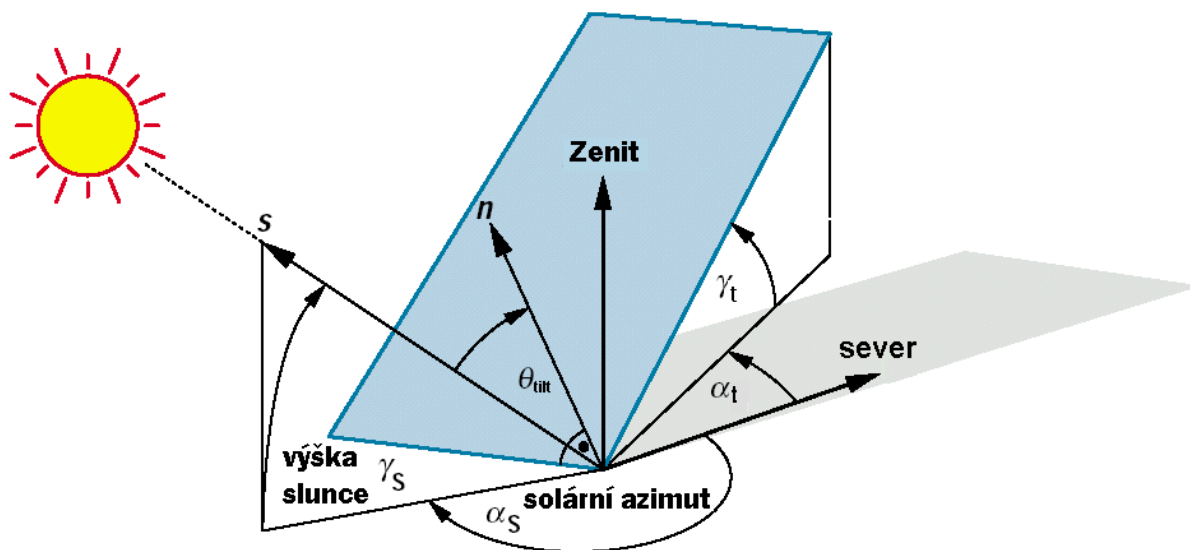
$$n = (-\cos \alpha_t \cdot \sin \gamma_t, \sin \alpha_t \cdot \sin \gamma_t, \cos \gamma_t)^T \quad (5.22)$$

Oba tyto vektory jsou normalizovány, a proto je úhel dopadu na nakloněnou rovinu skalárním součinem těchto vektorů:

$$\begin{aligned} \theta_{\text{tilt}} &= \arccos(s \cdot n) = \arccos(-\cos \alpha_s \cdot \cos \gamma_s \cdot \cos \alpha_t \cdot \sin \gamma_t - \\ &\quad - \sin \alpha_s \cdot \cos \gamma_s \cdot \sin \alpha_t \cdot \sin \gamma_t + \sin \gamma_s \cdot \cos \gamma_t) = \\ &= \arccos(-\cos \gamma_s \cdot \sin \gamma_t \cdot \cos(\alpha_s - \alpha_t) + \sin \gamma_s \cdot \cos \gamma_t) \end{aligned} \quad (5.23)$$

Celkové záření $E_{G,\text{tilt}}$ na nakloněný solární panel je složeno z přímého záření $E_{\text{dir},\text{tilt}}$, záření odraženého od atmosféry $E_{\text{diff},\text{tilt}}$ a taky ze záření $E_{\text{refl},\text{tilt}}$ odraženého od země (složka která při horizontálním umístění panelu neexistuje): [1]

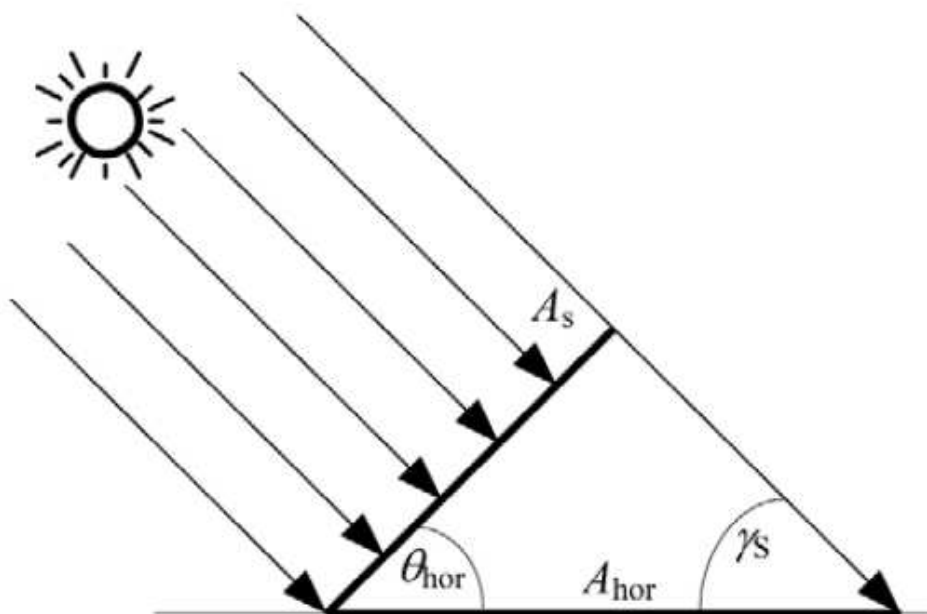
$$E_{G,\text{tilt}} = E_{\text{dir},\text{tilt}} + E_{\text{diff},\text{tilt}} + E_{\text{refl},\text{tilt}} \quad (5.24)$$



Obr. 5.233. Definice úhlů α_t a γ_t které definují naklonění solárního modulu[1]

5.1 Přímé záření na nakloněnou rovinu

Vodorovný povrch na obrázku 5.23 s povrchem A_{hor} pojme stejný výkon záření, jako menší oblast A_s která je k přicházejícím slunečním paprskům kolmá



Obr. 5.24. Záření na vodorovnou oblast A_{hor} a oblast A_s nakloněnou kolmo ke Slunci[1]

Je zřejmé, že paprsky $E_{\text{dir},s}$, dopadající kolmo na modul, přinášejí více energie záření, než paprsky $E_{\text{dir},\text{hor}}$, dopadající na vodorovný povrch modulu pod určitým úhlem. Tento fakt je třeba vzít v úvahu při návrhu solárního panelu. Sklon solárního modulu je parametr, který má význam na větší energetický zisk zvláště ve velkých zeměpisných šířkách, kde solární úhel dosahuje nízkých hodnot.

