

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

SOLÁRNÍ ZÁŘENÍ V LOKALITĚ VUT FSI V BRNĚ

SOLAR RADIATION IN PLACE BUT FME BRNO

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JOSEF HORVÁTH

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JOSEF ŠTĚTINA, Ph.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Josef Horváth

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Solární záření v lokalitě VUT FSI v Brně

v anglickém jazyce:

Solar radiation in place BUT FME Brno

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proveďte zpracování měřených údajů ze snímačů solárního záření umístěných na budově C3 za rok 2007/08. Porovnejte dopadající solární záření na vodorovnou plochu a skloněnou plochu.

Cíle bakalářské práce:

Statistické a grafické zpracování měřených údajů solárního záření jako podklad pro výpočty solárních kolektorů a fotovoltaiky. Práce v rozsahu 15 až 30 stran.

Seznam odborné literatury:

Cihelka, J.: Solární tepelná technika. : MALINA TOMÁŠ NAKLADATELSTVÍ
Meloun, M.; Militký, J.: Statistické zpracování experimentálních dat. Plus 1995.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá zpracováním měřených údajů ze snímačů solárního záření umístěných na budově C3 v lokalitě VUT FSI v Brně za rok 2007/08 a 2008/09. Cílem práce je prezentovat měřené údaje solárního záření ve statistické a grafické formě, která může sloužit jako podklad pro výpočty solárních kolektorů a fotovoltaiky. Součástí práce je také porovnání dopadajícího solárního záření na vodorovnou a skloněnou plochu. Setkáme se zde se stručnou charakteristikou solárního záření, možnostmi využití a způsoby jeho měření.

ABSTRACT

This thesis deals with the elaboration of measured solar radiation data collected from sensors placed on C3 building - BUT FSI localization in Brno. Data measured during 2007-08 and 2008-09. The aim of this thesis is to present the measured solar radiation data in statistical and graphical form, which can be used as a basis for the solar collectors and barrier-layer calculations. Part of the thesis is also engaged in a comparison of incident solar radiation on a horizontal and sloping surface. We will encounter here with brief characteristics of solar radiation, possibilities of utilization and the ways of its measurement.

KLÍČOVÁ SLOVA

solární záření, intenzita solárního záření, sluneční energie, možnosti využití, výhody a nevýhody, měření solárního záření, solární záření na vodorovnou plochu, solární záření na skloněnou plochu

KEYWORDS

solar radiation, intensity of solar radiation, solar energy, possibilities of utilization, advantages and disadvantages, solar energy measurement, solar radiation on a horizontal surface, solar radiation on a sloping surface

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HORVÁTH, J. *Solární záření v lokalitě VUT v Brně*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 42 s., 4 přílohy. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Solární záření v lokalitě VUT v Brně vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

2. května 2010

.....
Josef Horváth

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě poděkoval doc. Ing. Josefu Štětinovi, Ph.D. za jeho ochotu, výbornou spolupráci, podporu a čas, který mi věnoval v průběhu vypracování bakalářské práce.

OBSAH

ÚVOD	10
1 SLUNEČNÍ ENERGIE	11
1.1 SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ.....	12
1.2 SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ NA ZEMI.....	14
1.3 VLIVY NA SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ.....	17
1.4 VYUŽITÍ SOLÁRNÍHO ZÁŘENÍ	18
1.5 VÝHODY VYUŽITÍ SOLÁRNÍHO ZÁŘENÍ.....	19
1.6 NEVÝHODY VYUŽITÍ SOLÁRNÍHO ZÁŘENÍ.....	19
2 MĚŘENÍ SOLÁRNÍHO ZÁŘENÍ	20
2.1 MĚŘENÍ GLOBÁLNÍHO ZÁŘENÍ	20
2.2 MĚŘENÍ DIFÚZNÍHO ZÁŘENÍ.....	21
2.3 MĚŘENÍ PŘÍMÉHO ZÁŘENÍ.....	21
3 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ SOLÁRNÍHO ZÁŘENÍ	22
3.1 LOKALITA MĚŘENÍ.....	22
3.2 MĚŘÍCÍ STANICE	22
3.3 POUŽITÉ SNÍMAČE SOLÁRNÍHO ZÁŘENÍ	23
3.4 ADVANTECH ADAM 5000/TCP.....	25
3.5 MODUL ADAM-5018.....	26
3.6 SCHÉMA ZAPOJENÍ SNÍMAČŮ.....	27
4 ZPRACOVÁNÍ DAT	28
4.1 OVĚŘENÍ ÚPLNOSTI DAT	28
4.2 PRŮMĚRNÉ HODNOTY INTENZITY SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ	29
4.3 ENERGIE DOPADAJÍCÍ NA OSLUNĚNOU PLOCHU.....	32
4.4 DÉLKA SLUNEČNÍHO SVITU A PRŮMĚRNÁ TEPLOTA.....	34
4.5 POROVNÁNÍ DOPADAJÍCÍHO ZÁŘENÍ NA VODOROVNOU A SKLONĚNOU PLOCHU ..	35
ZÁVĚR	38
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	39
SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN	41
SEZNAM PŘÍLOH	42

