



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

VÝKON SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ DOPADAJÍCÍHO NA FOTOVOLTAICKÝ MODUL

THE POWER OF SOLAR RADIATION FALLING ON A PHOTOVOLTAIC MODULE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Alexey Kaliyev

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Křivík, Ph.D.

BRNO 2022



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program Elektrotechnická výroba a management

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Alexey Kaliyev

ID: 186105

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Výkon slunečního záření dopadajícího na fotovoltaický modul

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte literaturu popisující metody výpočtu polohy slunce pohybujícího se po obloze a výkonu slunečního záření dopadajícího na zemský povrch. Osvojte si základy práce s programovacím prostředím VEE Pro.

Vytvořte program simulující pohyb slunce po obloze během dne - pro zvolené místo a stanovené datum. Vytvořený program využijte pro výpočet výkonu slunečního záření dopadajícího na fotovoltaický modul s proměnným náklonem a pro výpočet celkové energie slunečního záření dopadajícího na fotovoltaický modul během dne.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 25.5.2022

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

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda rady studijního programu

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

Práce je zaměřená na problematiku výkonu slunečního záření dopadajícího na fotovoltaický modul. V rámci teoretické části byly probrány a uvedeny možnosti využití sluneční energie v obnovitelných zdrojích energie, zejména ve fotovoltaických panelech a solárních kolektorech. Následně byly prozkoumány materiály zabývající se problematikou využívání sluneční energie v těchto zdrojích. Dále byly popsány tři základní složky dopadajícího slunečního záření na fotovoltaický modul nebo solární kolektor. Na závěr byla probrána a uvedena metoda výpočtu polohy Slunce po obloze a také metoda výpočtu jednotlivých složek dopadajícího slunečního záření na fotovoltaický modul.

Klíčová slova

Slunce, Země, sluneční záření, albedo, ekliptika, jaderná syntéza, křemík, fotovoltaický článek, solární kolektor, solární azimut, úhel výšky Slunce nad obzorem, přímé záření, rozptýlené záření, odražené záření.

Abstract

The work is focused on the problem of the solar radiation power impacting on a photovoltaic module. In the theoretical part, the possibilities of using solar energy in renewable energy sources, especially in photovoltaic panels and solar collectors, were discussed and presented. Then the materials on the use of solar energy in these sources were reviewed. In addition, the three main components of incident solar radiation on a photovoltaic module or solar collector were described. Finally, the method for calculating the position of the sun across the sky was discussed and presented, as well as the method for calculating the various components of incident solar radiation on a photovoltaic module.

Keywords

Sun, Earth, solar radiation, albedo, ecliptic, nuclear fusion, silicon, photovoltaic cell, solar collector, solar azimuth angle, solar altitude angle, beam radiation, diffuse radiation, reflected radiation.

Bibliografická citace

KALIYEV, A. *Výkon slunečního záření dopadajícího na fotovoltaický modul*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie, 2022. 47 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Křivík, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Alexey Kaliyev</i>
VUT ID studenta:	<i>186105</i>
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	<i>2021/22</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Výkon slunečního záření dopadajícího na fotovoltaický modul</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 24. května 2022

podpis autora

Poděkování

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

V Brně dne: 24. května 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	9
ÚVOD	10
1. SLUNCE.....	11
1.1 ŠÍŘENÍ SLUNEČNÍ ENERGIE	12
1.2 ALBEDO	12
1.3 CESTA SLUNCE PO ZEMSKÉ OBLOZE	13
2. JADERNÁ SYNTÉZA	15
2.1 PROCES JADERNÉ SYNTÉZY	15
3. FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY	18
3.1 FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY A JEJICH VLASTNOSTI.....	18
3.2 TYPY KŘEMÍKOVÝCH FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ	19
3.3 KŘEMÍK A JEHO VLASTNOSTI.....	20
3.4 SOLÁRNÍ KOLEKTORY	21
4. VÝPOČET POLOHY SLUNCE	22
4.1 POLOHA SLUNCE V POLEDNE.....	22
4.2 SLUNEČNÍ ČAS A HODINOVÝ ČAS.....	23
4.3 POLOHA SLUNCE V LIBOVOLNÉM ČASE A MÍSTĚ.....	24
5. VÝPOČET JEDNOTLIVÝCH SLOŽEK SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ.....	26
5.1 PŘÍMÉ ZÁŘENÍ	26
5.2 ROZPTÝLENÉ ZÁŘENÍ	28
5.3 ODRAŽENÉ ZÁŘENÍ.....	29
6. PRAKTICKÁ ČÁST.....	31
7. ZÁVĚR.....	43
8. LITERATURA	44
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	46

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Šíření slunečního záření v závislosti na meziplanetární vzdálenosti [20]	12
1.2	Model Země s vyznačenou rovinou Ekliptiky [7]	14
2.1	Syntéza čtyř jader vodíku za vzniku jádra hélia [23]	16
2.2	Znázornění r_S (poloměr Slunce), r_{SE} (průměrná vzdálenost Země-Slunce), A_S (povrch Slunce), A_{SE} (povrch koule se středem uprostřed Slunce o poloměru r_{SE}) pro výpočet E_e intenzita záření dopadajícího na zemský povrch [10, 22]	17
3.1	Struktura fotovoltaického článku [11]	18
3.2	Solární kolektor [18]	21
4.1	Přehled hodnot Air Mass	23
4.2	Hodinový úhel jako rozdíl mezi slunečním poledníkem a místním poledníkem [19]	25
4.3	Úhel výšky Slunce nad obzorem β a solární azimut φ_S v závislosti na poloze Slunce [19]	25
5.1	Druhy záření dopadajících na solární kolektor [19]	26
5.2	Úhel dopadu θ mezi normálou k ploše kolektoru a dopadajícím slunečním zářením [19]	27
5.3	Přehled dopadajících úhlů slunečního záření [19]	28
5.4	Rozptýlené záření dopadající na zemský povrch [19]	29
5.5	Odražené přímé a rozptýlené záření dopadající na kolektor [19]	30
6.1	Vytvořený uživatelský panel simulující polohu Slunce pro Brno, datum 26.08.2021 s časovým intervalem od 10:00 do 18:00	32
6.2	Závislosti β na φ_S pro Brno a zvolený datum 26.08.2021 s časovým intervalem od 10:00 do 18:00 33	
6.3	Časové závislosti β a AM pro Brno a zvolený datum 26.08.2021 s časovým intervalem od 10:00 do 18:00	33
6.4	Uživatelský panel simulující výkony dopadajícího slunečního záření pro Brno, datum 22.03.2022 s časovým intervalem od 00:00 do 16:00	35
6.5	Časová závislost jednotlivých složek výkonů slunečního záření dopadajícího na optimálně nakloněný kolektor pro město Brno dne 22.03.2022	36
6.6	Časová závislost jednotlivých složek výkonů slunečního záření dopadajícího na vodorovný povrch pro město Brno dne 22.03.2022	36
6.7	Časová závislost jednotlivých složek výkonu slunečního záření dopadajícího na vodorovný povrch pro město Oslo dne 22.05.2022	37
6.8	Časová závislost jednotlivých složek výkonů slunečního záření dopadajícího na vodorovný povrch pro město Manila dne 22.05.2022	38
6.9	Časová závislost jednotlivých složek výkonu slunečního záření dopadajícího na vodorovný povrch pro město Madrid dne 27.12.2021	39
6.10	Časová závislost jednotlivých složek výkonů slunečního záření dopadajícího vodorovný povrch pro město Madrid dne 27.03.2022	39
6.11	Časová závislost jednotlivých složek výkonů slunečního záření dopadajícího na vodorovný povrch pro město Madrid dne 27.06.2022	40
6.12	Pyranometr SG420, na kterém probíhalo měření výkonu dopadajícího slunečního záření. FEKT VUT v Brně 23.03.2022	41
6.13	Časová závislost výkonu slunečního záření dopadajícího na modul pro město Brno VUT FEKT dne 23.03.2022	42
6.14	Časová závislost výkonu slunečního záření dopadajícího na modul pro město Brno VUT FEKT dne 23.03.2022	42

SEZNAM TABULEK

1.1	Porovnání hodnot parametrů Slunce a Země [1, 22]	11
1.2	Albedo zemních materiálů (odrazivost) [6, 22].....	13
2.1	Hmotnosti některých částic a nuklidů [6, 22].....	15

ÚVOD

Alternativní a obnovitelné zdroje energie v současné době procházejí velkým technologickým pokrokem. Tyto zdroje energie slouží pro náhradu klasických zdrojů energie využívajících pro svou činnost fosilní paliva, což z hlediska ekologie může být docela toxické a z hlediska získávání těchto paliv a energie z nich docela náročné. V některých případech je sice ekologická závadnost evidentní, avšak volba vhodné náhrady je obtížná. Obnovitelná energie je takový typ energie, který se v lidském časovém měřítku přirozeně obnovuje. Jedním s takovýchto zdrojů energie je sluneční záření. [11]

Solární energie není potřeba získávat a transportovat. Hromadné využití tohoto druhu energie není problémem z hlediska ekologie. Množství solární energie, která ročně dopadá na Zemský povrch je mnohem větší než maximální možná roční spotřeba energie lidstvem. Pro využití sluneční energie s následnou výrobou tepelné a elektrické energie slouží solární kolektory či panely. Hlavní výhodou je to, že je možné je rozmísťovat na střechách rodinných domů až po větší průmyslové a komerční budovy. Další výhodou je jednoduchost jejich obsluhy a velice dobrá odolnost vůči vnějším přírodním vlivům.

Základní materiál sloužící pro výrobu fotovoltaických článků je křemík. V polovodičové technice je nenahraditelným prvkem poskytujícím velkou účinnost a také dobrou stabilitu. Opačnou stranou je jeho docela náročný proces výroby, kdy je potřeba technické čistoty křemíku o kvalitě až 99,9999999 %. [11]

1. SLUNCE

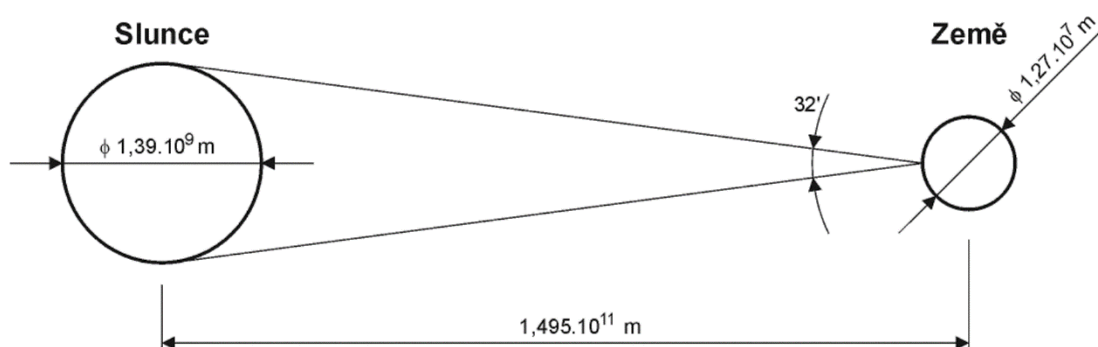
Slunce je centrální hvězdou našeho planetárního systému. Hmotnost Slunce je $1,989 \cdot 10^{30}$ kg a jeho vzdálenost od Země je $149,6 \cdot 10^6$ km. Průměr hvězdy činí $1,3927 \cdot 10^6$ km s teplotou na jeho povrchu kolem 5778 K a $15 \cdot 10^6$ K v jádru Slunce. Hvězda vyzařuje na vlnové délce 501 nm, což je ve žlutozeleně viditelné části spektra. Slunce svítí skoro bílým světlem. Sluneční záření představuje základní energetický zdroj energie pro procesy probíhající jak v atmosféře, tak i na zemském povrchu. Průměrná hodnota záření ze Slunce dopadající na zemský povrch činí 1367 W/m^2 . Sluneční záření je v podstatě elektromagnetické záření, jehož spektrum se dělí na tři základní oblasti. Ultrafialová část spektra se nachází v rozmezí mezi viditelným a rentgenovým zářením a délky vln jsou v intervalu od 10 až 400 nm. Podíl z celkového záření, který je závislý na vzdálenosti od zemského povrchu je 0 až 4 %. Viditelné záření je vnímané lidským okem a vlnové délky se nachází v rozmezí od 400 do 780 nm. Podíl z celkového záření je 21 až 46 %, v závislosti na úrovně zataženosti oblohy. Poslední části spektra slunečního záření je infračervené záření. Vlnová délka této oblasti spektra je nad 780 nm a má největší podíl z celkového dopadajícího záření 50 až 79 %. Zodpovědnost jak za tvorbu vitamínu D a opálení, tak i za spálení a rakovinu kůže nese ultrafialové záření. [1, 2, 3, 22]

Tabulka 1.1 Porovnání hodnot parametrů Slunce a Země [1, 22]

	Slunce	Země	Poměr
Ekvatoriální poloměr [km]	695508	6371	1:109
Ekvatoriální okruh [km]	4370005,6	40030,2	1:109
Objem [km ³]	$1,409 \cdot 10^{18}$	$1,083 \cdot 10^{12}$	1:1303702
Hustota [kg/m ³]	1409	5513	1:0,256
Hmotnost [kg]	$1,989 \cdot 10^{30}$	$5,972 \cdot 10^{24}$	1:333054
Plocha povrchu [km ²]	6,079E+12	$5,101 \cdot 10^8$	1:11917
Gravitace na povrchu [m/s ²]	274	9,80665	1:28
Úniková rychlost [km/h]	2223720	40284	1:55
Teplota na povrchu [K]	5777	288	1:20
Teplota ve středu [K]	15000000	6700	1:2239

1.1 Šíření sluneční energie

Množství a intenzita slunečního záření dopadajícího na zemský povrch je velice závislá na geometrické vzdálenosti mezi Sluncem a Země. S rostoucí vzdáleností od Slunce se výkon rozptyluje na větší plochu. Část slunečního záření se odrazí od atmosféry, reliéfu a vody (přibližně o třetinu své původní hodnoty) zpět do vesmírného prostoru. Další část záření je pohlceno atmosférou. Na zemský povrch dopadá přímé a rozptýlené sluneční záření. Vlivem proměnlivé vzdálenosti Země od Slunce se intenzita přímého záření mění během roku o $\pm 3,3\%$. Část vyzařované sluneční energie je absorbováno tenkou povrchovou vrstvou vody nebo půdy a následně se přeměňuje v teplo. Množství pohlcené energie závisí na úhlu dopadajících paprsků. Úhel dopadu slunečních paprsků na povrch Země má výrazně větší vliv než hodnota změny vzdálenosti Slunce-Země. Toto záření se zúčastní v důležitých jevech naší planety jako jsou vypařování vod oceánů, proudění vzduchu, konvekce (šíření tepla), fotosyntéza a další biologické reakce. [1, 2, 3]



Obrázek 1.1 Šíření slunečního záření v závislosti na meziplanetární vzdálenosti [20]

Země obíhá kolem Slunce po eliptické dráze jednou za 365 dní. V zimním období od začátku ledna je planeta nejbližší ke Slunci a její vzdálenost je $14,7 \cdot 10^7 \text{ km}$ – perihelium. Na začátku července je tato vzdálenost $15,2 \cdot 10^7 \text{ km}$ – aphelium. Střední vzdálenost mezi Sluncem a Zemí je $14,95 \cdot 10^7 \text{ km}$ a je definována jako „Astronomická jednotka“ (Astronomical unit – AU), která se používá ve pro určení vzdáleností ve sluneční soustavě. Ve vzdálenosti 1 AU je úhlová velikost Slunce ze Země $32'$. [2, 3, 22]