S použitím θ_{tilt} z rovnice 5.23 spočteme záření na nakloněný modul:

$$E_{\text{dir},s} = \frac{E_{\text{dir},\text{tilt}}}{\cos \theta_{\text{tilt}}} \quad (5.25)$$

Přímá složka záření na polohovaný solární modul je vypočtena z přímé složky záření na vodorovnou plochu:

$$E_{\text{dir},\text{tilt}} = E_{\text{dir},\text{hor}} \frac{\cos \theta_{\text{tilt}}}{\sin \gamma_s} \quad (5.26)$$

Pro výpočet difúzní složky záření $E_{\text{diff},\text{tilt}}$ se použije koeficientu sklonu solárního modulu γ_t a složky přímého záření na vodorovnou plochu $E_{\text{dir},\text{hor}}$

$$E_{\text{diff},\text{tilt}} = E_{\text{diff},\text{hor}} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \gamma_t) \quad (5.27)$$

Odraženou složku záření na solární panel, který je nastaven pod úhlem γ_t lze vyjádřit za pomoci hodnoty albeda A a celkového záření na vodorovnou plochu vztahem: [1]

$$E_{\text{refl},\text{tilt}} = E_{G,\text{hor}} \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos \gamma_t) \quad (5.28)$$

Kde albedo je míra odrazivosti tělesa nebo jeho povrchu. Jde o poměr odraženého elektromagnetického záření ku množství dopadajícího záření. Zlomek, obvykle vyjadřovaný procentuálně od 0 % do 100 %, je důležitým pojmem v klimatologii a astronomii. Poměr závisí na frekvenci uvažovaného záření: pokud není specifikována, bere se průměr podél spektra viditelného světla. Závisí také na úhlu dopadu záření: pokud není specifikován, uvažujeme o pravém úhlu. Albedo čerstvého sněhu je vysoké: až 90 %. Povrch oceánu má albedo nízké. Průměrné albedo Země je 37–39 %, zatímco u Měsíce dosahuje jen asi 12 %. V astronomii lze podle albeda satelitů a asteroidů usuzovat na jejich složení, především na podíl ledu. Lidská činnost mění albedo (například kácením lesů a farmařením) různých oblastí

zemského povrchu. Přesné vyčíslení tohoto efektu v globálním měřítku je však obtížné: není zřejmé, zda tyto změny přispívají ke zvyšování nebo snižování globálního oteplování.

Typickým příkladem albedo efektu je zpětná vazba teploty sněhu. Pokud se v oblasti pokryté sněhem oteplí a sníh taje, albedo se sníží, je absorbováno více slunečního záření, což přispívá k dalšímu oteplování. Obráceně to platí také: při vytváření sněhu se uplatňuje ochlazovací cyklus. Intezita albedo efektu závisí na velikosti změny albeda a na množství slunečního záření; z toho důvodu je v tropických oblastech albedo efekt potenciálně velmi výrazný. V Tabulce 5.10 lze porovnat albeda pro různé typy povrchů. [5]

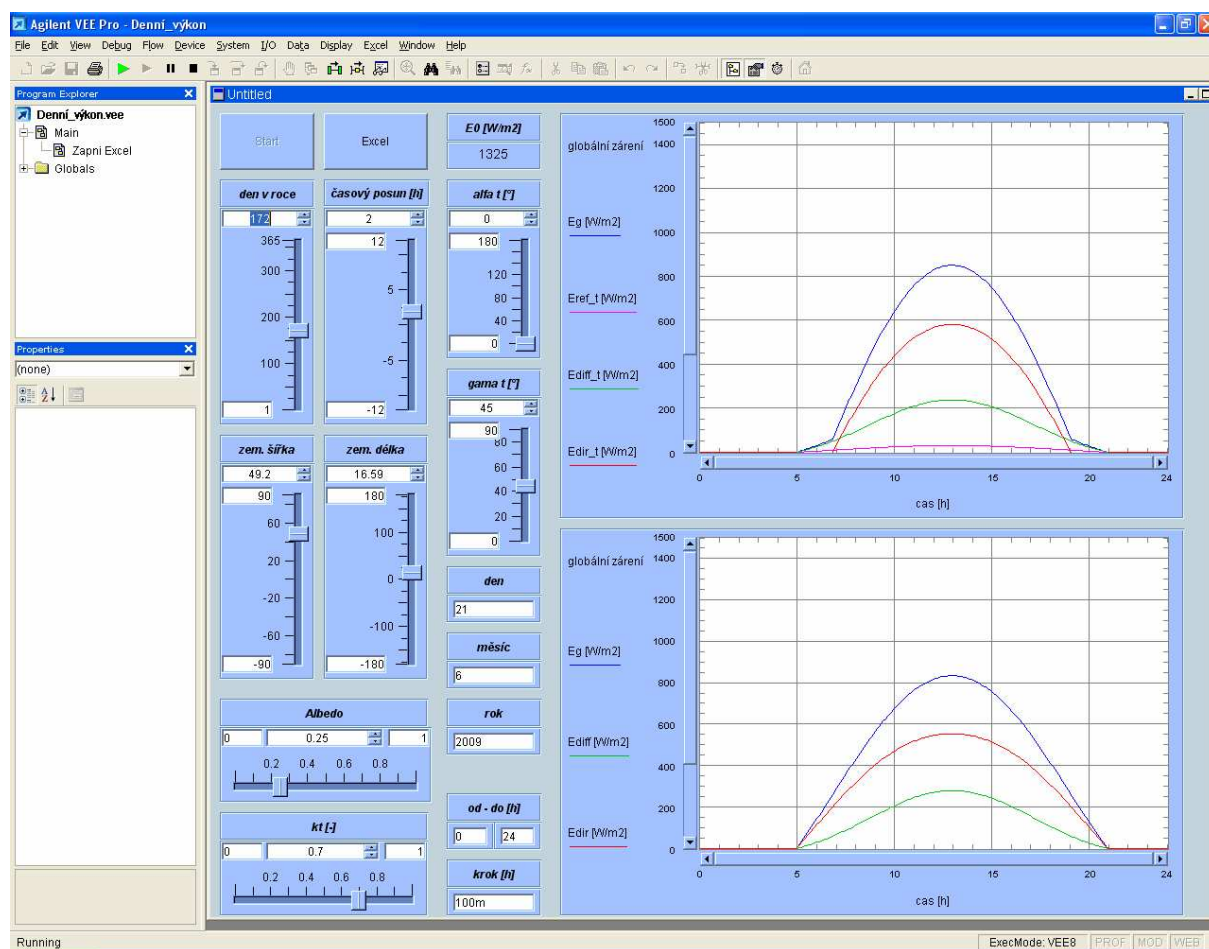
Tab 5.10: Albedo, přehled hodnot odrazivosti pro různé povrchy [1]

Povrch	Albedo A	Povrch	Albedo A
tráva(v létě)	0,25	Asfalt	0,15
trávník	0,18-0,23	Lesy	0,05-0,18
suchá tráva	0,28-0,32	vřesoviště a písčité stanoviště	0,15-0,25
neobděláná pole	0,26	vodní hladina($\gamma_s > 45^\circ$)	0,05
půda	0,17	vodní hladina($\gamma_s > 30^\circ$)	0,08
písek	0,18	vodní hladina($\gamma_s > 20^\circ$)	0,12
navětralý beton	0,20	vodní hladina($\gamma_s > 10^\circ$)	0,22
neporušený beton	0,30	čerstvý sníh	0,80-0,90
neporušený cementový blok	0,55	špinavý sníh	0,45-0,70