ÚVOD

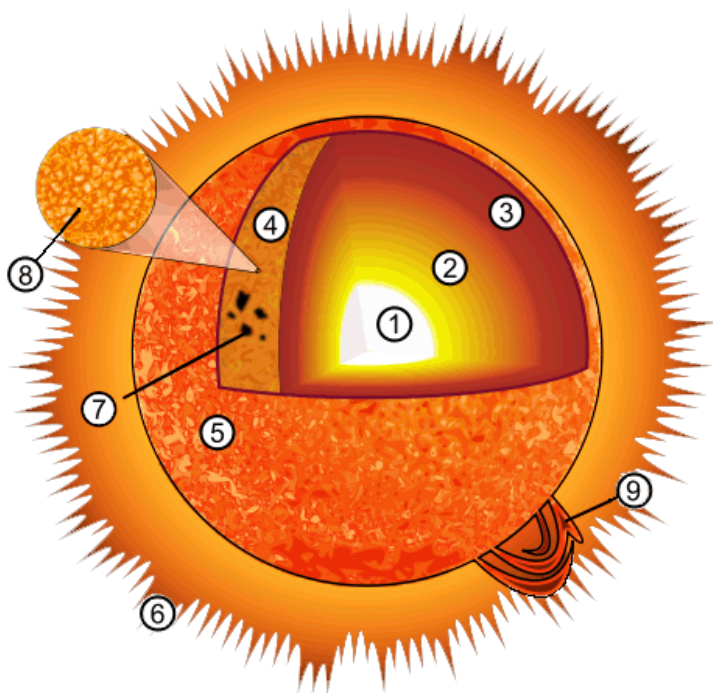
Sluneční energie má pro naši planetu velký význam, je zdrojem světelné a tepelné energie, bez které by nemohl na Zemi existovat život. V důsledku růstu cen fosilních paliv se lidstvo čím dál tím více přiklání k alternativním zdrojům energie, které jsou šetrné k životnímu prostředí. Mezi takové zdroje patří energie větru, vody, Slunce, geotermální energie, nebo energie biomasy. Nevýhodou těchto zdrojů jsou poměrně vysoké pořizovací náklady energetických systémů, nutná dostupnost daného zdroje a také velikost energetického systému větších výkonů. Vstup lidstva do třetího tisíciletí s sebou přinesl velký rozvoj techniky v oblasti využívání solárního záření. S využíváním solární energie se dnes už setkáváme téměř na každém kroku. Solární kolektory či fotovoltaické panely se instalují na nové i stávající objekty. Stále více se začínají objevovat na střechách rodinných domů, škol i průmyslových hal. Na nevyužitých plochách slunečných lokalit vznikají nové solární elektrárny. Existují různé typy solárních zařízení, které se liší tvarem, výkonem, nebo účinností. Solární technika se jistě stává součástí každodenního života.

Množství získané energie závisí na lokalitě a místních klimatických podmínkách. Můžeme ji využít k přeměně na teplo, nebo k výrobě elektrické energie. Moderní budovy využívají sluneční energii pasivním způsobem, kdy vhodně navrženým architektonickým prvkem lze měnit sluneční energii na kinetickou energii vzduchu (solární komín, solární stěna) a podpořit tak přirozené větrání objektu.