1.2 Albedo

Poměr množství odraženého záření k celkovému množství záření, které dopadá na zemský povrch se nazývá albedo (též odrazivost) a je závislé na vlastnostech samotného povrchu. Půdní albedo je určeno mnoha půdně závislými a environmetálními

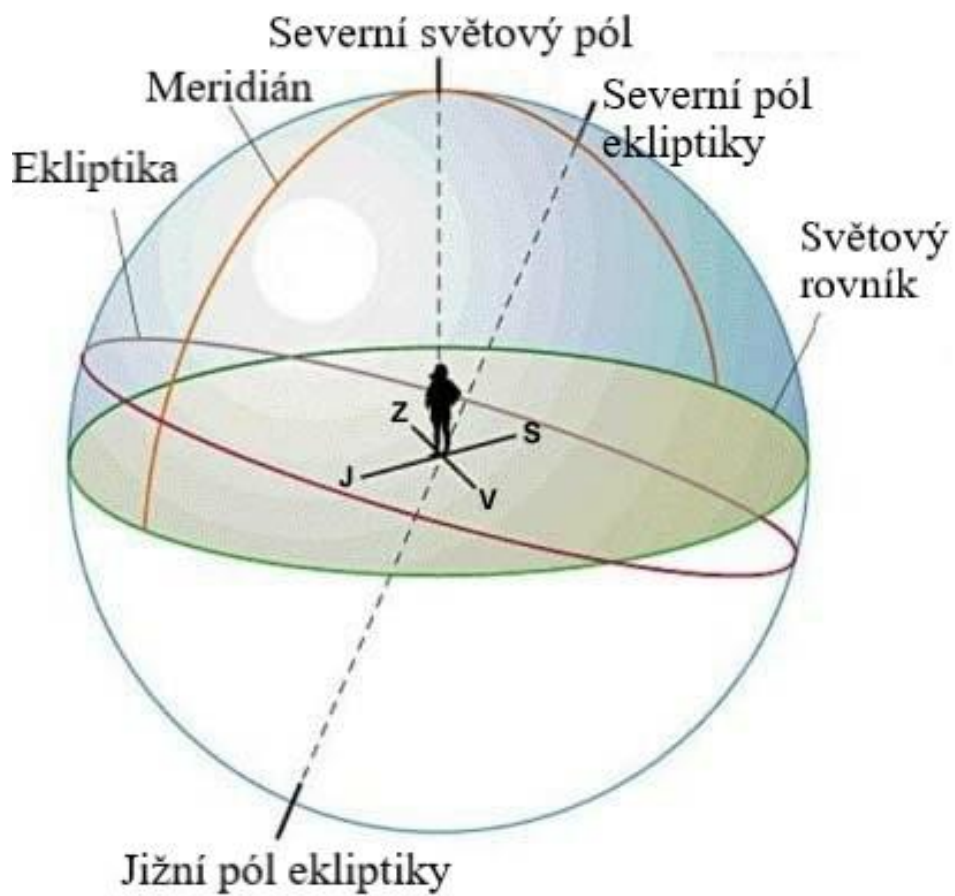
charakteristikami. Albedo oblaků je stanoveno jejich druhem, tloušťkou a úhlem osvětlení. Hodnota albeda je stanovena v rozmezí od 0 do 1. Hodnota 0 odkazuje na černé těleso absorbující 100 % dopadající záření. Hodnota 0,1 až 0,2 se vztahuje k tmavě zbarveným nerovným povrchům, 0,4 – 0,5 označuje světlé a hladké povrchy. Rozmezí 0,5 až 0,9 patří k nejsvětlejším povrchům jako jsou oblaky, voda, sníh a led. Hodnota 1 představuje absolutně bílý povrch, od kterého se veškeré dopadající na povrch záření odráží zpět. Průměrné albedo Země je v rozmezí $0,36 \pm 0,06$. Albedo hraje důležitou roli v energetické bilanci zemského povrchu. Dále je zobrazená tabulka hodnot albeda nejpoužívanějších povrchových materiálů na Zemi. [4, 5, 6, 22]

Tabulka 1.2 Albedo zemních materiálů (odrazivost) [6, 22]

Látka	Albedo [-]	Látka	Albedo [-]
Celá planeta	0,31	Písek	0,35
Cirrusové mraky	0,50	Tmavá půda	0,10 - 0,20
Kumulonimbové mraky	0,90	Suchá písčítá půda	0,25 - 0,45
Stratokumulusové mraky	0,60	Suchá jílová půda	0,15 - 0,35
Voda	0,06 - 0,10	Granit	0,3 - 0,35
Led a sníh	0,70 - 0,90	Beton	0,10 - 0,35
Travnaté pozemky	0,18 - 0,25	Asfalt	0,05 - 0,20
Listnatý les	0,15 - 0,18	Červená/hnědá dlaždice	0,10 - 0,13
Jehličnatý les	0,09 - 0,15	Smůla a štěrk	0,08 - 0,20
Tropický les	0,07 - 0,15	Cihla a kámen	0,20 - 0,40

1.3 Cesta Slunce po zemské obloze

Země obíhá kolem své osy s konstantní rychlostí jednou za 24 hodin. Rotace ve východním směru dává iluzi, že Slunce se pohybuje opačně. Ekliptika je dráha z východu na západ, po které se během roku pohybuje Slunce po obloze. Ekliptika má tvar kružnice, která protíná rovník ve dvou místech – v jarním a podzimním bodě. Rovina ekliptiky prochází středem Slunce a Země a průměrná rychlost pohybu Slunce po ekliptice je necelý 1° za den. Osa rotace Země má náklon $23,45^\circ$ vůči ploše ekliptiky a zůstává konstantní během celého roku. Maximální úhel výšky Slunce nad obzorem se mění během roku a z tohoto důvodu se mění doba trvání dne. Změna ročních období je taky závislá na náklonu planety k ploše ekliptiky. Je-li severní osa namířená směrem ke Slunci je letní období na severní polokouli. Je-li severní osa namířená směrem od Slunce je na severní polokouli zima. [7, 9, 10, 22]



Obrázek 1.2 Model Země s vyznačenou rovinou Ekliptiky [7]

2. JADERNÁ SYNTÉZA

2.1 Proces jaderné syntézy

V šedesátých letech 20. století jaderná energie byla přidána do řady konvenčních zdrojů energie. Teplota uvnitř Slunce, která činí $15 \cdot 10^6$ K v kombinaci s tlakem, který je $70 \cdot 10^9$ krát větší než atmosférický tlak Země tvoří ideální podmínky pro reakce jaderné syntézy. Jaderná syntéza spočívá ve sloučení jader dvou lehkých prvků, které se spojí do jádra těžšího. Klidová energie těžšího jádra je menší než součet klidových energií lehčích jader. Termojaderná syntéza tvoří zářivý výkon Slunce. Tento proces je zaměřen na sloučení čtyř jader vodíku (protony p^+) tak, aby následně vytvořily jedno jádro helia (α částice). Každou sekundu se ve slunečním jádru spojí 620 milionů tun jader vodíku a přeměňují se v jádra helia. Během tohoto procesu se uvolňuje kolem $3,8 \cdot 10^{26}$ J energie ve formě gama záření. Alfa částice se skládají z dvou kladně nabitých protonů p^+ a z dvou neutronů. Samotná reakce sloučení čtyř jader atomů vodíku do jednoho jádra atomu helia produkuje dva pozitrony e^+ a dvě neutrina ν_e s následnou generací energie: [8, 10, 22]

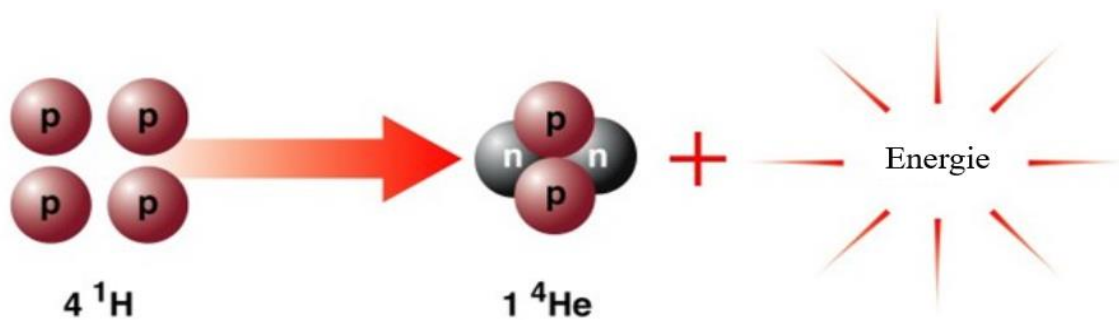


Tabulka 2.1 Hmotnosti některých částic a nuklidů [6, 22]

Částice/nuklid	Hmotnost [kg]	Částice/nuklid	Hmotnost [kg]
Elektron	$9,1094 \cdot 10^{-31}$	Vodík	$1,6736 \cdot 10^{-27}$
Proton	$1,6726 \cdot 10^{-27}$	Hélium	$6,6465 \cdot 10^{-27}$
Neutron	$1,6749 \cdot 10^{-27}$	Alfa částice	$6,6447 \cdot 10^{-27}$

Porovnáním atomových hmotností částic před a po reakci lze zjistit, že celková hmotnost po reakci je snížena. Hmotnost neutrin je v této rovnici zanedbatelná a hmotnost pozitronů e^+ je stejná jako hmotnost elektronů e^- , hmotnostní rozdíl Δm lze spočítat podle vzorce: [8, 10, 22]

$$\Delta m = 4 \cdot m({}^1p) - m({}^4\alpha) - 2 \cdot m(e^+). \quad (2.2)$$



Obrázek 2.1 Syntéza čtyř jader vodíku za vzniku jádra hélia [23]

Celková hmotnost po syntéze je menší než před syntézou o hodnotu vazební energie. Hmotnostní rozdíl se následně přemění v energii: [22]

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2, \quad (2.3)$$

kde rychlost světla $c = 2,99792458 \cdot 10^8$ m/s. Rovnice určuje uvolnění energie jadernou syntézou $\Delta E = 3,955 \cdot 10^{-12}$ J = 24,687 MeV. Vazební energie jádra E_b vysvětluje různé hmotnosti částic po syntéze a také jejich energetický rozdíl. Atomová jádra tvoří neutrony ${}^1_0\text{n}$ a protony ${}^1_1\text{p}$. Aby byl udržen rovnovážný stav musí být během syntézy jader uvolněna vazební energie. Rozdíl hmotnosti dvou neutronů společně s dvěma protony a alfa částicí stanovuje velikost hodnoty uvolněné energie. Dva pozitrony vzniklé při této jaderné syntéze anihilují s dvěma elektrony a přetvoří se na energii rovnou 2,044 MeV (což je energie, která je ekvivalentní čtyřnásobku hmotnosti elektronu). Celkové množství uvolněné energie v průběhu reakce je 26,731 MeV. Při termojaderné syntéze Slunce ztrácí 4,3 milion tun hmotnosti za sekundu, což je podmínkou vzniku solárního zářivého výkonu: [8, 10, 22]

$$\varphi_{e,S} = \Delta m \cdot c^2 = 3.845 \cdot 10^{26} \text{ [W]}. \quad (2.4)$$

Hodnota výkonu je rozložena po slunečním povrchu A_S a je dána emisí slunečního záření:

$$M_{e,S} = \frac{\varphi_{e,S}}{A_S} = 63,11 \text{ [MW/m}^2\text{]}. \quad (2.5)$$

Každý čtverečný metr slunečního povrchu vyzařuje zářivý výkon o hodnotě 63,11 MW. Jedna pětina čtverečního kilometru plochy slunečního povrchu ročně vyzáří 400 EJ. Množství této energie je rovnocenné roční energetické poptávce lidstva na Zemi. Takoveto sluneční záření může být přiblíženo k hodnotě záření absolutně černého tělesa, platnost kterého udává Stefan–Boltzmannův zákon: [8, 22]

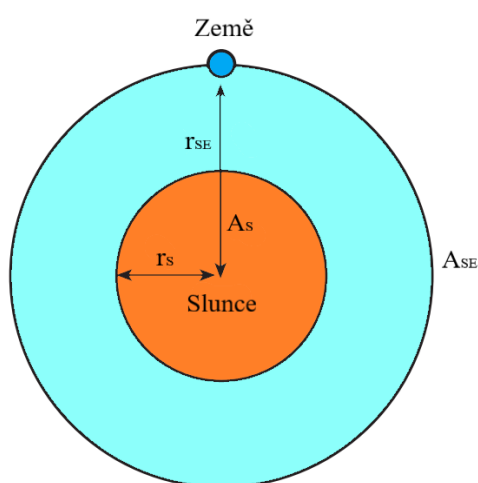
$$M_e(T) = \sigma \cdot T^4 \text{ [W/m}^2\text{]}, \quad (2.6)$$

kde $\sigma = 5,6705 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ je Stefan–Boltzmannova konstanta a lze tento zákon použít k odhadu hodnoty povrchové teploty Slunce T_{SUN} : [8, 10, 22]

$$T_{SUN} = \sqrt[4]{\frac{M_{e,S}}{\sigma}} = 5777 \text{ [K]}. \quad (2.7)$$

Uvažujeme povrch koule A_{SE} se středem uprostřed Slunce o průměrné vzdálenosti Země a Slunce ($r_{SE} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$), hodnota celkového zářivého výkonu bude stejná jako na povrchu Slunce A_S . Z povrchu Slunce se uvolňuje záření $M_{e,S}$. Intenzita tohoto záření je mnohem vyšší než v prostoru obklopujícím Slunce: [8, 10, 22]

$$E_e = M_{e,S} \cdot \frac{A_S}{A_{SE}} = M_{e,S} \cdot \frac{r_S^2}{r_{SE}^2}. \quad (2.8)$$



Obrázek 2.2 Znázornění r_S (poloměr Slunce), r_{SE} (průměrná vzdálenost Země-Slunce), A_S (povrch Slunce), A_{SE} (povrch koule se středem uprostřed Slunce o poloměru r_{SE}) pro výpočet E_e intenzita záření dopadajícího na zemský povrch [10, 22]

Zářivý výkon na povrchu koule o poloměru r_{SE} je stejný jako na povrchu Slunce. Tímto způsobem lze stanovit intenzitu slunečního záření vyskytující se na orbitální vzdálenosti Země – Slunce. Různá vzdálenost během roku mezi Zemí a Sluncem způsobuje změnu dopadajícího záření E_e na zemský povrch mezi 1325 W/m^2 a 1420 W/m^2 . Průměrná hodnota vyjadřující množství dopadajícího záření se nazývá sluneční konstanta E_0 a je rovna: [8, 10, 22]