5.2 Simulace denního záření na přímý a nakloněný solární modul

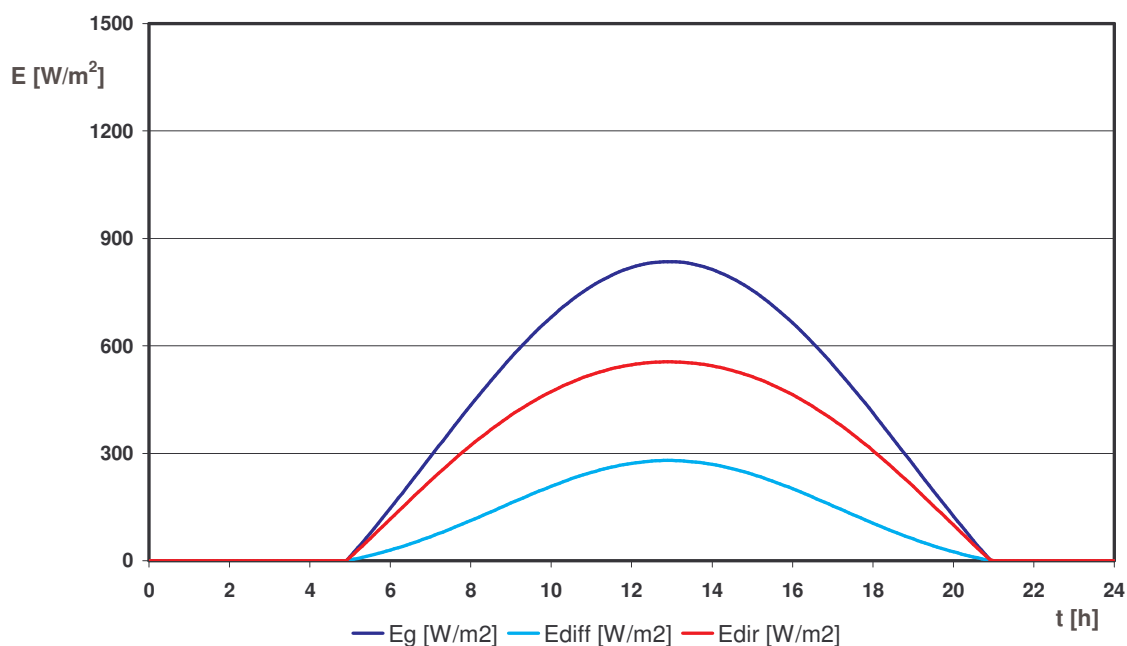
Uživatelský panel obsahuje vstupní data, kterými jsou den, měsíc a rok, zeměpisná šířka a délka, časový úsek dne a krok se kterým je výpočet v tomto úseku generován. Krok 100m znamená, že za časový interval 24 hodin bude simulováno 240 hodnot pro daný den. Dalšími proměnnými jsou albedo, koeficient k_T a úhly natočení α_t a γ_t pomocí kterých je definován sklon solárního modulu. Tlačítko “Start” spustí naprogramovaný algoritmus DIN, 1985. Program sleduje veškeré změny ve vstupních proměnných a pokud tyto nastanou, ihned přepočítá data na aktuální. Uživatelský panel je osazen dvěma výstupními grafy. Dolní graf zobrazuje difúzní složku E_{diff} a přímou složku E_{dir} celkového záření $E_{G,hor}$ na vodorovně umístěný solární modul (viz rovnice 3.11). Horní graf vykresluje hodnoty celkového záření na nakloněný solární panel $E_{g,tilt}$ a jeho složky, kterými jsou odražená složka záření od země $E_{refl,tilt}$, difúzní záření $E_{diff,tilt}$ a záření přímé $E_{dir,tilt}$ (viz rovnice 5.24). Po stisknutí tlačítka “Excel” lze provést export dat do tabulkového procesoru Microsoft Excel do přednastaveného souboru tilt.xls který je nutno v počítači nainstalovat do kořenového adresáře C:\tilt.xls.

Pohled na uživatelský panel soubor Denní_výkon.vee, kde je simulován výkon záření Slunce pro 21.6.2009 Brno, Údolní 53 [49,20N;16,59E].



Obr. 5.25. Pohled na uživatelský panel Agilent VEE Pro soubor Denní_výkon.vee

Pro následující simulace bylo zvoleno albedo 0,25, což podle tabulky 5.10 odpovídá hodnotám odrazivosti, které by se daly čekat při umístění solárního modulu na střeše budovy. Obrázky 5.26 a 5.27 simulují výkon dopadající na solární modul pro 21.6.2009 s parametry nastavenými na uživatelském panelu obrázku 5.25.

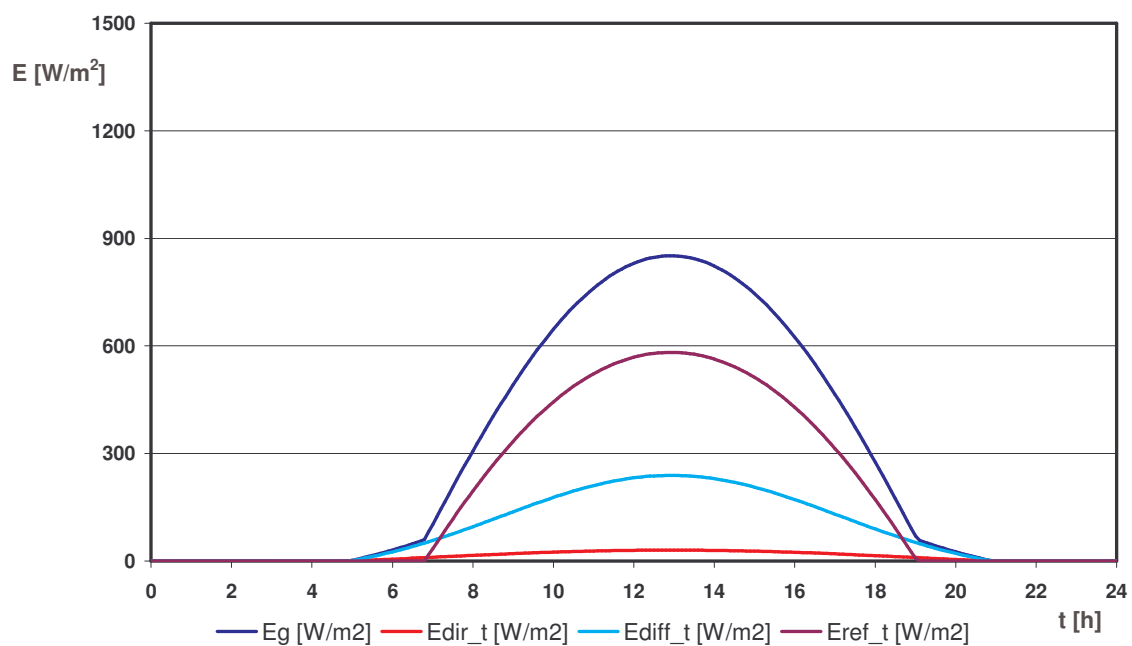


Obr. 5.26. Pohled na dolní panel simulace pro slunný den 21.6.2009 $k_t = 0,7$; $A = 0,25$; Brno [49,20N;16,59E]