1 SLUNEČNÍ ENERGIE

Energie ze Slunce představuje téměř veškerou energii naší planety. Tato energie má zásadní vliv na živé organismy na Zemi. Řídí všechny přírodní pochody, jako jsou klimatické podmínky, mořské proudy, příliv, odliv, nebo fotosyntéza rostlin a mnoho dalších. Jak na zemi, tak ve vesmíru platí zákon zachování energie, podle kterého se veškerá sluneční energie dopadající na Zemi transformuje na jiné formy energie. Mezi projevy sluneční energie patří také energie fosilních paliv, jako je uhlí, ropa, nebo zemní plyn.

Slunce je hvězda nacházející se v samotném centru naší sluneční soustavy. Má tvar koule o průměru 1 400 000 km. Je tedy 109krát větší a 1,3milionkrát objemnější než Země. Vzdálenost Slunce od Země se během roku mění od 147 do 152 milionů km. Střední hodnota této vzdálenosti určuje tzv. astronomickou jednotku (*astronomical unit* 1 AU = 149 597 870 691 ± 30 m). Světlo urazí tuto vzdálenost za 8 minut a 19 vteřin. Slunce je se svou hmotností $2 \cdot 10^{30}$ kg 320 000krát hmotnější než Země. Je tvořeno žhavými elektricky vodivými plyny, které nazýváme plazma. Ve středu Slunce dosahuje teplota 13 000 000 K. Teplota slunečního povrchu tzv. fotosféry je přibližně 6 000 K. Vlastní struktura Slunce je schematicky vyobrazena na obrázku 1.1.

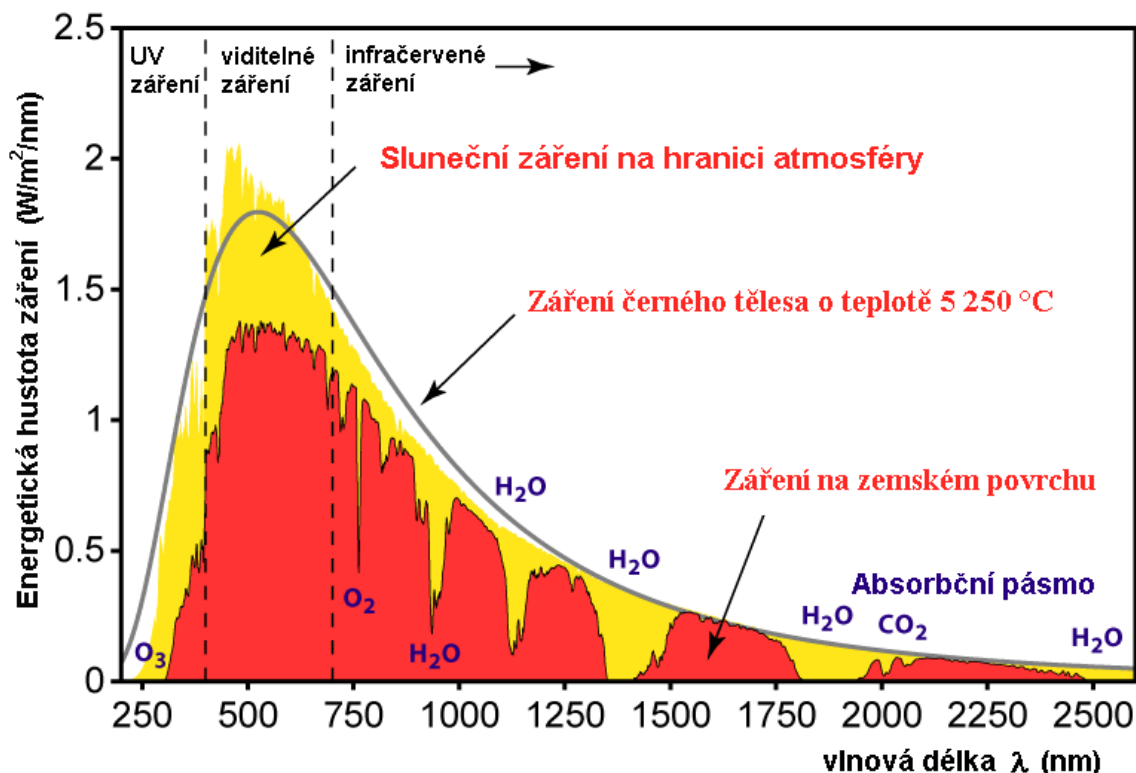


Obr. 1.1 Struktura Slunce. 1 – jádro Slunce, 2 – radiační zóna, 3 – konvektivní zóna, 4 – fotosféra, 5 – chromosféra, 6 – koróna, 7 – sluneční skvrna, 8 – granule, 9 – protuberance. Převzato z [4]