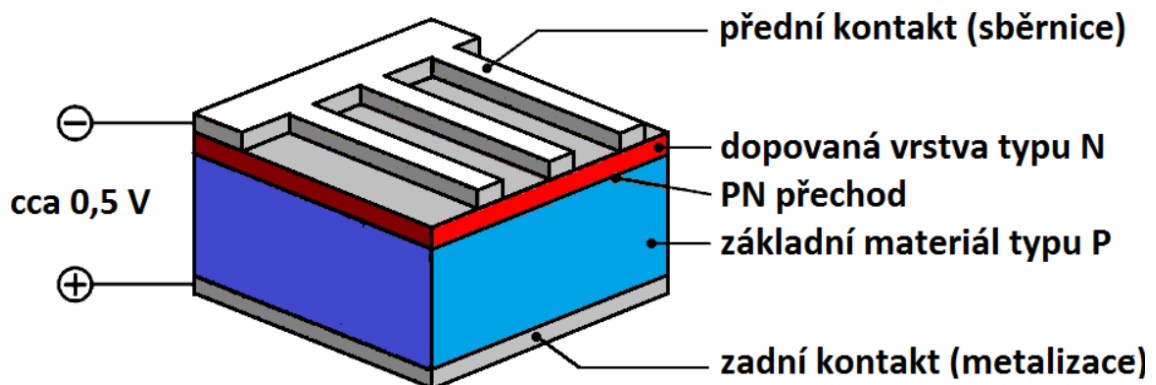
$$E_0 = 1367 \pm 2 \text{ [W/m}^2\text{]}. \quad (2.9)$$

3. FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY

3.1 Fotovoltaické články a jejich vlastnosti

Podle materiálů použitých pro výrobu fotovoltaických článků je lze rozdělit do 3 hlavních skupin:

- Organické materiály – materiály na bázi uhlíku (plasty). Jsou příjemné na zpracování a mají velmi malou tloušťku. Hlavní výhodou organických solárních panelů je jejich ohebnost a pružnost. Nevýhodou je velmi malá účinnost (3–6 %).
- Anorganické materiály – materiály na bázi křemíku. Vykazují dobrou stabilitu a životnost, ale jejich výroba je dražší a komplikovanější záležitost.
- Organicko-anorganické tzv. hybridní materiály pro solární články – perovskity. Výhodou této kombinace je větší účinnost. [11]



Obrázek 3.1 Struktura fotovoltaického článku [11]

Součásti fotovoltaického článku jsou:

- Napájení
- Přední kontakt – odvádí nosiče náboje z fotovoltaického článku. U krystalických panelů je tvořen sběrníci, která se nanáší sítotiskem. U tenkovrstvých panelů je přední kontakt tvořen TCO (Transparentní vodivý oxid).
- Polovodič typu N – polovodičový materiál s převahou elektronů.
- PN přechod – prostřední oblast mezi polovodiči typu N a P.
- Polovodič typu P – polovodičový materiál s převahou děr.
- Zadní kontakt – stejně jako přední kontakt odvádí nosiče náboje z fotovoltaického článku. [11]

Důležitými parametry pro fotovoltaické články jsou:

- Napětí otevřeného obvodu U_{OC} – je napětí naprázdno, bez připojení jakékoliv zátěže.
- Proud nakrátko I_{SC} – stejnosměrný proud. Maximální možný proud dodaný panelem při dané intenzitě světla. [11]

3.2 Typy křemíkových fotovoltaických panelů

V současné době jsou nejvíce rozšířeny křemíkové fotovoltaické panely. Tyto panely na bázi křemíku lze rozdělit na tři skupiny: [12]

Panely z monokrystalického křemíku – pro výrobu tohoto typu článku je nutné vyrobit jednolitý ingot křemenného krystalu. Jednotná a velice čistá struktura krystalu je docela náročná a poměrně drahá záležitost. Tento kulatý ingot se pak řeže na wafery, které se následně upravují na požadovanou velikost fotovoltaických článků (156 x 156 mm). Tyto články mají nejdokonalejší strukturu a vzhled. [13]

Panely z polykrystalického křemíku – pro výrobu tohoto typu článku je nutné nechat vykristalizovat některé množství menších křemíkových krystalů, ze kterých se vytvoří substrát slisující do jednoho celku. Z něhož pak řežou wafery s následnou úpravou na požadovanou velikost. Vzhled a struktura těchto článků není taková ideální ve srovnání s monokrystalickým křemíkem a kvůli nedokonalé čistotě materiálu jsou viditelné přechody mezi krystaly. [13]

Panely amorfnní na bázi tenkých vrstev – amorfnní křemík v tenké vrstvě je nanesen na určitou podložku. Postup výroby se velice liší na rozdíl od předchozích typů. Ve vakuové komoře za teplot kolem 200 °C je napařením nanесena tenká vrstva amorfnního křemíku na požadovaný typ podložky (fólie, sklo, plasty nebo kovy). Tyto články nejsou velice účinné a jejich výhody oproti krystalickým článkům jsou lepší citlivost na rozptýlené sluneční záření a pomalejší pokles účinnosti s rostoucí teplotou. [11, 12, 14]

Křemík jako materiál pro solární techniku má mnoho výhod. Hlavní výhodou je to, že tento materiál je jedním z nejrozšířenějších prvků a je docela bohatě zastoupen v zemské kůře, z těchto důvodů je snadno dostupný a relativně levný. Další výhodou je z hlediska elektrotechnické výroby. Není jedovatý a je nejlépe prozkoumaným a nejvíce používaným polovodičem. Oxid křemičitý (SiO_2) neboli křemen, který se vyskytuje v přírodě je chemicky stabilní a mechanicky odolným materiálem. Jednoduše lze říct, že fotovoltaický článek je tzv. “velkoplošnou diodou“ a jako pro výrobu libovolné diody je vyžadován polovodič. [12]

Výroba polovodičového křemíku je velice složitější proces. Surový křemík se vyrábí z písku redukcí uhlíkem v obloukové peci, která podporuje velké množství chemických reakcí. Do obloukové pece se shora kontinuálně vpravuje písek, který je promíchán s mletým karbonizovaným uhlím. Pak dolním směrem stoupá teplota a v jednotlivých úrovních probíhají chemické reakce. Při teplotě kolem 2000 °C začíná proces hromadění

roztaveného křemíku, který se následně v pravidelných intervalech odlévá. Těmito kroky je získáván surový křemík metalurgické kvality o čistotě 98–99 %. Další 1 % tvoří nečistoty příměsi Al, Fe a C. Pro polovodičové technologie je potřebný křemík o kvalitě 99,9999 % až 99,9999999 %, což vyžaduje složitější procesy čištění. Křemík polovodičové čistoty se získává z křemíku metalurgické čistoty, který je následně převeden na plyn trichlorsilan (HSiCl_3) při teplotě 300 °C, čímž se odstraňuje největší část nečistot. Následně tento plyn se míchá s dalšími plynnými chloridy a prochází několikanásobnou destilací. Těmito procesy získává křemík polovodičové čistoty 99,9999999 %. Trichlorsilan je velice toxickou látkou a na vzduchu je samovznětlivý. Dále v autoklávu za působení pyrolytické reakce tento velice čistý křemík přemění na polykrystalický křemík a následně narůstá na křemíkovou tyč. Tato tyč je vstupním materiálem pro Czochralského metodu. [11, 12, 21]

3.3 Křemík a jeho vlastnosti

Atom křemíku je druhý nejrozšířenější element v zemské kůře. Obsahuje čtrnáct elektronů, je tvrdý krystalický materiál s krystalovou strukturou podobnou diamantu. Vykazuje odolnost vůči vlivům vlhkosti a vzdušného kyslíku a je málo reaktivní za běžných teplot (při vyšších teplotách na vzduchu hoří). Vnější energetická úroveň je obsazena čtyřmi elektrony, které určují valenci prvku. Energie volného elektronu může nabývat libovolných hodnot, protože nepodléhá působení žádných sil. Naproti tomu energie elektronu v krystalu křemíku nabývá pouze určitých hodnot v důsledku pohybu v poli periodického potenciálu. Tyto energetické hladiny jsou rozděleny do pásů dovolených energií. Avšak pásy dovolených energií jsou odděleny pásy zakázaných energií. V tomto případě významnou roli hraje pás valenční, poslední zakázaný pás a vodivostní pás (za velmi nízkých teplot je první neobsazený). [11, 21]

Valenční pás sestává z energetických stavů valenčních elektronů. Kvůli tomu, že těchto stavů je stejný počet jako valenčních elektronů v celém krystalu, všechny obsazené stavy budou na velmi nízkých teplotách. Po valenčním pásu pak bude následovat pás zakázaných energií. Toto znamená, že žádný elektron nemůže mít energii odpovídající stavu v tomto pásu. Dále následuje pás vodivostní. Jehož stavy nejsou obsazené za velmi nízkých teplot. Uvnitř pásů dovolených energií jsou neměřitelně malé rozdíly mezi jednotlivými energetickými hladinami. [11, 21]

Křemík je nejpoužívanější element v mikroelektronice a má velmi široký rozsah použití. Ve fotovoltaice se používá pro výrobu solárních článků. V solárních článcích křemík jako základní prvek vykazuje stabilitu a vysoké hodnoty účinnosti vzhledem k tomu, že z hlediska šířky zakázaného pásu ($E_G \approx 1,1 \text{ eV}$) se dá dosáhnout vysoké generace volných nosičů. [11, 21]

3.4 Solární kolektory

Na rozdíl od fotovoltaického článku solární kolektor slouží k přeměně dopadajícího slunečního záření na tepelnou energii. Tato přeměna je způsobena absorpcí dopadajícího slunečního záření plochou absorptéru. Materiál absorptéru je hliník, přivařený na měděný trubkový sběrač. V tomto sběrači proudí nemrznoucí směs a odvádí teplo z absorptéru do výměníku tepla. Nejvhodnější absorpční vrstvou z hlediska lepší účinnosti systému je selektivní absorpční vrstva, která je schopná lépe zachytit sluneční záření a přenášet přes absorptér do výměníku více tepelné energie. Sklo kolektoru je prizmatické, tvrzené a s nízkým obsahem železa, což zaručuje dobrou odolnost vůči vnějším okolním vlivům a velkou propustnost záření. Krycí solární sklo umožňuje dopad slunečního záření na absorptér. Jako izolační materiál slouží polyuretanová pěna (PUF). Solární kolektory se spojují mezi sebou mosaznými šroubeními. Propojení absorptéru se sběračem se realizuje lisováním, laserovým propojováním či ultrazvukovým svařováním. Solární kolektory lze rozdělit na ploché a trubkové. [15, 16, 17, 18]



Obrázek 3.2 Solární kolektor [18]

4. VÝPOČET POLOHY SLUNCE

4.1 Poloha Slunce v poledne

Slunce vychází na východě a zapadá na západě. Svého nejvyššího bodu dosahuje Slunce uprostřed dne. Je užitečně mít možnost stanovit kde na obloze bude Slunce v určitý okamžik, v jakémkoli místě a ve kterémkoli dne roku. Pro tento účel slouží různé algoritmy, podle kterých lze předpovědět polohu Slunce. Znalost solárních úhlů dává možnost a prostor pro výběr a konstrukci solárních panelů. [19]

Nejprve se podíváme na polohu Slunce po obloze v poledne. Výpočet solární deklinace, což je úhel mezi rovinou rovníku a spojnicí mezi centrem Slunce a Země. Sinusový vztah přepokládá 365denní rok s jarní rovnodenností v 81 dne roku: [19]

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[\frac{360}{365} \cdot (n - 81) \right] [^\circ]. \quad (4.1)$$

Jedním z nejdůležitějších solárních úhlů je maximální úhel výšky Slunce nad obzorem β_N . Je to úhel mezi Sluncem a místním horizontem v poledne: [19]

$$\beta_N = 90^\circ - L + \delta [^\circ], \quad (4.2)$$

kde L je zeměpisná šířka. Následně je úhel sklonu fotovoltaického modulu v poledne, na který se kolmo dostávají sluneční paprsky: [19]

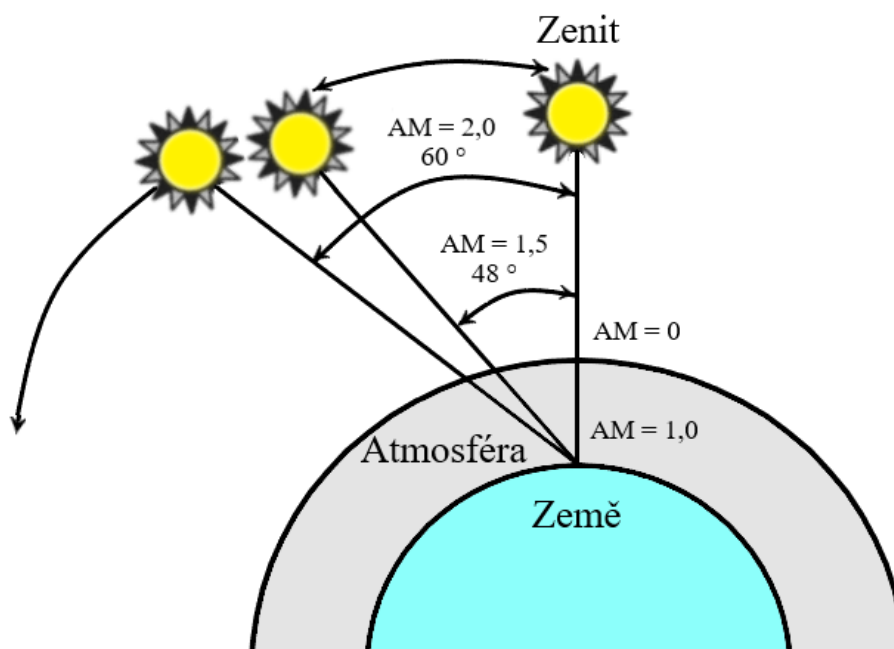
$$Tilt = 90^\circ - \beta_N [^\circ]. \quad (4.3)$$

Vzduchová hmota (Air Mass = AM) představuje poměr mezi hmotou atmosféry, kterou prochází dopadající sluneční záření ke hmotě, kterou by prošlo, kdyby Slunce bylo v zenitu: [19]

$$AM = \frac{1}{\sin \beta_N} [-]. \quad (4.4)$$

Nejdůležitější hodnoty AM jsou:

- AM = 0 [-] mimo atmosféry Země,
- AM = 1,0 [-] Slunce v zenitu, $\beta_N = 90^\circ$,
- AM = 1,5 [-] Zenitový úhel se rovná 48° ,
- AM = 2,0 [-] Zenitový úhel se rovná 60° , $\beta_N = 30^\circ$.



Obrázek 4.1 Přehled hodnot Air Mass

4.2 Sluneční čas a hodinový čas

Pro práci se slunečním zářením je třeba znát tzv. sluneční čas (Solar Time – ST). Ten se dá spočítat z tzv. hodinového času (Clock Time – CT). [19]

Pro spojení těchto dvou hodnot je třeba provést pár úprav. Za prvé jde o korekce zeměpisné délky, která je souvislá s tím, jak oblasti světa jsou rozděleny na časové pásma. Za druhé je to korekce, který je potřeba uvést kvůli nerovnoměrnosti pohybu Země kolem Slunce. [19]

Je Země nominálně rozdělena na 24 časových pásem, přičemž v ideálním případě každé časové pásmo pokrývá 15° zeměpisné délky. Čas na hranicích těchto pásem se mění o jednu hodinu. Takovýmto způsobem se lze zbavit komplikací se zeměpisnou délkou. Každé časové pásmo je definováno místním časovým poledníkem, který by se měl v ideálním případě nacházet uprostřed zóny časového pásma. Výchozí bod tohoto časového systému pochází z Greenwiche na 0° zeměpisné délky. [19]

Korekce zeměpisné délky mezi hodinovým časem a slunečním časem je založena na době za kterou Slunce projde cestu mezi místním časovým poledníkem a přímkou zeměpisné délky pozorovatele. V případě, že na poledníku místního času je sluneční poledne, bude sluneční poledne o 4 minuty později za každý stupeň, na kterém je pozorovatel západně od tohoto poledníku. [19]

Další úprava mezi hodinovým časem a slunečním časem je výsledkem eliptické dráhy Země. Tato dráha způsobuje změnu slunečního dne během roku. Při pohybu Země po své eliptické dráze rozdíl mezi 24 hodinovým dnem a slunečním dnem se mění v souvislosti s tzv. časová rovnice E. [19]

$$E = 9,87 \cdot \sin 2B - 7,53 \cdot \cos B - 1,5 \cdot \sin B \text{ [min]}, \quad (4.5)$$

kde B se rovná:

$$B = \frac{360}{364} \cdot (n - 81) [-], \quad (4.6)$$

kde n je číslo dne.