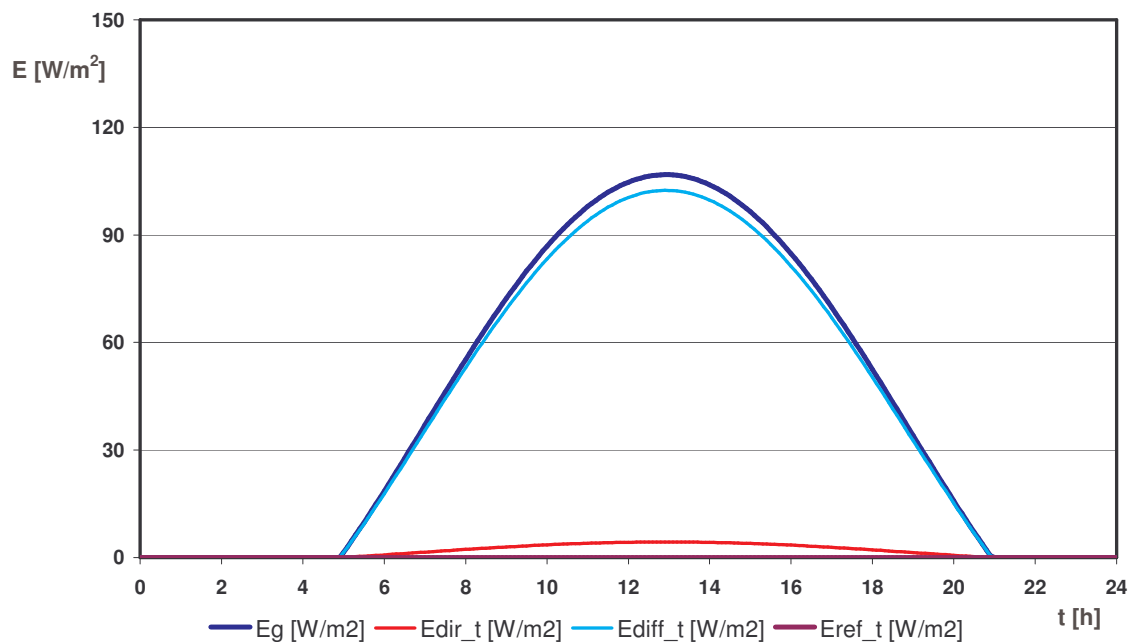
Na panel je při vodorovném uložení soustředěn výkon především přímé složky záření E_{dir} . Difúzní složka záření E_{diff} se na výkonu solárního modulu podílí při takto nastavených parametrech zhruba poloviční mírou.

Na obrázku 5.27 je simulace pro nakloněný modul s $\gamma_t = 45^\circ$. V porovnání s obrázkem 5.26 jsou difúzní záření srovnatelná u obou modulů, přímé záření převažuje u horizontálně uloženého modulu. Největší měrou se celkovém záření u nakloněného panelu podílí odražené záření od země.

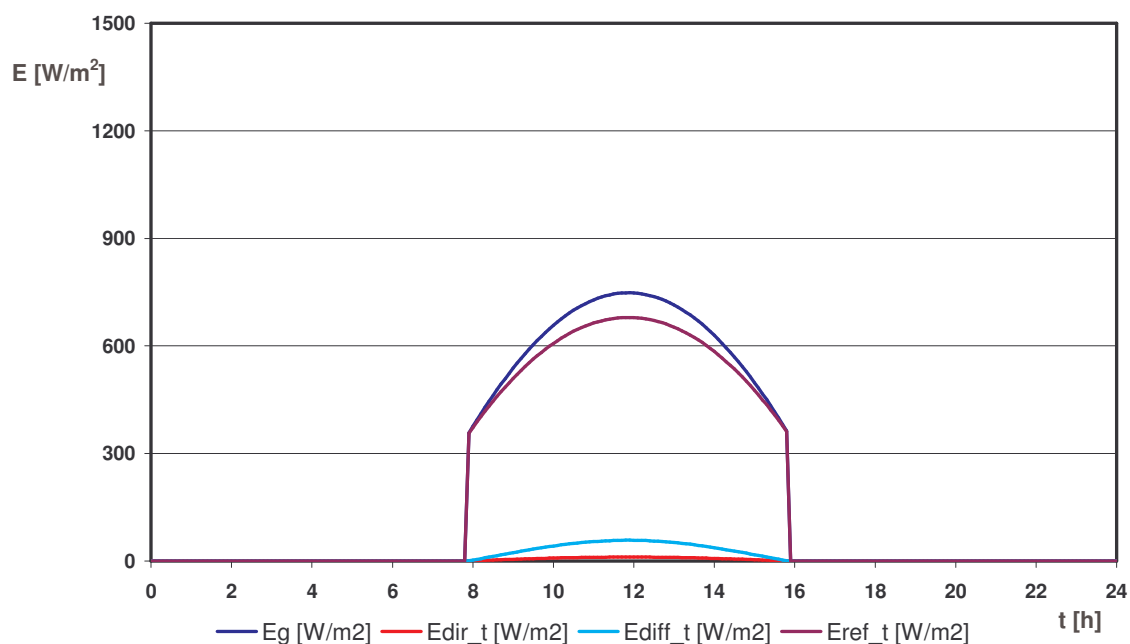
Obrázek 5.28 simuluje oblačný den, kdy k_T rapidně klesá, zvolená hodnota $k_T = 0,1$. Celkový výkon je v tomto případě velmi malý a skládá se především z difúzní složky záření.



Obr. 5.27. Pohled na horní panel simulace pro slunný den 21.6.2009 $k_T = 0,7$; $A = 0,25$; Brno [49,20N;16,59E]

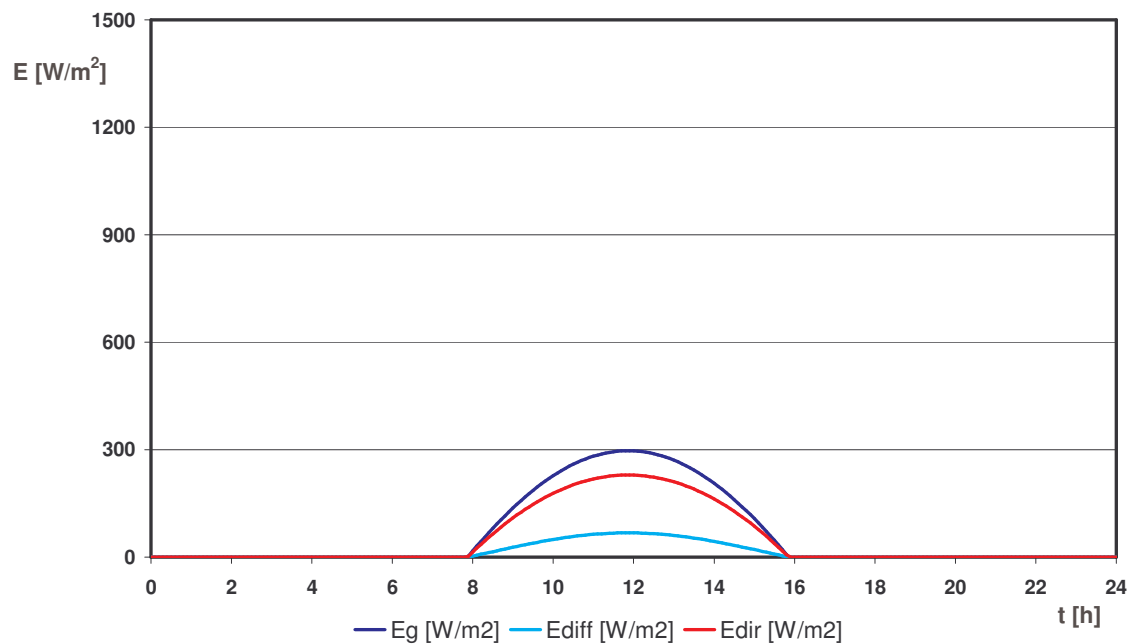


Obr. 5.28. Pohled na horní panel simulace pro oblačný den 21.6.2009 $k_T = 0,1$; $A = 0,25$; Brno [49,20N;16,59E]