Primárním zdrojem energie ve Slunci je jaderná fúze, tj. spojování jader vodíku za vzniku helia (a posléze dalších těžších prvků). Ve Slunci se každou sekundu přemění 600 milionů tun vodíku na helium. Hmotnost vzniklého helia je o něco menší, než hmotnost do reakce vstupujícího vodíku. Rozdíl hmotnosti se podle známého Einsteinova vztahu $E=m \cdot c^2$ dá přepočítat na energii. Ve Slunci tedy každou sekundu ubude 4,26 milionu tun hmoty, což představuje uvolnění $3,8 \cdot 10^{26}$ J energie. [1]

1.1 Sluneční záření

Slunce do svého okolí uvolňuje energii ve formě elektromagnetického záření. Spektrální rozsah tohoto záření je od 0,1 nm až po metrové vlnové délky. Odborná literatura [2] uvádí rozsah vlnových délek 0,1 nm až 10^3 m. Solární záření tvoří rentgenové (RTG), ultrafialové (UV), viditelné, infračervené (IR) a rádiové záření, přičemž z energetického hlediska je nejvýznamnější vlnový rozsah 200 až 3000 nm. Nejvíce energie je přenášeno v oblasti viditelného spektra (obr. 1.2).



Obr. 1.2 Spektrum slunečního záření při vstupu do atmosféry - na základě [5]

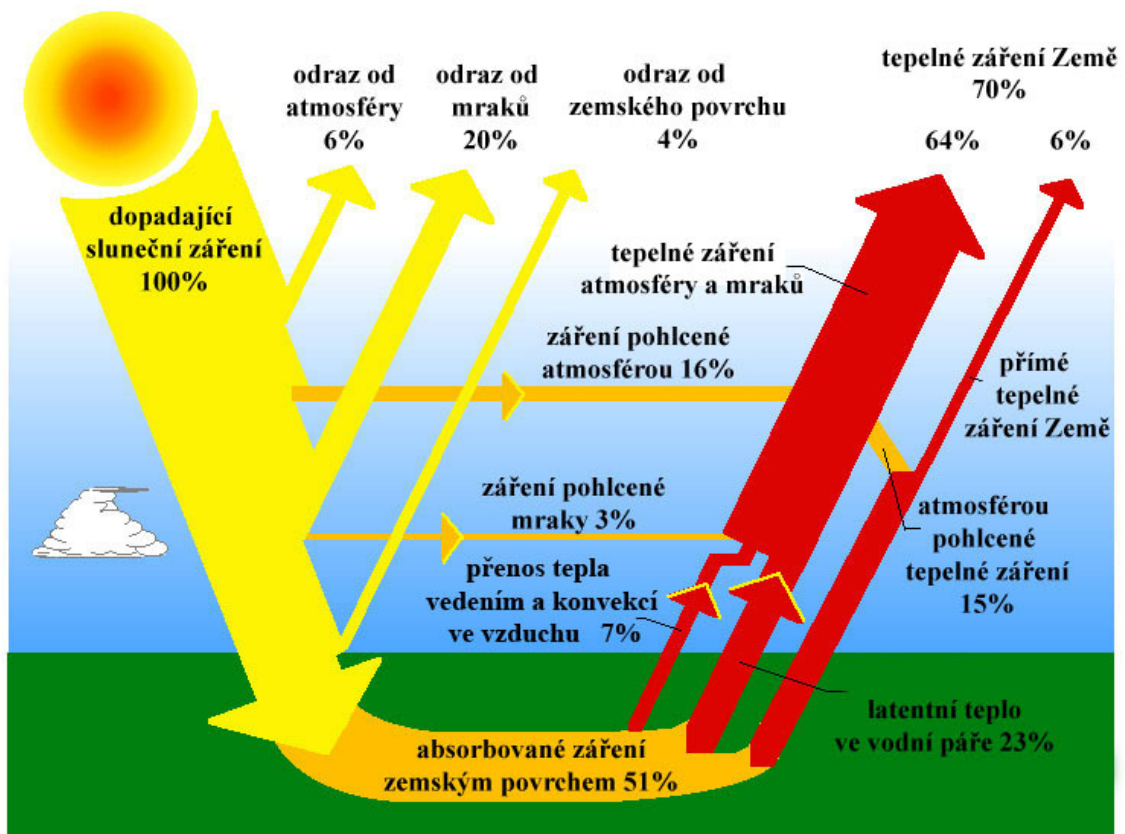
Sluneční záření na své cestě od Slunce nemění svoji formu, avšak s rostoucí vzdáleností se rozptyluje na větší plochu a tím ztrácí na intenzitě. Zářivý tok na povrchu zemské atmosféry dopadající na jednotkovou plochu, kolmou ke slunečním paprskům, odpovídá výkonu přibližně 1,4 kW. Měrný tok energie $1,4 \text{ kW/m}^2$ nazýváme tzv. *solární konstantou*. V důsledku proměnné vzdálenosti Země od Slunce kolísá i solární konstanta. Průměrná hodnota solární konstanty byla stanovena na:

$$I_0 = 1\,360 \quad [\text{W/m}^2] \quad (1)$$

Z celkového zářivého výkonu Slunce $3,8 \cdot 10^{23}$ kW dopadá na osluněný zemský povrch jen velmi malá část, tj. $1,8 \cdot 10^{14}$ kW [3]. Země je tedy schopna zachytit přibližně jen jednu dvou-miliardtinu z celkového zářivého výkonu Slunce. Také ostatní planety a kosmická tělesa zachytí jen velmi malou část tohoto zářivého toku. Naprostá většina slunečního záření je rozptýlena do kosmického prostoru.

Zemská atmosféra (ovzduší) sahá až do výšky přes 1000 km (to je asi šestina zemského poloměru). Je to tedy poměrně tenká vrstva, která je jen velmi řídko vyplněna vzduchem (zejména ve větších výškách). Atmosféra je složena především z kyslíku a dusíku. Ve výškách nad 60 km pohlcují tyto atmosférické plyny ultrafialové a rentgenové záření a jsou jimi ionizovány (proto se tato vrstva atmosféry nazývá ionosféra). Nižší v atmosféře (ve výškách od 20 do 30 km) se zachycuje ultrafialové záření ve vrstvě s velkým obsahem ozónu, v tzv. ozonosféře. Pohlceným ultrafialovým zářením se ozonosféra zahřívá. [2]

Ozón tzv. trikyslík O_3 se sestává ze tří atomů kyslíku na místo dvou, které tvoří molekuly stabilního běžného dikyslíku O_2 , který dýcháme. Vzniká pomocí elektrických výbojů, nebo působením krátkovlnného ultrafialového záření na molekuly obyčejného kyslíku. Právě díky ozónu je záření s vlnovou délkou kratší 300 nm silně pohlcováno už v horních vrstvách atmosféry. UV záření lidské oko neregistruje, a protože tvoří jen malý zlomek z celkového slunečního záření dopadajícího na Zemi, nemá ani příliš velký význam z energetického hlediska. Po zdravotní stránce je však záření o takové vlnové délce velmi nebezpečné. Dokáže nevratně poškodit buňky živých organismů.



Obr. 1.3 Přeměna sluneční energie v zemské atmosféře - na základě [6]