Spojením časové rovnice a korekce zeměpisné délky lze určit konečný vztah mezi hodinovým časem (CT) a slunečním časem (ST): [19]

$$\begin{aligned} \text{Sluneční čas (ST)} = \text{Hodinový čas (CT)} + \left(\frac{4 \text{ minuty}}{\text{stupeň}} \cdot \right. \\ \left. (\text{místní časový poledník} - \text{místní zeměpisná délka})^\circ + \right. \\ \left. E(\text{min}) \right) \text{ [hod]}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

V letě je nutné připočítat k místnímu času jednu hodinu. [19]

4.3 Poloha Slunce v libovolném čase a místě

Polohu Slunce v kteroukoli dobu lze popsat pomocí úhlu výšky Slunce nad obzorem a solárního azimutu. Solární azimut má kladnou hodnotu v ranním období, když Slunce je na východě. Záporná hodnota úhlu solárního azimutu je od odpoledne po přemístění Slunce na západ. [19]

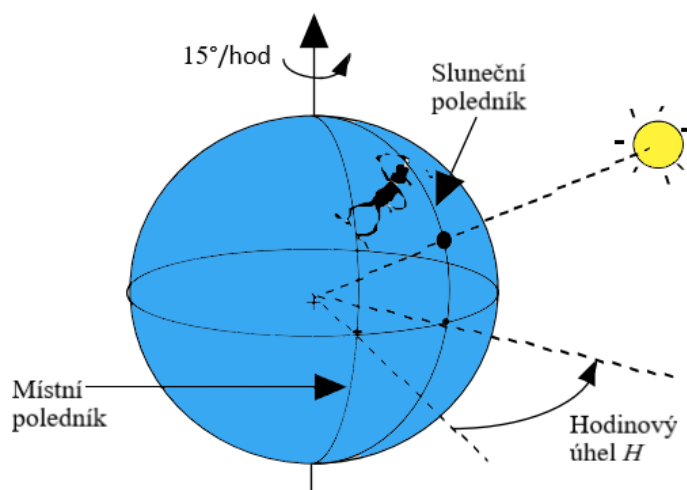
Úhel výšky Slunce nad obzorem je závislý na denní době, pořadí dne v roce a zeměpisné šířce. Vztah pro výpočet úhlu výšky Slunce nad obzorem β a solárního azimutu φ_s : [19]

$$\sin \beta = \cos L \cdot \cos \delta \cdot \cos H + \sin L \cdot \sin \delta \text{ [}^\circ\text{]}, \quad (4.8)$$

$$\sin \varphi_s = \frac{\cos \delta \cdot \sin H}{\cos \beta} \text{ [}^\circ\text{]}. \quad (4.9)$$

Následně se bude uvažovat čas jako počet hodin před anebo po poledni. Takže 10 hodin znamená čas o dvě hodiny před překročením místního poledníku Sluncem. Hodinový úhel H udává rozdíl mezi slunečním poledníkem a místním poledníkem v úhlových stupních. Kladné hodnoty tohoto úhlu jsou ráno, tj. do překročení místního poledníku Sluncem. Země se otáčí kolem své osy jednou za 24 hodin o 360° nebo 15° každou hodinu: [19]

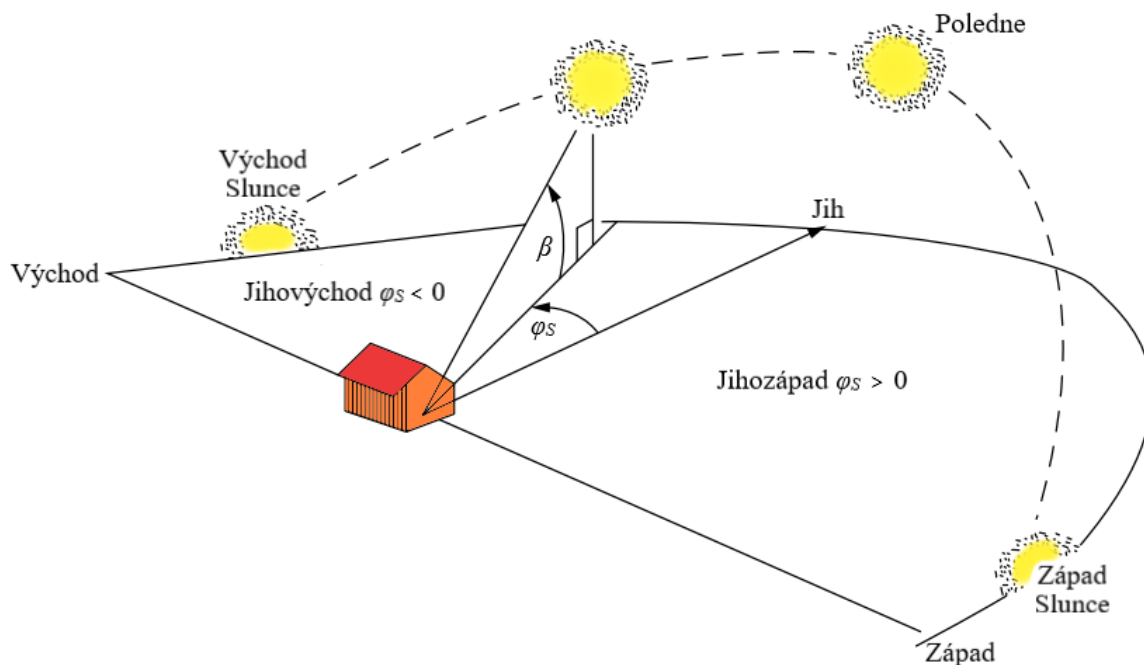
$$\text{Hodinový úhel } H = \left(\frac{15^\circ}{\text{hodina}} \right) \cdot \text{čas před slunečním polednem [}^\circ\text{]}. \quad (4.10)$$



Obrázek 4.2 Hodinový úhel jako rozdíl mezi slunečním poledníkem a místním poledníkem [19]

Během jara a léta brzo ráno a pozdě odpoledne velikost slunečního azimutu je větší než 90° od jihu (to se nikde nestane na podzim a v zimě). Protože inverze funkce $\sin x$ je dvojnásobná $\sin x = \sin(180-x)$, potřebujeme testovat, jestli azimut je větší nebo menší než 90° vůči jihu. Tento test reprezentuje rovnice: [19]

$$\text{Pokud } \cos H \geq \frac{\tan \delta}{\tan L}, \text{ pak } |\varphi_S| \leq 90^\circ, \text{ jinak } |\varphi_S| > 90^\circ. \quad (4.11)$$

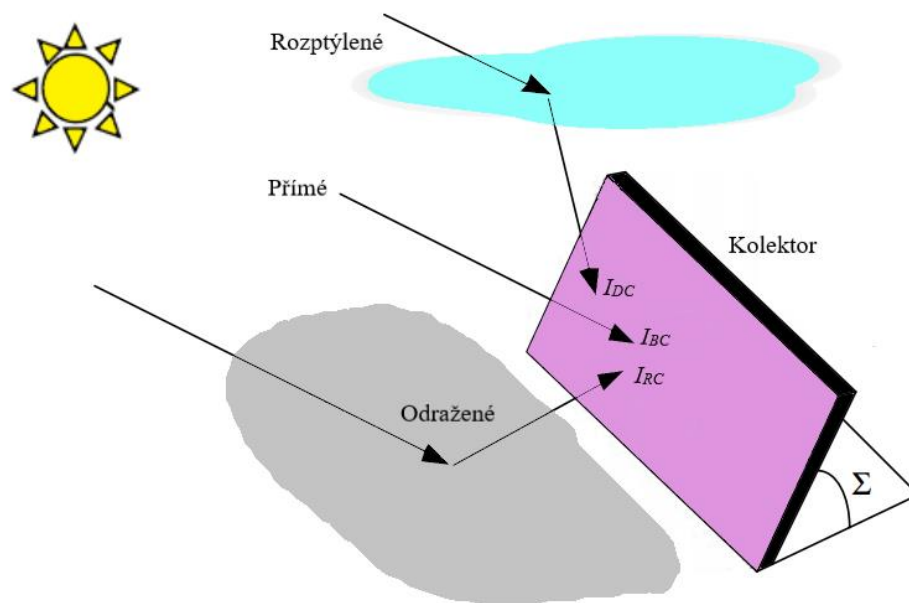


Obrázek 4.3 Úhel výšky Slunce nad obzorem β a solární azimut φ_S v závislosti na poloze Slunce [19]

5. VÝPOČET JEDNOTLIVÝCH SLOŽEK SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ

5.1 Přímé záření

Sluneční záření dopadající na fotovoltaický panel je složeno z přímého záření procházejícího atmosférou, rozptýleného záření a záření odraženého. [19]



Obrázek 5.1 Druhy záření dopadajících na solární kolektor [19]

I_0 je sluneční záření před vstupem do zemské atmosféry: [19]

$$I_0 = SC \cdot \left[1 + 0,034 \cdot \cos \left(\frac{360 \cdot n}{365} \right) \right] [W/m^2], \quad (5.1)$$

kde n je pořadové číslo dne a SC je sluneční konstanta, což je odhad průměrného slunečního záření za rok. [19]

Když sluneční záření prochází atmosférou jeho velká část je rozptýlena molekulami vzduchu nebo je absorbována různými atmosférickými plyny. Během roku necelá polovina záření zasahujícího do horní části atmosféry dopadá na zemský povrch jako přímé záření. Za podmínky jasného dne a nejvyšší polohy Slunce na obloze je podíl přímého záření 70 % z celkového Slunečního záření. Přímé záření dopadající na povrch Země I_B se spočítá: [19]

$$I_B = I_0 \cdot e^{-\frac{Z}{\varepsilon}} [W/m^2]. \quad (5.2)$$

Součinitel znečištění atmosféry Z udává kolikrát by musela být atmosféra hmotnější, aby měla stejnou propustnost pro sluneční záření jako má znečištěná atmosféra. Jinými

slovy popisuje snížení toku slunečního záření průchodem atmosférou. Přehled hodnot průměrných měsíčních hodnot součinitele znečištění atmosféry pro oblasti s rozdílnou čistotou ovzduší jsou uvedeny v následujícím pořadí:

- Horské oblasti $Z \approx 2$ [-],
- Venkov $Z \approx 3$ [-],
- Města $Z \approx 4$ [-],
- Průmyslové oblasti $Z \approx 5$ [-].

$$\varepsilon = \frac{9,38076 \cdot [\sin \beta + (0,003 + \sin^2 \beta)^{0,5}]}{2,0015 \cdot [1 - (L_v \cdot 10^{-4})]} + 0,91018 \text{ [-]}, \quad (5.3)$$

kde β udává hodnotu výšky Slunce a L_v je nadmořská výška daného místa [m].

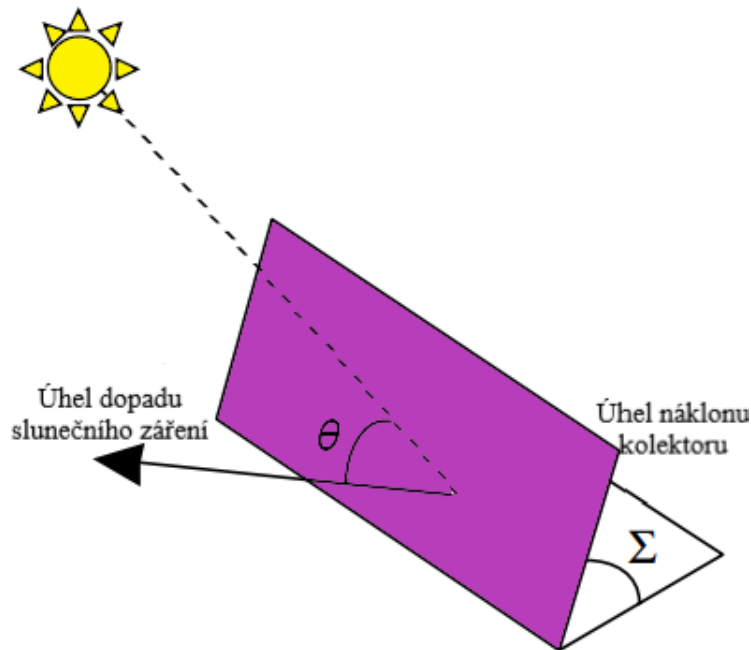
Poměr mezi hmotou atmosféry, kterou prochází sluneční záření ke hmotě, kterou by prošlo, kdyby Slunce bylo v zenitu (kolmý dopad paprsků) vyjadřuje parametr AM (viz vzorec 4.4) [19]

Pokud přímé záření I_B dopadá na plochu kolektoru nebo fotovoltaického modulu výsledné záření I_{BC} je funkcí úhlu θ , což je úhel dopadajícího slunečního záření mezi normálou k ploše kolektoru a dopadajícím zářením: [19]

$$I_{BC} = I_B \cdot \cos \theta \text{ [W/m}^2\text{]}, \quad (5.4)$$

nebo pro výjimečný případ, který platí pro oslunění kolektoru umístěným ve vodorovné poloze: [19]

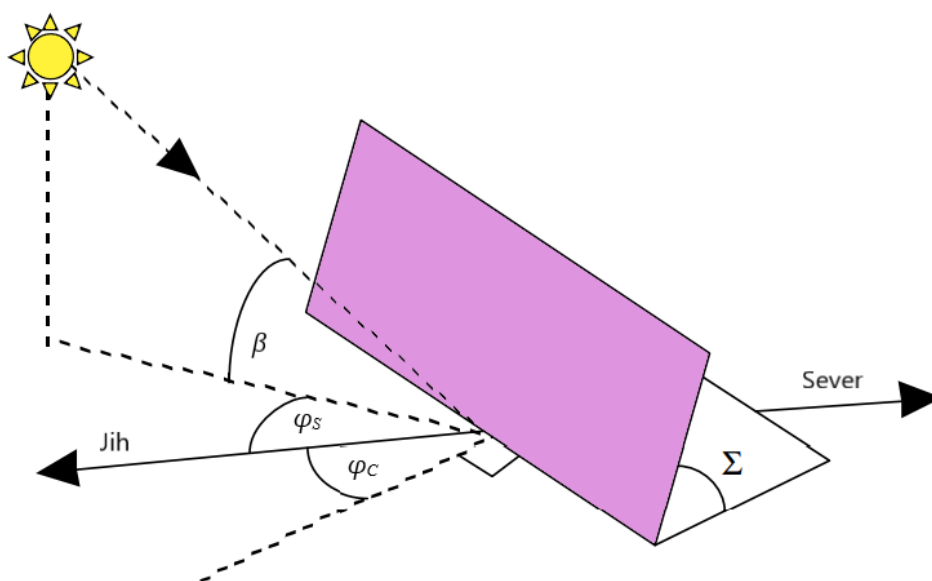
$$I_{BH} = I_B \cdot \cos(90^\circ - \beta) = I_B \cdot \sin \beta \text{ [W/m}^2\text{]}. \quad (5.5)$$