Obr. 5.29. Pohled na horní panel simulace pro slunný den 21.12.2009 $k_t = 0,7$; $A = 0,25$; Brno [49,20N;16,59E]

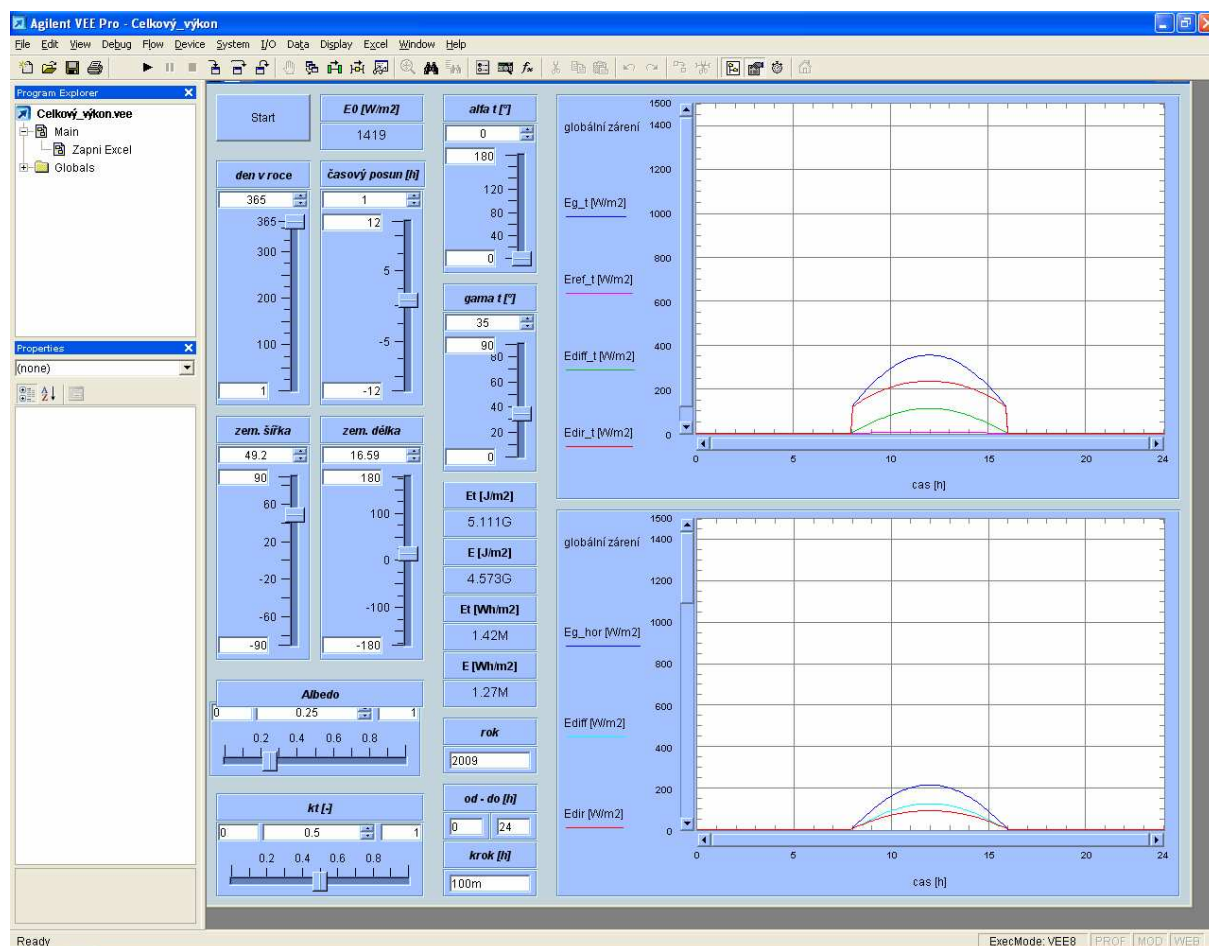
Lze pozorovat, že v zimním období dosahuje polohovaný panel i více než dvojnásobných hodnot výkonu, především díky odraženému záření od země a difúzní složce záření.



Obr. 5.30. Pohled na dolní panel simulace pro slunný den 21.12.2009 $k_T = 0,7$; $A = 0,25$; Brno [49,20N;16,59E]

5.3 Simulace ročního úhrnu záření na přímý a nakloněný solární modul

Pohled na uživatelský panel souboru Celkový_výkon.vee po proběhnutí výpočtu, kde je simulován výkon záření pro rok 2009 Brno, Údolní 53 [49,20N;16,59E].



Obr. 5.31. Pohled na uživatelský panel Agilent VEE Pro soubor Celkový_výkon.vee

Do uživatelského panelu se zadávají vstupní data: zeměpisná šířka a délka, časový úsek dne a krok se kterým je výpočet v tomto úseku generován. Dalšími proměnnými jsou albedo, koeficient k_T a úhly natočení α_t a γ_t pomocí kterých je definován sklon solárního modulu. Tento program vychází ze souboru Denní_výkon.vee. Hlavním rozdílem je fakt, že veškeré proměnné je potřeba zadat ještě před stiskem tlačítka "Start", pozdější editace proměnných nejsou zahrnuty do výpočtu. Program během svého výpočtu průběžně zobrazuje do obou grafů hodnoty den po dni počínaje 1. dnem roku a konče dnem posledním. Dolní graf zobrazuje difúzní složku E_{diff} a přímou složku E_{dir} celkového záření $E_{G,hor}$ na vodorovně polohovaný solární modul. Horní graf vykresluje hodnoty celkového záření na nakloněný solární panel $E_{G,tilt}$ a jeho složky, kterými jsou odrazená složka záření od země $E_{refl,tilt}$, difúzní

záření $E_{\text{diff,tilt}}$ a záření přímé $E_{\text{dir,tilt}}$. Během výpočtu se do výstupních hodnot ukládají data o dosaženém úhrnu výkonu globálního záření E vodorovně umístěného panelu a globálního záření na nakloněný modul E_t . Oba tyto výkony jsou uvedeny jak v $[\text{J/m}^2]$, tak ve $[\text{Wh/m}^2]$. Z těchto hodnot lze hledat optimální náklon panelu γ_t pro dané místo a parametry. Pro celoroční simulaci je zvolen činitel propustnosti atmosféry k_T na 0,5 albedo 0,25. S těmito parametry se bude hledat optimální úhel náklonu, pro který je roční souhrn výkonu na modul maximální viz tabulka 5.11.

Tab 5.11: Výkony dopadající na solární modul pod různými úhly γ_t

Brno	$\gamma_t [^\circ]$	0	20	30	34	35	35,5	36	38	40	50	60	90
opt=35,5°	$E_t [\text{GJ/m}^2]$	4,573	5,005	5,098	5,11	5,111	5,111	5,111	5,108	5,101	5,015	4,841	3,862
Káhira	$\gamma_t [^\circ]$	0	12	15	19	20	21	22	30	40	50	60	90
opt=20°	$E_t [\text{GJ/m}^2]$	5,8	5,961	5,979	5,99	5,99	5,99	5,988	5,939	5,789	5,547	5,22	3,861
Bergen	$\gamma_t [^\circ]$	0	20	30	40	42	44	45	46	50	60	70	90
opt=45°	$E_t [\text{GJ/m}^2]$	3,724	4,238	4,397	4,479	4,485	4,488	4,489	4,488	4,478	4,394	4,229	3,679
Sydney	$\gamma_t [^\circ]$	0	20	22	22,5	23	25	30	40	50	60	70	90
opt=22,5°	$E_t [\text{GJ/m}^2]$	5,588	5,832	5,835	5,835	5,835	5,833	5,809	5,69	5,478	5,18	4,805	3,884

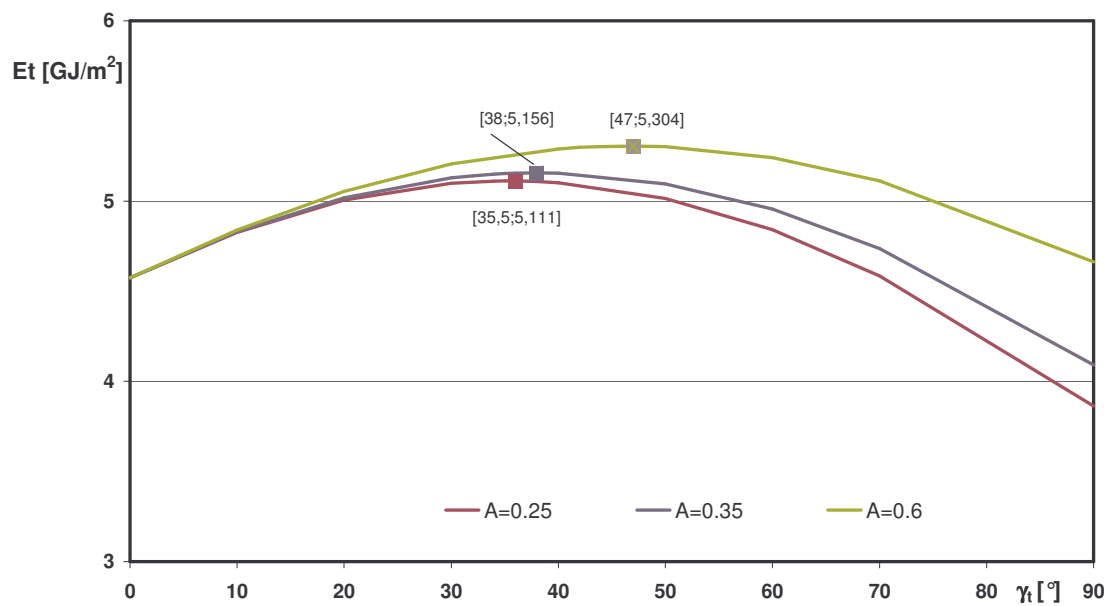
Pozn.: opt je optimální úhel náklonu pro $k_T = 0,5$; albedo = 0,25

Tab 5.12: Výkony dopadající na solární modul pod různými albedy a úhly γ_t Brno

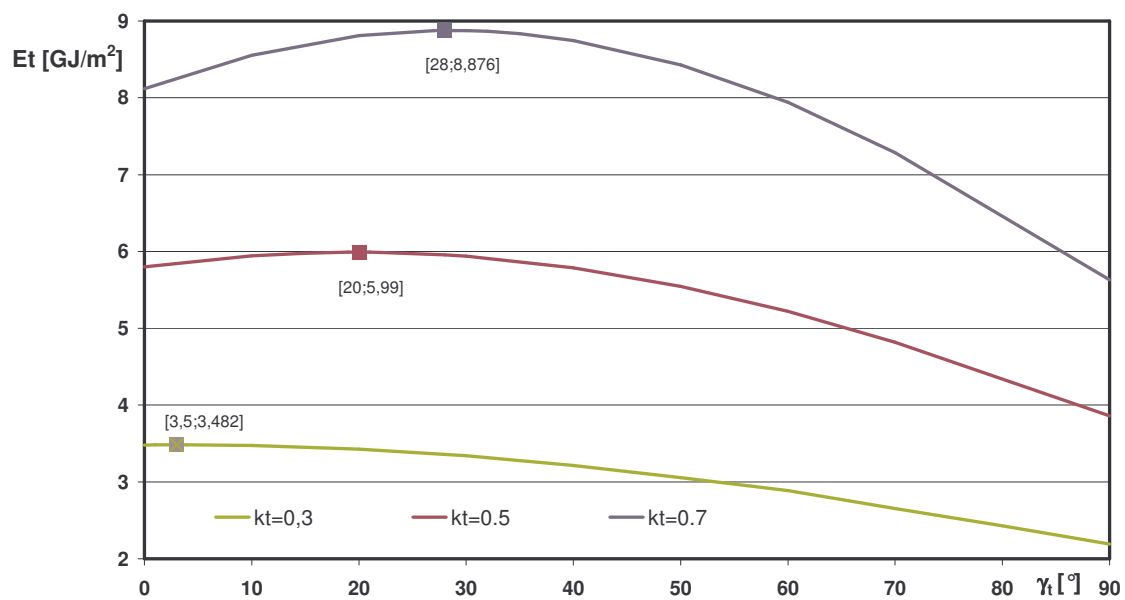
albedo	$\gamma_t [^\circ]$	0	20	30	34	35	35,5	36	38	40	50	60	90
0,25	$E_t [\text{GJ/m}^2]$	4,573	5,005	5,098	5,11	5,111	5,111	5,111	5,108	5,101	5,015	4,841	3,862
albedo	$\gamma_t [^\circ]$	0	20	30	32	34	35	36	38	40	50	60	90
0,35	$E_t [\text{GJ/m}^2]$	4,573	5,018	5,128	5,14	5,149	5,152	5,154	5,156	5,155	5,096	4,955	4,09
albedo	$\gamma_t [^\circ]$	0	20	30	40	42	44	46	47	48	50	60	90
0,6	$E_t [\text{GJ/m}^2]$	4,573	5,053	5,205	5,288	5,297	5,302	5,304	5,304	5,304	5,301	5,241	4,662

Tab 5.13: Výkony dopadající na solární modul pod různými k_T a úhly γ_t Káhira

k_T	$\gamma_t [^\circ]$	0	1	3	3,5	4	20	30	40	50	60	70	90
0,3	$E_t [\text{GJ/m}^2]$	3,48	3,481	3,482	3,483	3,482	3,427	3,339	3,214	3,054	2,886	2,655	2,191
k_T	$\gamma_t [^\circ]$	0	15	19	20	21	22	28	30	40	50	60	90
0,5	$E_t [\text{GJ/m}^2]$	5,8	5,979	5,99	5,99	5,99	5,988	5,957	5,939	5,789	5,547	5,22	3,861
k_T	$\gamma_t [^\circ]$	0	20	27	28	29	30	32	35	40	50	60	90
0,7	$E_t [\text{GJ/m}^2]$	8,119	8,809	8,875	8,877	8,876	8,874	8,864	8,834	8,747	8,431	7,939	5,631