Obrázek 5.2 Úhel dopadu θ mezi normálou k ploše kolektoru a dopadajícím slunečním zářením [19]

Úhel dopadu θ je úhlem mezi normálou k ploše kolektoru a dopadajícím slunečním zářením. Tento úhel je funkcí orientace kolektoru, solárního azimutu a úhlu výšky slunce nad obzorem v určitý okamžik. Solární panel nebo kolektor by měly být nakloněny pod úhlem v určitém směru. Tento směr popisuje azimutální úhel kolektoru φ_C , který je změřen v poměru k jihu s kladnou hodnotou v jihovýchodním směru a zápornou hodnotou v jihozápadním směru. Σ je úhel sklonu kolektoru a úhel dopadu θ se vyjadřuje vztahem: [19]

$$\cos \theta = \cos \beta \cdot \cos(\varphi_S - \varphi_C) \cdot \sin \Sigma + \sin \beta \cdot \cos \Sigma. \quad (5.6)$$



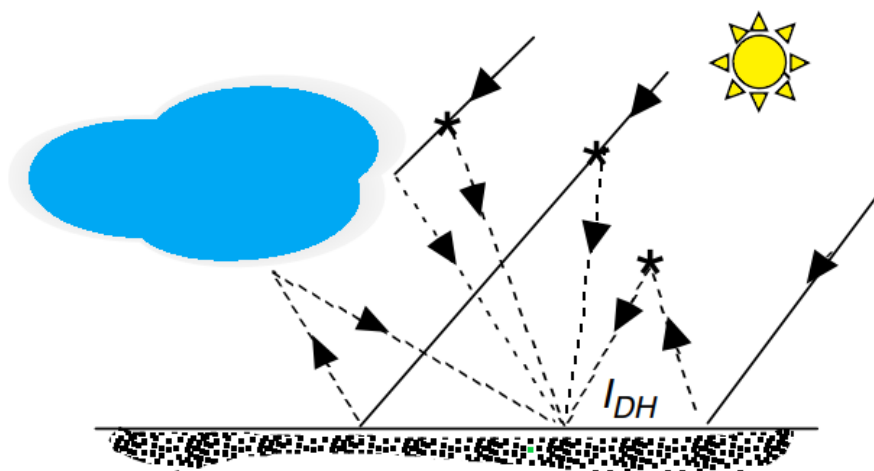
Obrázek 5.3 Přehled dopadajících úhlů slunečního záření [19]

5.2 Rozptýlené záření

Ve srovnání s přímým zářením rozptýlené neboli difúzní záření je mnohem těžší přesně odhadnout. Měly by být uvažovány všechny složky ze kterých se skládá rozptýlené záření. Dopadající záření může být rozptýleno vlhkostí a částicemi v atmosféře a také se může odrážet od molekul plynů, prachu a mraků. Další část se odráží od zemského povrchu od půdy, vody nebo trávy zpět do oblohy a opět se rozptyluje směrem k zemskému povrchu. Rozptýlené záření přichází na místo se stejnou intenzitou ze všech směrů. Během jasného dne kolem 15 % z celkového dopadajícího záření bude rozptýleno.

Vodorovné rozptýlené záření I_{DH} je úměrné přímému slunečnímu záření I_B bez ohledu na polohu Slunce na obloze: [19]

$$I_{DH} = 0,33 \cdot (I_0 - I_B) \cdot \sin \beta \quad [W/m^2]. \quad (5.7)$$



Obrázek 5.4 Rozptýlené záření dopadající na zemský povrch [19]

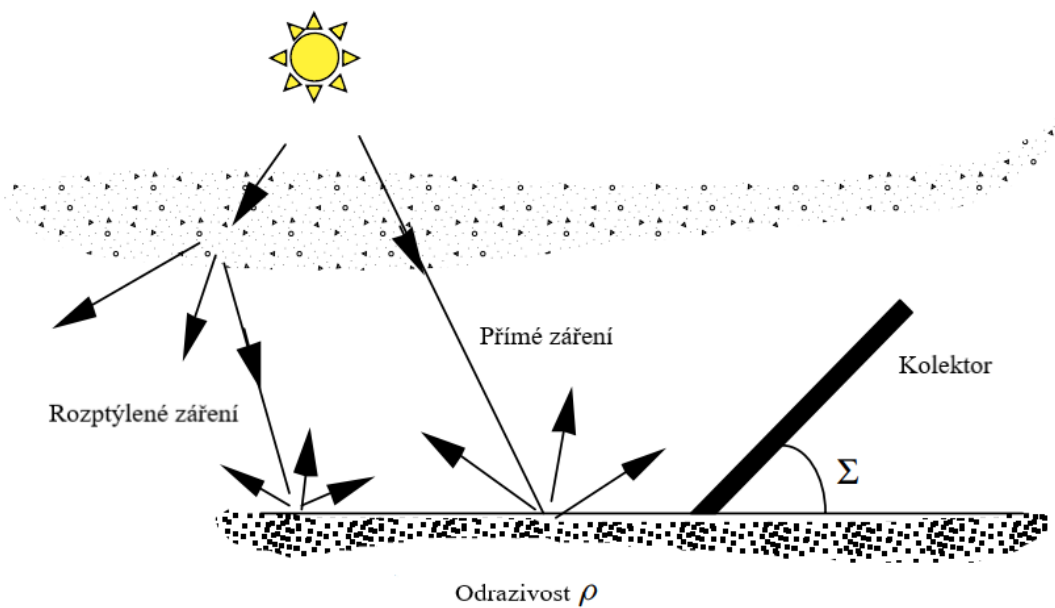
Je dobře vědět jaká hodnota rozptýleného záření může být přičtena k přímému záření, které dopadá na solární modul. Pokud úhel sklonu kolektoru Σ je nulový, což znamená že panel leží vodorovně, vidí celou oblohu a může přijmout maximální množství rozptýleného záření I_{DH} na vodorovném povrchu. Když je kolektor ve svislé poloze vidí polovinu oblohy a je vystaven polovině difúzního záření. Vztah pro rozptýlené záření dopadající na kolektor s úhlem sklonu Σ udává I_{DC} : [19]

$$I_{DC} = I_{DH} \cdot \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) = 0,33 \cdot (I_0 - I_B) \cdot \sin \beta \cdot \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) [W/m^2]. \quad (5.8)$$

5.3 Odražené záření

Závěrečnou složkou celkového záření dopadajícího na kolektor je odražené záření. Za jasného dne odražené záření může významně zvýšit celkový výkon fotovoltaického modulu. Během horšího počasí odražené záření může být natolik malé, že ho z hlediska celkového výkonu solárního modulu je možné zanedbat. Odražené záření lze uvažovat, pokud je před solárním modulem hladká a světlá vodorovná plocha s odrazivostí ρ od které se odráží dopadající přímé a rozptýlené paprsky. Odražené záření udává parametr I_{RC} : [19]

$$I_{RC} = \rho \cdot (I_{BH} + I_{DH}) \cdot \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) [W/m^2]. \quad (5.9)$$



Obrázek 5.5 Odražené přímé a rozptýlené záření dopadající na kolektor [19]

Pro vodorovně umístěný kolektor ($\Sigma = 0$) vychází $I_{RC} = 0$ a na kolektor nedopadá žádné odražené záření. Pokud je solární kolektor ve svislém směru vidí maximálně polovinu odražených paprsků. Celkové sluneční záření dopadající na solární kolektor je: [19]

$$I_C = I_{BC} + I_{DC} + I_{RC} [W/m^2]. \quad (5.10)$$

Celkové záření dopadající na kolektor, který je umístěn ve vodorovné poloze je: [19]

$$I_H = I_{BH} + I_{DH} [W/m^2]. \quad (5.11)$$

6. PRAKTICKÁ ČÁST

Úkolem praktické části bylo sestavení programu pro výpočet polohy Slunce na základě matematického algoritmu, který byl popsán v teoretické části této práce. Tento program byl sestaven v prostředí Agilent (Keysight) VEE Pro 9.2. Toto prostředí umožňuje sestavení programu zapsáním matematických vzorců do příslušných blokových schémat. Tímto postupem byl vytvořen simulační program.

Další částí programu pro výpočet polohy Slunce pro optimalizaci náklonu fotovoltaického modulu bylo sestavení tzv. uživatelského panelu.

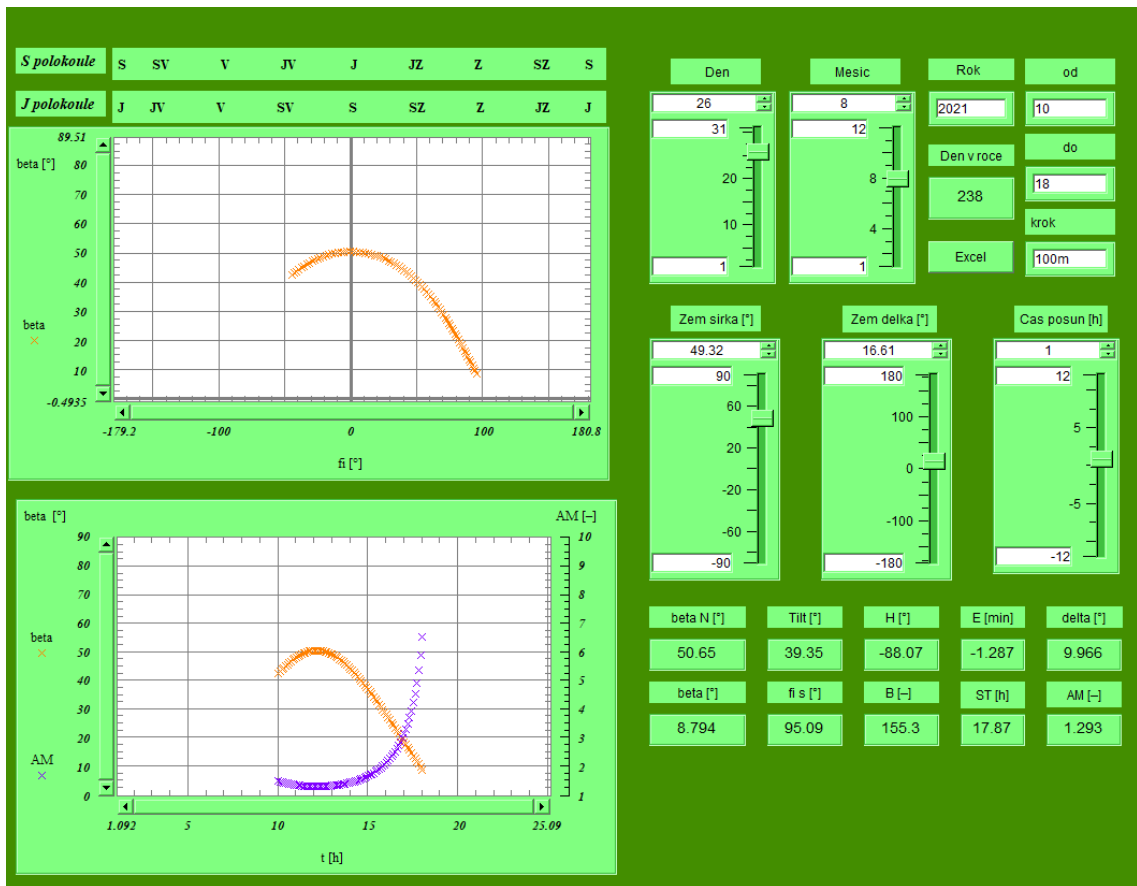
Uživatelský panel je rozdělen na dvě části. V pravé horní části panelu uživatel zadává hodnoty, což jsou datum (den, měsíc a rok), časový interval v hodinách pro zobrazení polohy Slunce (od, do, krok) a geografická poloha místa (zeměpisná délka, zeměpisná šířka a časový posun příslušný této geografické poloze).

Po zadání výše popsaných hodnot a po spuštění simulace je v dolní části zobrazen výpis dalších důležitých hodnot:

- Úhel mezi Sluncem a místním horizontem v poledne β_N [°]
- Úhel výšky Slunce nad obzorem β [°]
- Optimální sklon FV modulu v poledne *Tilt* [°]
- Solární azimut φ_s [°]
- Hodinový úhel H [°]
- Konstanta B z rovnice 4.6 [-]
- Časová rovnice E [min]
- Solární čas ST [h]
- Solární deklinace δ [°]
- Vzduchová hmota AM [-]

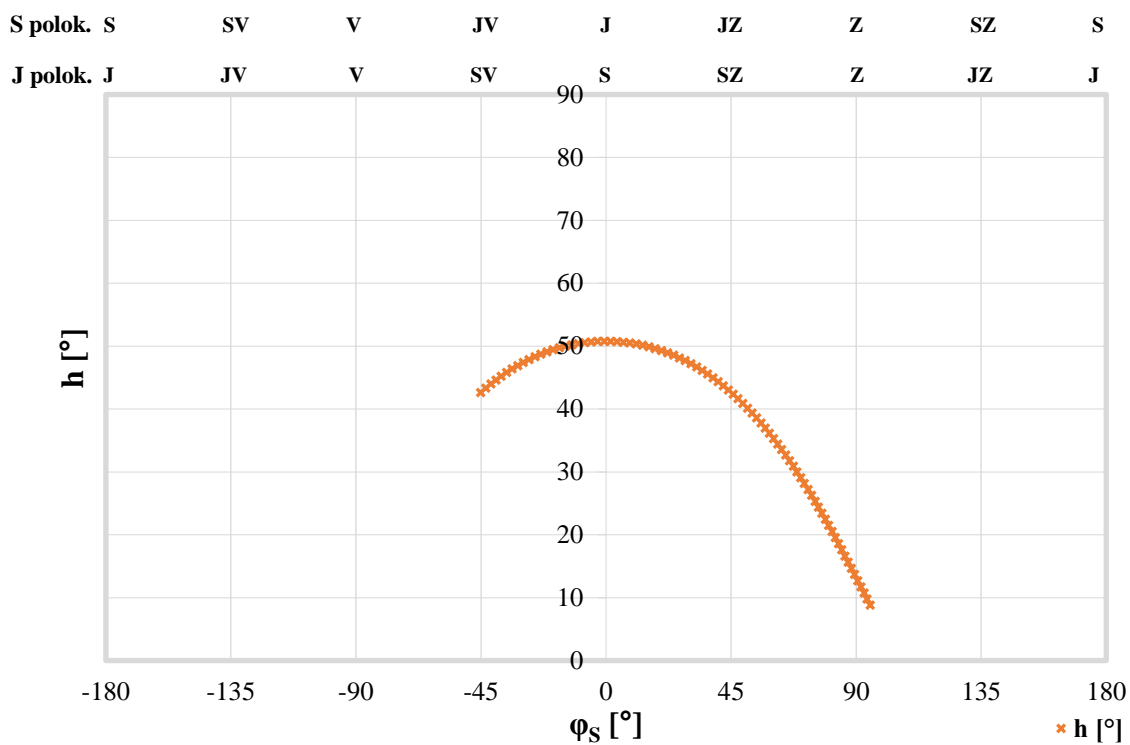
V levé části panelu jsou zobrazeny výsledné grafické závislosti. Nahoře je graf výšky Slunce nad obzorem β v závislosti na solárním azimutu φ_s , dole je grafická závislost výšky Slunce nad obzorem β a vzduchové hmoty AM na čase.