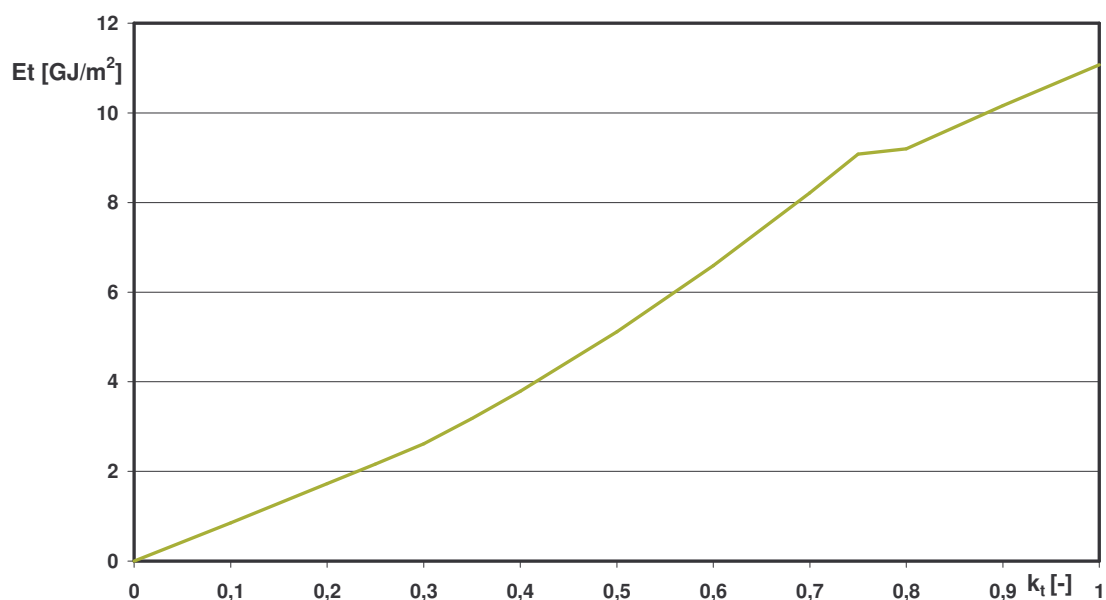
Obr. 5.32. Posun optimálního úhlu γ_t při $k_T = 0,5$ a různém albedu Brno [49,20N;16,59E]



Obr. 5.33. Posun optimálního úhlu γ_t při různém k_T ; $A = 0,25$ Káhira [30,06N;31,26E]

Tab 5.14: Výkony dopadající na solární modul při optimálním γ_t a proměnném k_T ; albedo= 0,25

Místo	$\gamma_t [^\circ]$	$kt [-]$	0	0,1	0,2	0,25	0,35	0,4	0,5	0,7	0,75	0,8	1
Brno	35,5	$Et [GJ/m^2]$	0	0,853	1,724	2,168	3,181	3,786	5,111	8,212	9,082	9,2	11,07
Káhira	20	$Et [GJ/m^2]$	0	1,083	2,17	2,721	3,878	4,52	5,869	8,828	9,622	10,1	12,32
Bergen	45	$Et [GJ/m^2]$	0	0,665	1,356	1,713	2,619	3,192	4,489	7,68	8,603	8,39	9,927
Sydney	22,5	$Et [GJ/m^2]$	0	1,089	2,182	2,734	3,887	4,517	5,835	8,697	9,459	9,91	12,18

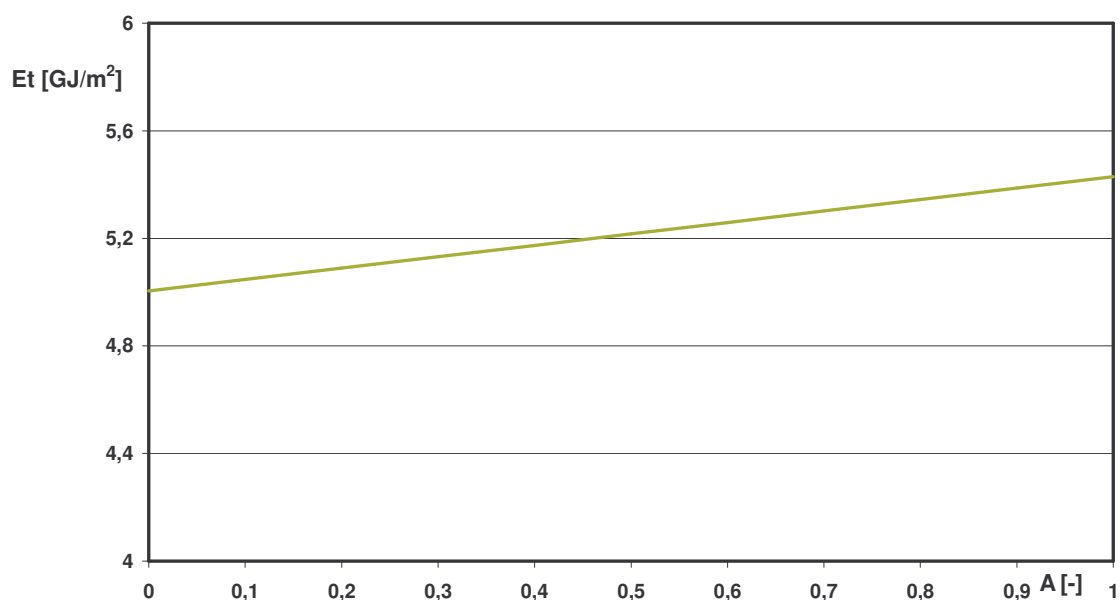


Obr. 5.34. Výkony dopadající na solární modul při optimálním $\gamma_t = 35,5^\circ$; albedo = 0,25 v závislosti na k_T pro Brno [49,20N;16,59E]

Obrázek 5.34. pro Brno znázorňuje téměř lineární závislost dopadnutého výkonu na činiteli kt . Mírné odchylky jsou způsobeny tím, že celkový výkon se skládá mimo jiné ze složky difúzního a odraženého záření ve kterých figuruje činitel k_T , který je aproximován třemi odlišnými funkcemi v závislosti na jeho velikosti viz rovnice 3.13. Průběhy výkonu pro jiná místa jsou opět křivky lineární závislosti a proto nejsou graficky vyjádřeny, ale tyto data shrnuje tabulka 5.14.

Tab 5.15: Výkony dopadající na modul při optimálním γ_t a proměnném albedu; $k_T = 0,5$

Místo	$\gamma_t [^\circ]$	albedo [-]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Brno	35,5	$E_t [\text{GJ/m}^2]$	5,004	5,047	5,089	5,132	5,174	5,217	5,259	5,302	5,344	5,387	5,429
Kahira	20	$E_t [\text{GJ/m}^2]$	5,947	5,964	5,982	5,999	6,017	6,034	6,052	6,069	6,087	6,104	6,122
Bergen	45	$E_t [\text{GJ/m}^2]$	4,352	4,407	4,462	4,516	4,571	4,625	4,68	4,734	4,789	4,843	4,898
Sydney	22,5	$E_t [\text{GJ/m}^2]$	5,782	5,803	5,825	5,846	5,867	5,888	5,91	5,931	5,952	5,973	5,995



Obr. 5.35. Výkony dopadající na modul při optimálním $\gamma_t = 35,5^\circ$; $k_T = 0,5$ v závislosti na albedu pro Brno [49,20N;16,59E]

Tato závislost je ryze lineární, což vyplývá i z faktu že albedo viz rovnice 5.28 figuruje pouze ve složce $E_{\text{refl,tilt}}$ která vytváří celkový výkon spolu s ostatními složkami, které nejsou na albedu závislé.

6 Závěr:

Po nastudování teoretického základu byly vytvořeny 3 programy, které splňují požadavky zadání práce. Byl vytvořen program Poloha_slunce.vee simulující komplexní polohu během dne. Všechna nastavení výstupních grafů zobrazují polohy Slunce $\gamma_s > 0$ (polohy Slunce pod obzorem se nezobrazují). Je na uživateli, zda si toto nastavení změní pro své potřeby. Dále byl vytvořen soubor Denní_výkon.vee, který počítá denní výkon slunečního záření dopadajícího na fotovoltaický modul při proměnném náklonu modulu a soubor Celkový_výkon.vee, který počítá roční úhrn celkového záření všech simulovaných dnů v roce. Provedenými simulacemi byla ověřena hypotéza, že při zamračeném dnu, kdy $k_T \rightarrow 0$ se difúzní záření blíží 100% celkového záření na solární modul, nehledě na jeho náklon. Experimentálně byly stanoveny optimální úhly náklonu pro Brno, Káhiru, Bergen a Sydney za podmínek $A=0,25$ a $k_T = 0,5$. Dále vyplynulo, že pokud se zvyšuje albedo zvyšuje se i optimální úhel náklonu viz obrázek 5.32, stejně je tomu tak u koeficientu k_T , kde se tato závislost projevuje mnohem výrazněji viz obrázek 5.33. Dále byla simulována závislost parametrů albeda a k_T při nastavení optimálního sklonu panelu, tyto data prezentují tabulky 5.14 a 5.15, graficky potom obrázky 5.34 a 5.35. V současné době se těchto programů využívá pro simulace v laboratorních cvičeních z předmětu obnovitelné zdroje energie a užitek mohou přinést i pro uživatele, který by si chtěl instalovat solární modul. Nicméně by se dalo v rámci zadání disertační práce z těchto programů vyjít a vytvořit programy simulující optimální úhel ze zadaných proměnných, stejně tak jako program simulující překážky v terénu (respektující i částečné zastínění solárního modulu).

7 Seznam obrázků

Obr. 3.1. Syntéza čtyř vodíkových jader a vznik jádra hélia (alfa částice) [1]	8
Obr. 3.2. Zářivý výkon na povrchu koule s poloměrem r_{SE} je stejný jako na povrchu Slunce[1]	10
Obr. 3.3. Spektrum slunečních paprsků[2]	12
Obr. 3.4. Přehled úhlů γ_s a hodnot AM v poledni pro různé měsíce v roce pro Berlín a Káhiru[1]	14
Obr. 3.5. Celkové záření přes den v Karlsruhe (Německo) pro 2.6; 22 a 28.12.1991[1]	15
Obr. 3.6. Cesta paprsků procházejících atmosférou[1]	17
Obr. 3.7. Denní záření přímé a difúzní v Berlíně[1]	18
Obr. 3.8. Denní záření přímé a difúzní v Káhiře[1]	19
Obr. 3.9. Denní záření přímé a difúzní v Káhiře[1]	20
Obr. 4.10. Definice úhlů α_s a γ_s popisujících pozici Slunce[1]	23
Obr. 4.11. Úhly solárního azimutu α_s a výšky Slunce γ_s popisující pozici Slunce v Berlíně[1]	24
Obr. 4.12. Úhly solárního azimutu α_s a výšky Slunce γ_s popisující pozici Slunce v Káhiře[1]	24
Obr. 4.13. Pohled na uživatelský panel Agilent VEE Pro	25
Obr. 4.14. Pohled na levý horní panel simulace pro Brno [49,20N;16,59E]	27
Obr. 4.15. Pohled na pravý horní panel simulace pro Brno [49,20N;16,59E]	27
Obr. 4.16. Pohled na dolní panel simulace pro Brno [49,20N;16,59E]	28
Obr. 4.17. Simulace různých měsíců pro Brno [49,20N;16,59E]	28
Obr. 4.18. Simulace různých měsíců pro Berlín [52,50N;13,40E]	29
Obr. 4.19. Simulace různých měsíců pro Káhiru [30,06N;31,26E]	29
Obr. 4.20. Simulace různých měsíců pro rovník [0N;0E]	30
Obr. 4.21. Simulace různých měsíců pro rovník [0N;0E]	30
Obr. 4.22. Simulace pro rovník [0N;0E], jižní [90S;0E] a severní [90N;0E] pól a místo mírného pásu [60N;0E]	31
Obr. 5.23. Definice úhlů α_t a γ_t které definují naklonění solárního modulu[1]	33
Obr. 5.24. Záření na vodorovnou oblast A_{hor} a oblast A_s nakloněnou kolmo ke Slunci[1]	33
Obr. 5.25. Pohled na uživatelský panel Agilent VEE Pro soubor Denní_výkon.vee	36
Obr. 5.26. Pohled na dolní panel simulace pro slunný den 21.6.2009 $k_T = 0,7$; $A = 0,25$; Brno [49,20N;16,59E]	37
Obr. 5.27. Pohled na horní panel simulace pro slunný den 21.6.2009 $k_T = 0,7$; $A = 0,25$; Brno [49,20N;16,59E]	38
Obr. 5.28. Pohled na horní panel simulace pro oblačný den 21.6.2009 $k_T = 0,1$; $A = 0,25$; Brno [49,20N;16,59E]	38
Obr. 5.29. Pohled na horní panel simulace pro slunný den 21.12.2009 $k_T = 0,7$; $A = 0,25$; Brno [49,20N;16,59E]	39
Obr. 5.30. Pohled na dolní panel simulace pro slunný den 21.12.2009 $k_T = 0,7$; $A = 0,25$; Brno [49,20N;16,59E]	39
Obr. 5.31. Pohled na uživatelský panel Agilent VEE Pro soubor Celkový_výkon.vee	40
Obr. 5.32. Posun optimálního úhlu γ_t při $k_T = 0,5$ a různém albedu Brno [49,20N;16,59E]	42
Obr. 5.33. Posun optimálního úhlu γ_t při různém k_T ; $A = 0,25$ Káhira [30,06N;31,26E]	42
Obr. 5.34. Výkony dopadající na solární modul při optimálním $\gamma_t = 35,5^\circ$; albedo = 0,25 v závislosti na k_T pro Brno [49,20N;16,59E]	43
Obr. 5.35. Výkony dopadající na modul při optimálním $\gamma_t = 35,5^\circ$; $k_T = 0,5$ v závislosti na albedu pro Brno [49,20N;16,59E]	44

8 Seznam použité literatury:

- [1] QUASCHNING, V., *Understanding renewable energy systems USA 2007*; ISBN 978-1-84407-136-4
- [2] VANĚK, J.; KŘIVÍK, P.; NOVÁK, V. *Alternativní zdroje energie*. ELEKTRONICKÉ SKRIPTUM VUT Brno 2006
- [3] BOYLE, G., *Renewable Energy: Power for Sustainable Future-Second Edition* OXFORD UNIVERSITY 2004; ISBN 0-19-926178-4
- [4] *Sluneční energie* [cit. 2010-02-05]. Dostupné z WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Slune%C4%8Dn%C3%AD_energie
- [5] *Albedo* [cit. 2010-02-05] Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Albedo>