Na obrázku 6.1 je příklad nastavení a výsledných údajů pro město Brno a datum 26.08.2021, což odpovídá 238. dnu v roce. Časový posun příslušný tomuto městu je 1 hodina (15°). Časový interval byl zvolen od 10:00 do 18:00.

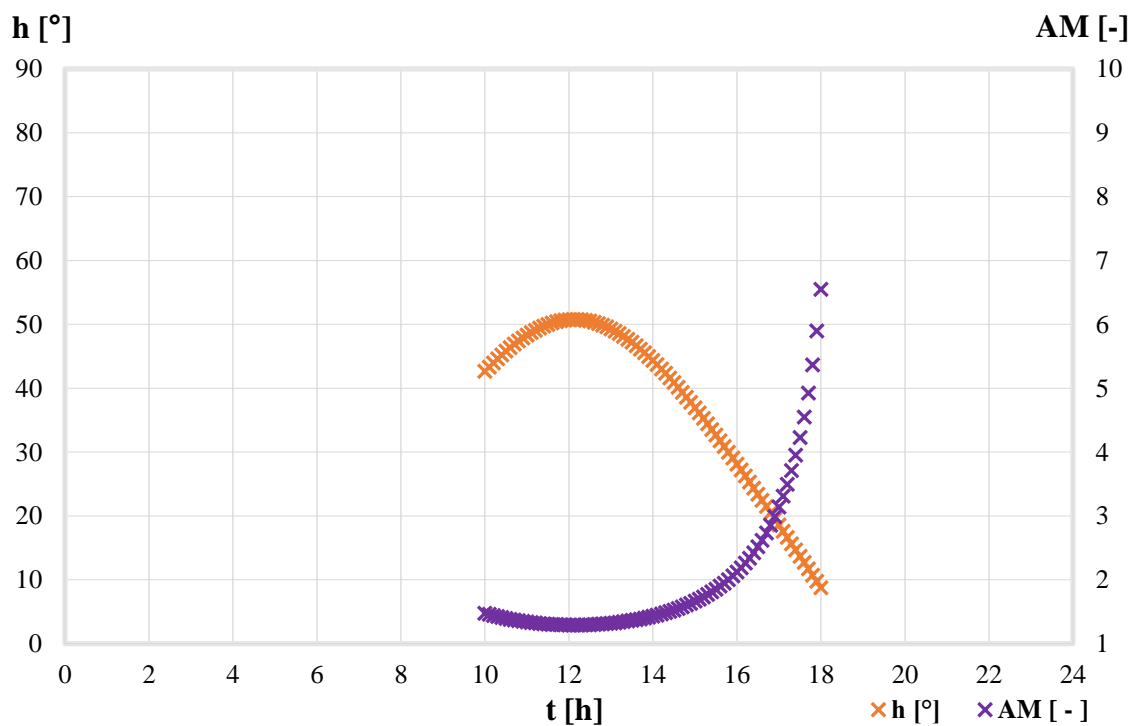


Obrázek 6.1 Vytvořený uživatelský panel simulující polohu Slunce pro Brno, datum 26.08.2021 s časovým intervalem od 10:00 do 18:00

Pro pohodlí uživatelský panel navíc obsahuje tlačítko pro přenos dat do prostředí MS Excel, který následně umožňuje sestavit závislost úhlu výšky Slunce nad obzorem β na solárním azimutu φ_s a časovou závislost úhlu výšky Slunce nad obzorem β a vzduchové hmoty AM . Solární azimut φ_s se pohybuje od -180° do 180° . Sluneční poledne je zobrazeno ve grafech na hodnotě 0° , což odpovídá jihu na severní polokouli a severu na jižní polokouli.



Obrázek 6.2 Závislosti β na φ_S pro Brno a zvolený datum 26.08.2021 s časovým intervalem od 10:00 do 18:00



Obrázek 6.3 Časové závislosti β a AM pro Brno a zvolený datum 26.08.2021 s časovým intervalem od 10:00 do 18:00

Cílem další části práce bylo vytvoření programu, který simuluje jednotlivé složky intenzity dopadajícího záření v závislosti na datumu (den, měsíc a rok), časovém intervalu v hodinách (od, do, krok), geografické poloze místa (zeměpisná délka, zeměpisná šířka a časový posun příslušný této geografické poloze), azimutálním úhlu kolektoru φ_C , úhlu sklonu FV modulu Σ , odrazivosti (též Albedo) ρ , součiniteli znečištění atmosféry Z a na nadmořské výšce L_V .

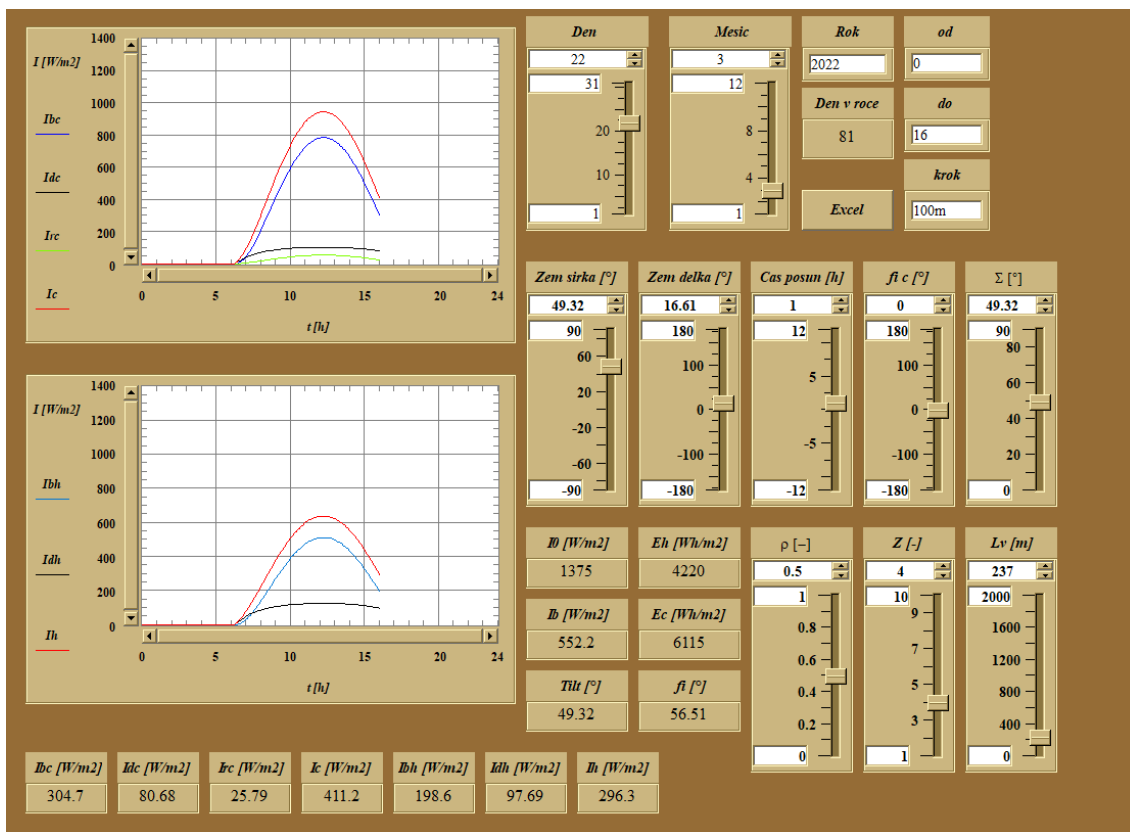
Po zadání výše popsaných hodnot a po spuštění simulaci je dole zobrazen výpis dalších důležitých hodnot:

- Sluneční záření před vstupem do zemské atmosféry I_0 [W/m^2]
- Přímé záření dopadající na povrch Země I_B [W/m^2]
- Optimální sklon FV modulu v poledne $Tilt$ [$^\circ$]
- Energie slunečního záření dopadajícího na vodorovný povrch E_H [Wh/m^2]
- Energie slunečního záření dopadajícího na nakloněný panel E_C [Wh/m^2]
- Úhel dopadu mezi normálou k ploše kolektoru a dopadajícím slunečním zářením θ [$^\circ$]
- Přímé záření dopadající na kolektor I_{BC} [W/m^2]
- Rozptýlené záření dopadající na kolektor I_{DC} [W/m^2]
- Odražené záření dopadající na kolektor I_{RC} [W/m^2]
- Celkové záření dopadající na kolektor I_C [W/m^2]
- Přímé záření dopadající na vodorovný povrch I_{BH} [W/m^2]
- Rozptýlené záření dopadající na vodorovný povrch I_{DH} [W/m^2]
- Celkové záření dopadající na vodorovný povrch I_H [W/m^2]

Uživatelský panel obsahuje tlačítko pro přenos dat do prostředí MS Excel, který následně umožňuje sestavit časové závislosti jednotlivých složek výkonů dopadajícího slunečního záření na optimálně nakloněný fotovoltaický modul a na modul umístěný ve vodorovné poloze.

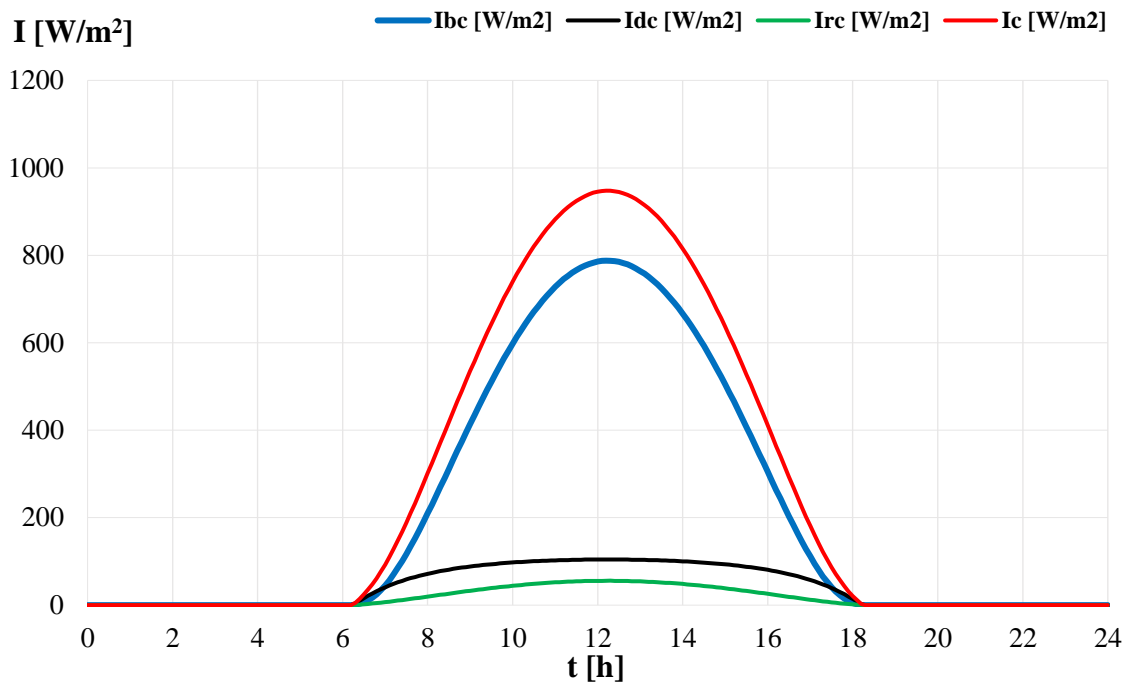
Na obrázku 6.4 je příklad nastavení výsledných údajů pro město Brno a datum 22.03.2022, což odpovídá 81. dnu v roce. Zeměpisné souřadnice odpovídající poloze Brna je $49,32^\circ$ severní šířky a $16,61^\circ$ východní délky o hodnotě nadmořské výšky $L_V = 237$ [m]. Hodnota odrazivosti $\rho = 0,5$, což odpovídá Cirrusovým mrakům a součinitel znečištění atmosféry $Z = 4$, odpovídá městským oblastím. Časový posun příslušný tomuto městu je 1 hodina (15°). Časový interval byl zvolen od 00:00 do 16:00.

Energie slunečního záření dopadajícího na vodorovný povrch E_H pro město Brno vyšla energie $4220 \text{ Wh}/\text{m}^2$ a optimální sklon FV modulu v poledne $Tilt = 49,32^\circ$. Jednotlivé složky dopadajícího slunečního záření jsou uvedeny dole pod grafy na obrázku 6.4.

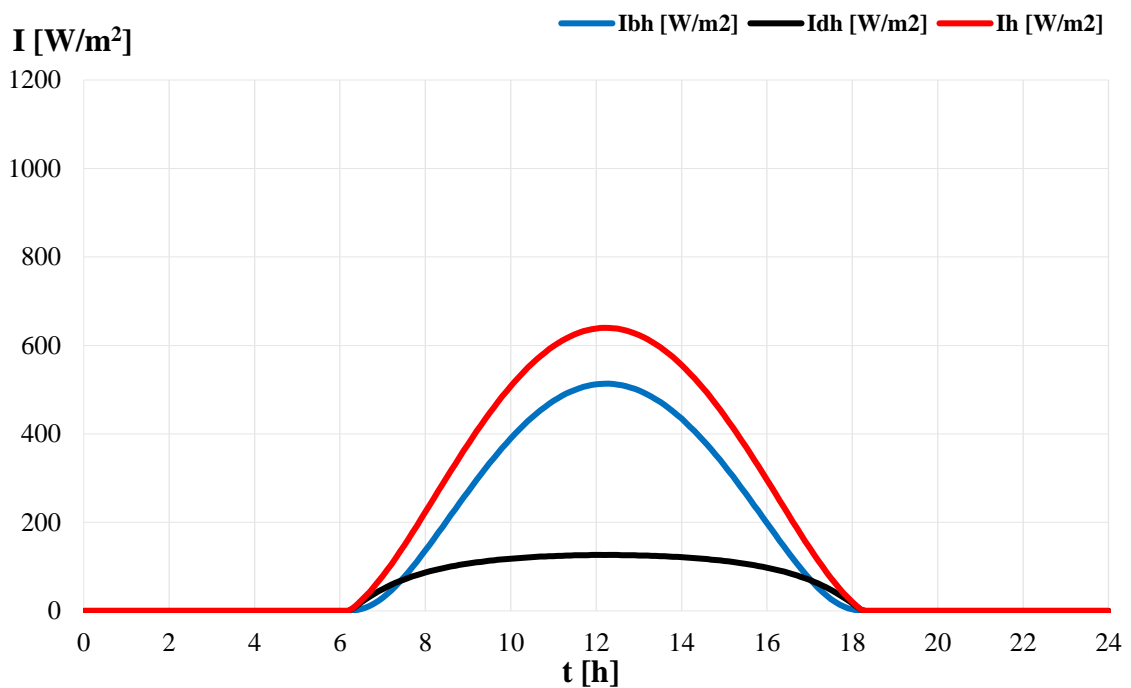


Obrázek 6.4 Uživatelský panel simulující výkony dopadajícího slunečního záření pro Brno, datum 22.03.2022 s časovým intervalem od 00:00 do 16:00

Na obrázcích 6.5 a 6.6 jsou uvedeny grafy časové závislosti jednotlivých složek dopadajícího slunečního záření na optimálně nakloněný a na vodorovný povrch za 24 hodin. Tyto grafy odpovídají městu Brno pro datum 22.03.2022.



Obrázek 6.5 Časová závislost jednotlivých složek výkonů slunečního záření dopadajícího na optimálně nakloněný kolektor pro město Brno dne 22.03.2022

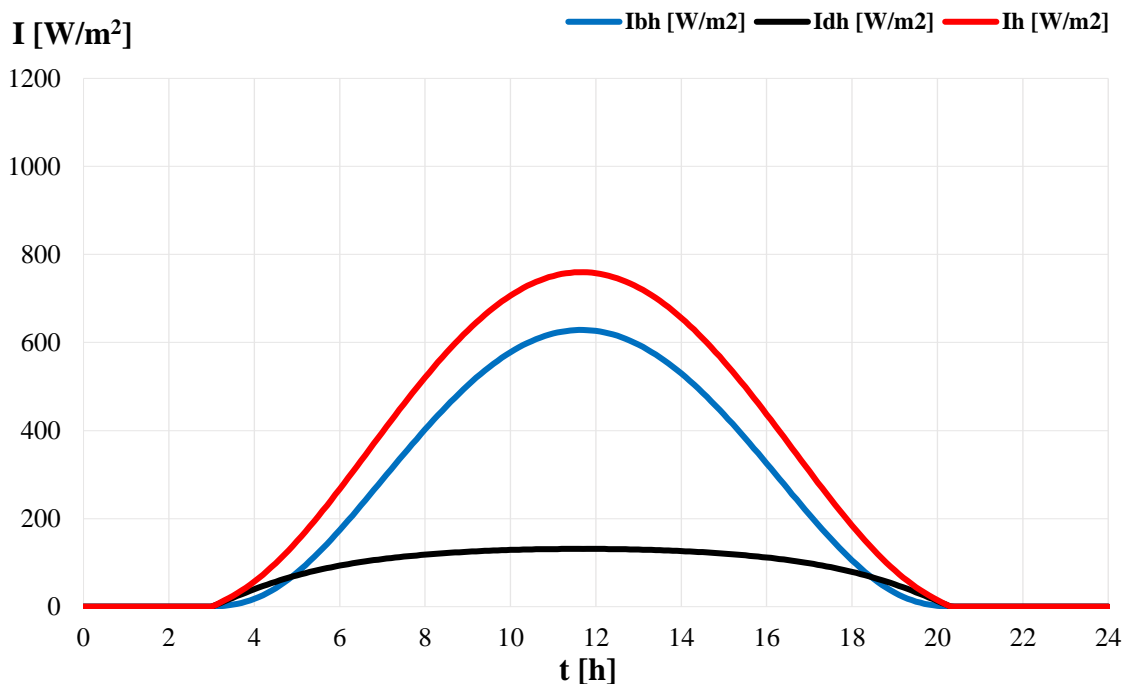


Obrázek 6.6 Časová závislost jednotlivých složek výkonů slunečního záření dopadajícího na vodorovný povrch pro město Brno dne 22.03.2022

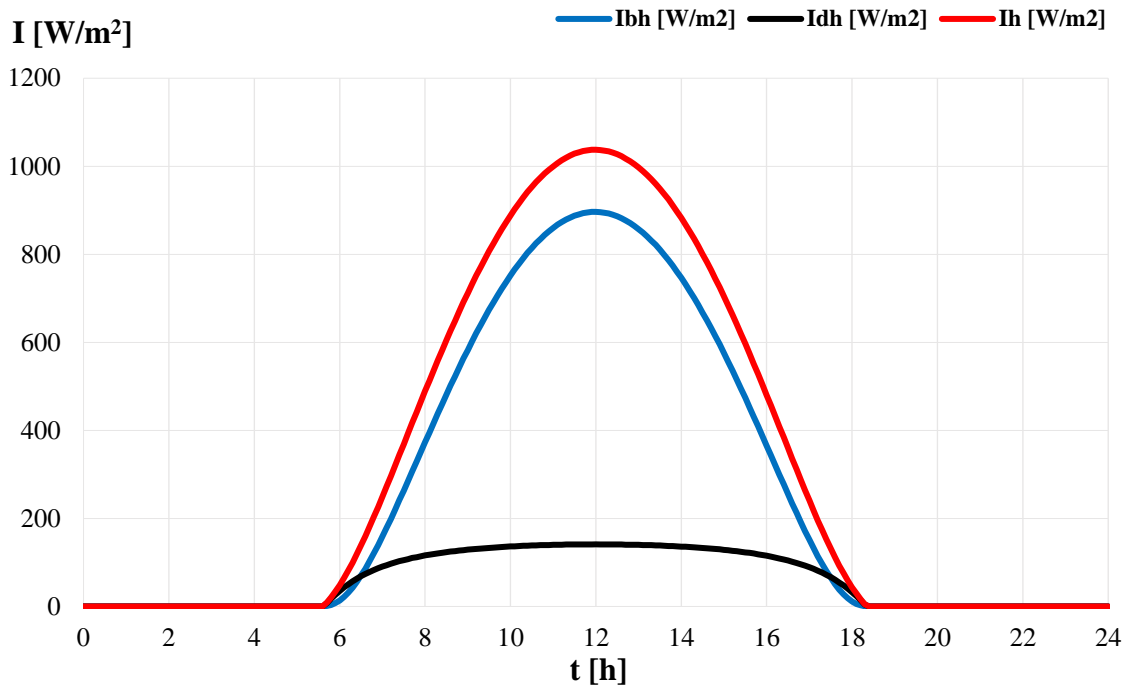
Na obrázcích 6.7 a 6.8 jsou uvedeny grafy časové závislosti jednotlivých složek dopadajícího slunečního záření na vodorovný povrchy za 24 hodin. Tyto grafy odpovídají městům Oslo (hlavní město Norska) a Manila (hlavní město Filipín) pro datum 22.05.2022. Cílem je porovnání hodnot energie dopadajícího slunečního záření v závislosti na zeměpisných souřadnicích, nadmořské výšce a časovém pásmu.

Zeměpisné souřadnice města Oslo jsou $59,92^\circ$ a $10,75^\circ$, nadmořská výška je 23 m a časový posun je 1 hodina. Dále byla zvolena hodnota odrazivosti $\rho = 0,5$, což odpovídá Cirrusovým mrakům a součinitel znečištění atmosféry $Z = 4$, odpovídá městským oblastím. Z provedené simulace energie slunečního záření dopadajícího na vodorovný povrch E_H pro město Oslo podle nastavení výše popsaných hodnot vyšla tato energie 7199 Wh/m^2 a optimální sklon FV modulu v poledne $Tilt = 39,58^\circ$.

Zeměpisné souřadnice města Manila jsou $14,36^\circ$ a $120,60^\circ$, nadmořská výška je 16 m a časový posun je 8 hodin. Dále byla zvolena hodnota odrazivosti $\rho = 0,5$, což odpovídá Cirrusovým mrakům a součinitel znečištění atmosféry $Z = 4$, odpovídá městským oblastím. Z provedené simulace energie slunečního záření dopadajícího na vodorovný povrch E_H pro město Oslo podle nastavení výše popsaných hodnot vyšla tato energie 7769 Wh/m^2 a optimální sklon FV modulu v poledne $Tilt = 5,982^\circ$.



Obrázek 6.7 Časová závislost jednotlivých složek výkonu slunečního záření dopadajícího na vodorovný povrch pro město Oslo dne 22.05.2022



Obrázek 6.8 Časová závislost jednotlivých složek výkonů slunečního záření dopadajícího na vodorovný povrch pro město Manila dne 22.05.2022

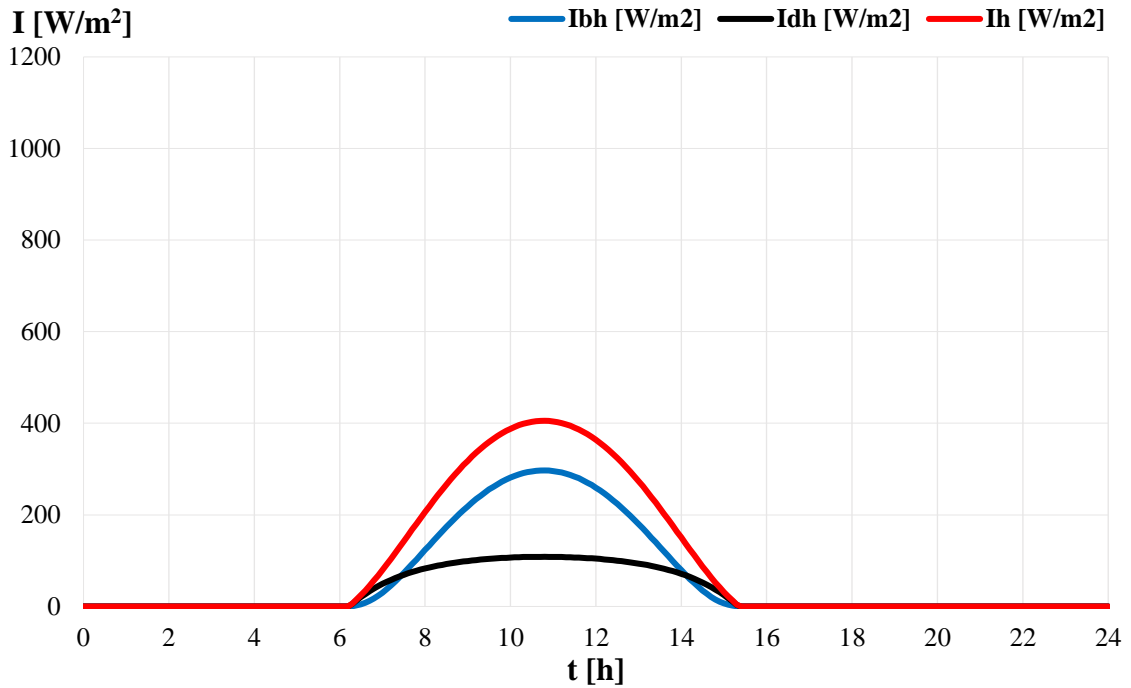
Na obrázcích 6.9, 6.10 a 6.11 jsou uvedeny grafy časové závislosti jednotlivých složek dopadajícího slunečního záření na vodorovný povrchy za 24 hodin. Tyto grafy odpovídají městu Madrid (hlavní město Španělska) pro datумы 27.12.2021, 27.03.2022 a 27.06.2022. Cílem je porovnání hodnot energie dopadajícího slunečního záření v závislosti na ročním období.

Zeměpisné souřadnice města Madrid jsou $40,41^\circ$ a $-3,703^\circ$, nadmořská výška je 657 m a časový posun je 1 hodina pro datумы 27.12.2021 a 27.03.2022, pro datum 27.06.2022 časový posun je 2 hodiny. Dále byla zvolena hodnota odrazivosti $\rho = 0,5$, což odpovídá Cirrusovým mrakům a součinitel znečištění atmosféry $Z = 4$, odpovídá městským oblastím.

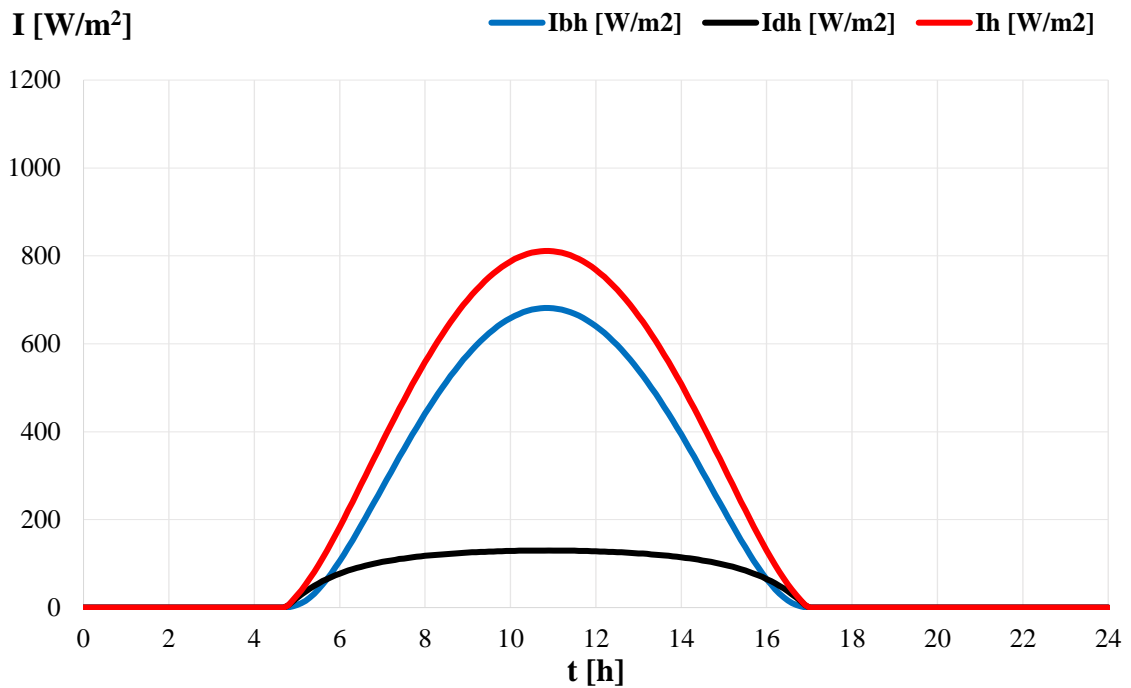
Energie slunečního záření dopadajícího na vodorovný povrch E_H města Madrid pro datum 27.12.2021 podle nastavení výše popsaných geografických hodnot vyšla 2213 Wh/m^2 a optimální sklon FV modulu v poledne $Tilt = 63,72^\circ$.

V jarním období 27.03.2022 energie slunečního záření dopadajícího na vodorovný povrch E_H města Madrid vyšla 5839 Wh/m^2 a optimální sklon FV modulu v poledne $Tilt = 38,39^\circ$.

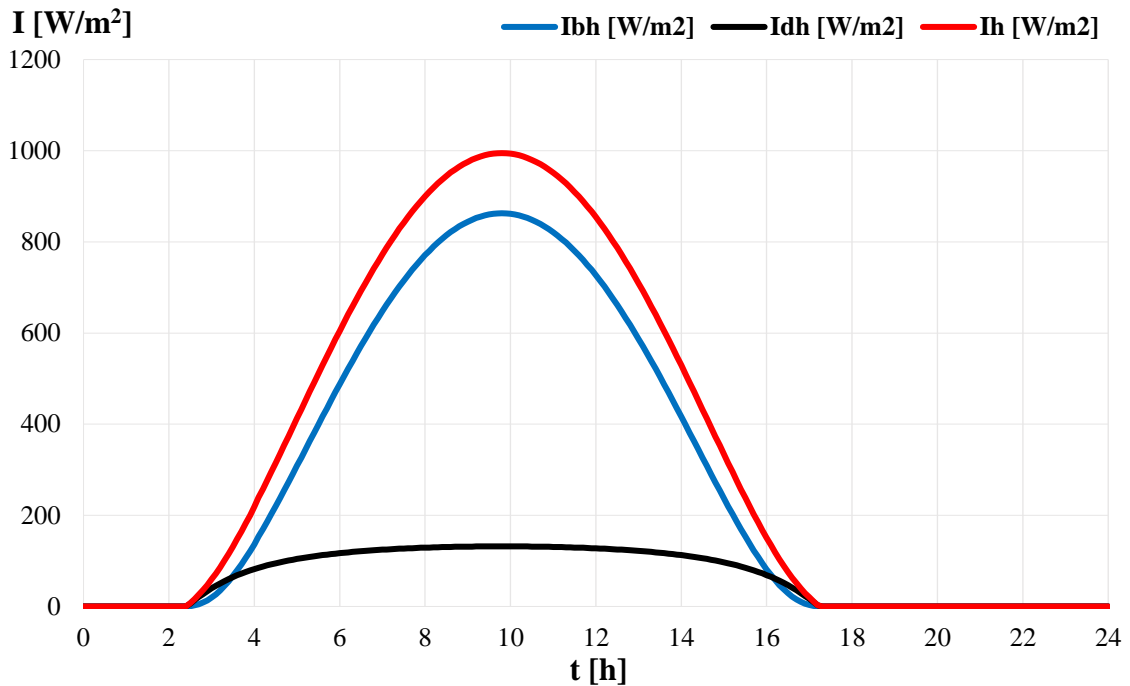
V letním období 27.06.2022 energie slunečního záření dopadajícího na vodorovný povrch E_H města Madrid vyšla 8489 Wh/m^2 a optimální sklon FV modulu v poledne $Tilt = 17,07^\circ$.



Obrázek 6.9 Časová závislost jednotlivých složek výkonu slunečního záření dopadajícího na vodorovný povrch pro město Madrid dne 27.12.2021



Obrázek 6.10 Časová závislost jednotlivých složek výkonů slunečního záření dopadajícího vodorovný povrch pro město Madrid dne 27.03.2022



Obrázek 6.11 Časová závislost jednotlivých složek výkonů slunečního záření dopadajícího na vodorovný povrch pro město Madrid dne 27.06.2022

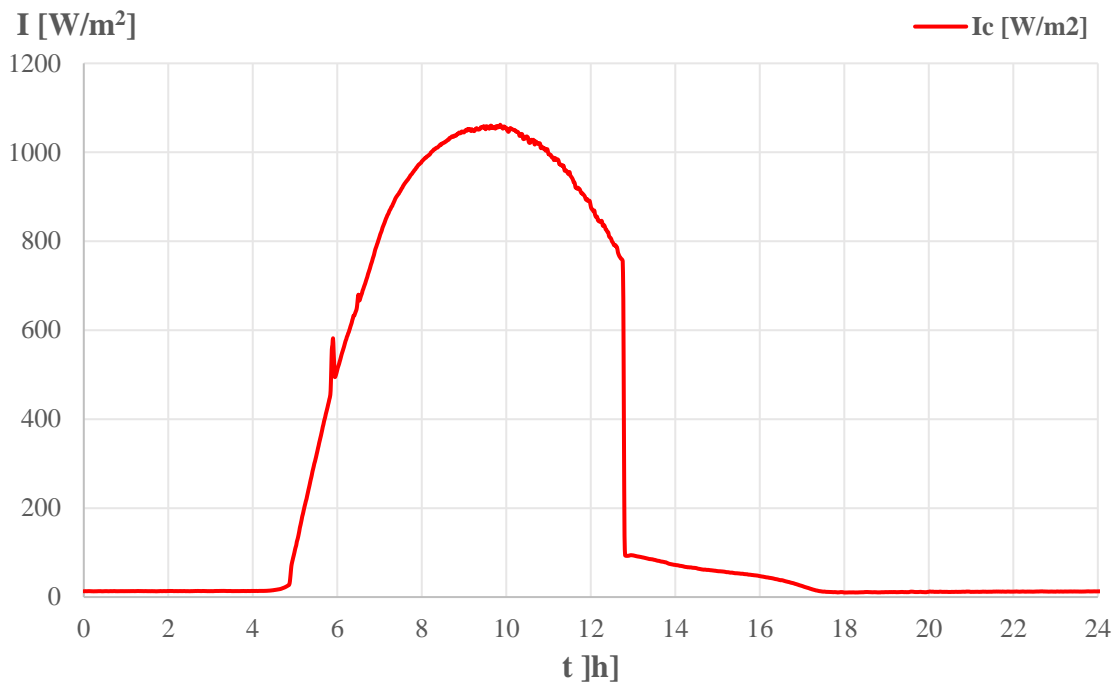
Na obrázku 6.13 je uveden graf časové závislosti intenzity dopadajícího slunečního záření na pyranometr, který je zobrazen na obrázku 6.12. Pyranometr SG420 je instalován na zátěžové konstrukci s úhlem náklonu 35°. Toto měření je pro datum 23.03.2022 s lokalitou 49,226° a 16,575°, která odpovídá geografické poloze Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, Ústavu elektrotechnologie.

Pro správné ověření funkce programu simulujícího průběh intenzity dopadajícího slunečního záření v dané lokalitě a v daném čase byly údaje z měření na obrázku 6.13 zadány do simulačního programu. Výsledné závislosti intenzity dopadajícího slunečního záření včetně jeho složek jsou zobrazeny na obrázku 6.14.

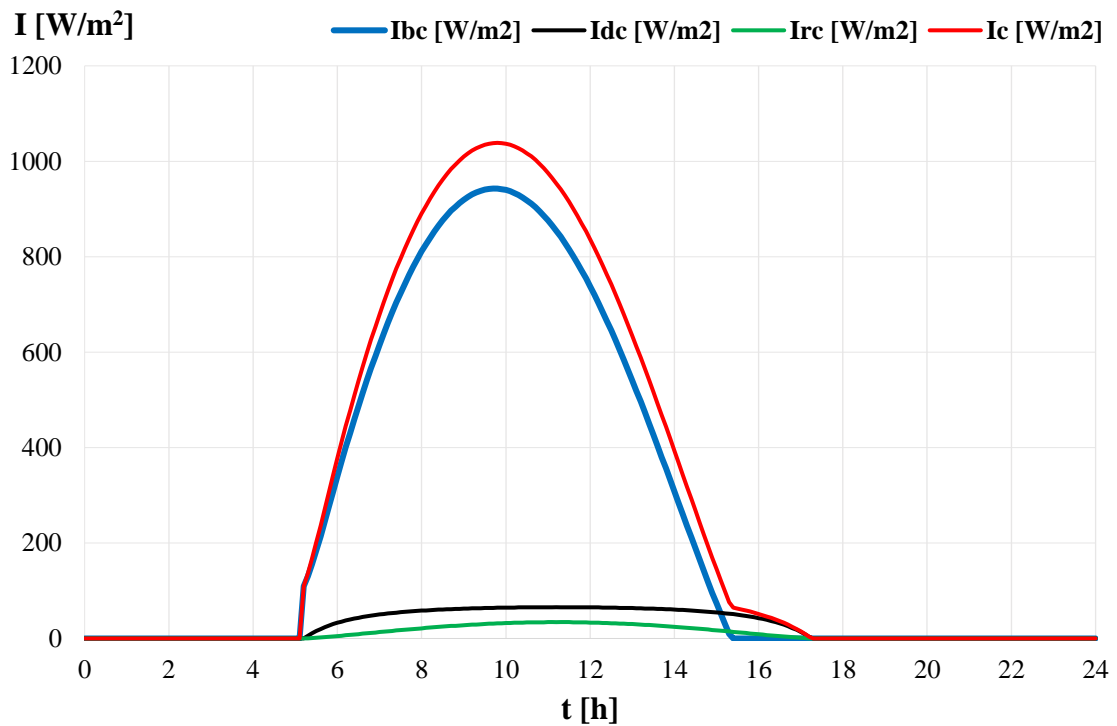
Z porovnání obrázků 6.13 a 6.14 je vidět velmi dobrá shoda obou průběhů intenzit dopadajícího slunečního záření. Výrazný pokles intenzity dopadajícího záření zhruba od 13:00 na obrázku 6.13 je způsoben zastíněním slunečního záření vlivem okolních budov.



Obrázek 6.12 Pyranometr SG420, na kterém probíhalo měření výkonu dopadajícího slunečního záření. FEKT VUT v Brně 23.03.2022



Obrázek 6.13 Časová závislost výkonu slunečního záření dopadajícího na modul pro město Brno VUT FEKT dne 23.03.2022



Obrázek 6.14 Časová závislost výkonu slunečního záření dopadajícího na modul pro město Brno VUT FEKT dne 23.03.2022

7. ZÁVĚR

V teoretické části práce bylo popsáno šíření sluneční energie a následně cesta slunce po zemské obloze. Dále byl popsán proces jaderné syntézy. V další části byly uvedeny informace o fotovoltaických článcích včetně jejich vlastností.

Následující část se věnovala metodám výpočtu polohy slunce pohybujícího se po obloze během dne pro zvolené místo a stanovený datum. Na základě matematického algoritmu a za pomoci programovacího prostředí VEE Pro 9.2 byl vytvořen program, který umožňuje optimalizaci náklonu fotovoltaického modulu. Výsledný uživatelský panel tohoto programu obsahuje výpis důležitých hodnot, graf závislosti výšky Slunce nad obzorem β na solárním azimutu φ_s a graf časové závislosti výšky Slunce nad obzorem β a vzduchové hmoty AM .

Poslední část práce se věnovala sestavení simulačního programu pro výpočet jednotlivých složek výkonu slunečního záření dopadajícího na fotovoltaický modul s volitelným náklonem během dne pro zvolené místo a stanovený datum. Podobně jako je v předchozím programu byl i pro tento program sestaven uživatelský panel, který obsahuje výpis důležitých hodnot, grafy časové závislosti výkonu slunečního záření (včetně jeho složek) dopadajícího na vodorovný a na nakloněný povrch fotovoltaického panelu.

Výsledné závislosti intenzit dopadajícího slunečního záření zjištěné pomocí tohoto programu byly otestovány pro rozdílné náklony fotovoltaických modulů, pro rozdílné geografické polohy a pro různé datумы.

V závěrečné části práce bylo provedeno porovnání naměřených hodnot intenzit slunečního záření z pyranometru s daty zjištěnými pomocí sestaveného programu.

Oba sestavené programy mohou být využity v navazujících bakalářských nebo diplomových pracích a v laboratorních úlohách předmětu Alternativní zdroje energie.

8. LITERATURA

- [1] *Portál solarsystem.nasa.gov* [online]. 2021 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: www.solarsystem.nasa.gov.
- [2] *Pozorování Slunce* [online]. 2021 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: www.pozorovanislunce.eu.
- [3] *Absorpce slunečního záření* [online]. 2021 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: www.edu.techmania.cz.
- [4] *Albedo* [online]. 2021 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: www.e-education.psu.edu/earth103/node/1002.
- [5] *Albedo* [online]. 2021 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: www.sciencedirect.com/topics/engineering/albedo.
- [6] DOBOS, E. *Albedo*. 2003. University of Miskolc.
- [7] *Ekliptika* [online]. 2010 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: www.hvr.cz/2010/10/18/minislovnicek-ekliptika
- [8] *Jaderná syntéza* [online]. 2021 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: www.edu.techmania.cz.
- [9] FOSTER, R., GHASSEMI, M., COTA, A. *Solar energy: renewable energy and the environment*. CRC press, 2009.
- [10] QUASHINING, V. *Understanding renewable energy systems*. 2005. London
- [11] KALIYEV, A. *Charakterizace vlastnosti perovskitových fotovoltaických článků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie, 2020. 54 s., Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Vitězslav Novák, Ph.D.
- [12] POULEK, V., LIBRA, M. *Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů*. Časopis Elektro, 2010, 3: 1210-0889.
- [13] *Jaký je rozdíl mezi monokrystalickým a polykrystalickým panelem?* [online]. 2021 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: www.joyce-energie.cz.
- [14] *Tenkvrstvé panely* [online]. 2013 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: www.eshop.terms.eu/cz/e-shop/c68831/tenkovrstve-panelz.html
- [15] *Složení solárního systému* [online]. 2017 [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: www.solarni-ohrev-vody.cz.
- [16] *Solární systémy k ohřevu vody* [online]. 2020 [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: www.solarnisystemynaohrevvody.cz.
- [17] ALGHOUL, M. A., et al. *Review of materials for solar thermal collectors. Anti-Corrosion methods and materials*, 2005.
- [18] VANĚK, J., KŘIVÍK, P. *Alternativní zdroje energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie, 2014. 198 s.
- [19] GILBERT, M. Masters. *Renewable and efficient electric power systems*. John Wiley & Sons, 2004.

- [20] *Sluneční energie*. 2020 [cit. 2021-04-07]. České vysoké učení technické v Praze. 59 s.
- [21] SZENDIUCH, I., HEJÁTKOVÁ, E. *Mikroelektronika a technologie součástek – úvod do elektronického hardware*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2013. 119 s.
- [22] ŠINDLER, R. *Optimalizace sklonu fotovoltaického modulu-diplomová práce*. Brno, 2010. 47 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Křivík, Ph.D. FEKT VUT v Brně
- [23] *Calculate the average temperature needed for hydrogen fusion reaction [duplicate]* [online]. 2021 [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: www.physics.stackexchange.com

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
AU	Astronomical unit
TCO	Transparentní vodivý oxid
PCE	Power conversion efficiency
PUF	Polyurethane foam

Symboly:

U_{oc}	napětí naprázdno	(V)
I_{sc}	proud nakrátko	(A)
p	Hmotnost protonu	(kg)
e	Hmotnost elektronu	(kg)
n	Hmotnost neutronu	(kg)
α	Hmotnost alfa částice	(kg)
c	Rychlost světla	(m/s ²)
$E, \Delta E$	Energie	(J, eV)
$\varphi_{e,s}$	Solární zářivý výkon	(W)
$M_{e,s}$	Emise slunečního záření	(W/m ²)
M_e	Intenzita záření	(W/m ²)
A_s	Plocha povrchu Slunce	(km ²)
A_{SE}	Plocha koule s poloměrem r_{SE}	(km ²)
r_s	Poloměr Slunce	(km)
r_{SE}	Poloměr od středu Slunce do Země	(km)
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	(m ² K ⁴)
T	Teplota	(°C)
T_{SUN}	Povrchová teplota Slunce	(°C)
E	Koncentrace energie na 1 m ²	(J, eV)
δ	Solární deklinace	(°)
n	Číslo dne	(–)
β_N	Maximální úhel výšky Slunce nad obzorem	(°)
<i>Tilt</i>	Úhel sklonu fotovoltaického modulu v poledne	(°)
β	Úhel výšky Slunce nad obzorem	(°)
φ_s	Solární azimut	(°)
φ_C	Úhel azimutu kolektoru	(°)
H	Hodinový úhel	(°)

I_0	Sluneční záření před vstupem do zemské atmosféry	(W/m ²)
I_B	Přímé záření	(W/m ²)
A	Zdánlivé sluneční záření před vstupem do atmosféry	(W/m ²)
k	Atmosférická optická hloubka	(-)
m	Masa vzduchu	(-)
I_{BH}	Přímé záření dopadající na vodorovný povrch	(W/m ²)
I_{DH}	Rozptýlené záření dopadající na vodorovný povrch	(W/m ²)
I_H	Celkové záření dopadající na vodorovný povrch	(W/m ²)
I_{BC}	Přímé záření dopadající na kolektor	(W/m ²)
I_{DC}	Rozptýlené záření dopadající na kolektor	(W/m ²)
I_{RC}	Odražené záření dopadající na kolektor	(W/m ²)
I_C	Celkové záření dopadající na kolektor	(W/m ²)
C	Faktor rozptylu oblohy	(°)
L	Zeměpisná šířka	(°)
L_V	Nadmořská výška	(m)
ρ	Odrazivost	(-)
θ	Úhel dopadu	(°)
Σ	Úhel náklonu kolektoru	(°)
E	Časová rovnice	(min)
B	Konstanta z časové rovnice	(-)
ST	Solární čas	(h)
AM	Vzduchová hmota	(-)