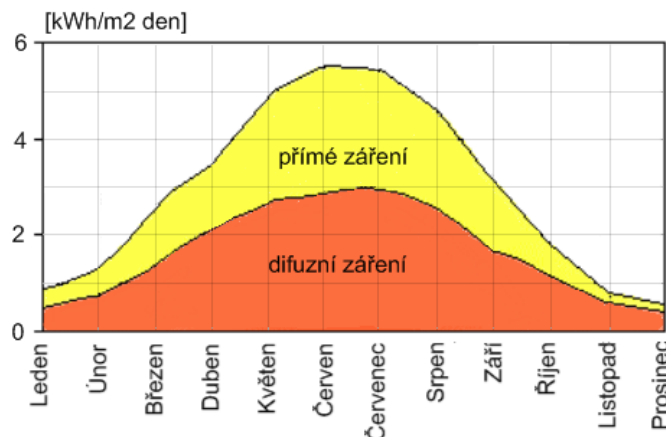
Obrázek 1.3 ukazuje průchod solární energie atmosférou. Asi 30 % z celkové dopadající energie se odrazí zpět do kosmického prostoru. Přibližně 19 % energie je pohlceno atmosférou. Zbytek energie je absorbován zemským povrchem (51 %). Povrch Země předává teplo atmosféře konvekcí zahřátého vzduchu (asi 7 %), nebo ve formě latentního (výparného) tepla spolu s vodními parami (23 %). Zemský povrch přímo vyzáří jen 21 % energie ve formě tepla. Z toho je 15 % opět absorbováno atmosférou a zbylých 6 % odchází do kosmického prostoru. Celkové tepelné (infračervené) záření atmosféry a zemského povrchu představuje 70 % z dopadajícího slunečního záření. Z obrázku 1.3 je patrné, že všechna pohlcená energie je Zemí zpětně vyzářena. Mezi příchozím slunečním zářivým tokem a zářivým tokem Země panuje rovnováha. Jakékoli porušení této rovnováhy by mělo za následek téměř okamžitou změnu klimatu. V závislosti na charakteru změny rovnováhy by se mohla Země příliš ohřívat, nebo ochlazovat.

1.2 Sluneční záření na Zemi

Při průchodu zemskou atmosférou se část solárního záření od atmosféry odrazí, část se v ní rozptýlí a část je atmosférou pohlcena. Na zemském povrchu je tedy intenzita přímého slunečního záření na jednotkovou plochu, kolmou ke slunečním paprskům o něco menší, než na povrchu atmosféry, kde je tato intenzita rovna $1\,360\text{ W/m}^2$ (solární konstanta).

Veškeré solární záření, které dopadá na zemský povrch, nazýváme *globálním zářením*. Sluneční záření, které dopadá přímo na povrch Země, aniž by změnilo směr, nazýváme *přímé sluneční záření*. Rozptylem přímého slunečního záření v atmosféře vzniká *záření difúzní*. K rozptylu dochází odrazem záření na molekulách plynů tvořících atmosféru, na prachových částicích, nebo v oblacích. Difúzní záření vzniká také odrazem od zemského povrchu. Na rozdíl od přímého záření nevrhá stíny a dopadá na zemský povrch ze všech možných směrů. Velikost jeho složky závisí na znečištění ovzduší, oblačnosti a charakteru zemského povrchu. Při velké oblačnosti dopadá na zemský povrch pouze difúzní záření.

Z celkového množství energie činí podíl rozptýleného záření 50 až 60 % (obr. 1.4). V zimních měsících, kdy je převážně oblačná obloha, je tento podíl vyšší. Celkové množství energie dopadající na horizontální osluněnou plochu na území České republiky v průběhu roku je znázorněno na obrázku v příloze 1.



Obr. 1.4 Množství přímého a difúzního záření v ČR v průběhu roku [7]

- Linkeho součinitel znečištění atmosféry Z

Součinitel znečištění (zakalení) Z závisí na obsahu exhalací v ovzduší a nadmořské výšce. Většinou je stanoven odhadem dle tab. 1.1.

$$Z = \frac{\ln I_0 - \ln I_N}{\ln I_0 - \ln I_{CA}} \quad [-] \quad (2)$$

kde I_0 je sluneční konstanta (1)

I_N je intenzita slunečního záření na plochu kolmou ke slunečním paprskům při daném znečištění ovzduší

I_{CA} je intenzita slunečního záření na plochu kolmou ke slunečním paprskům při dokonale čistém ovzduší

Tab. 1.1 Hodnoty Linkeho součinitele znečištění atmosféry

Součinitel znečištění Z	Charakteristická lokalita
2	místa nad 2000 m n. m.
2,5	místa nad 1000 m n. m.
3	venkov bez průmyslové činnosti
4–5	města a průmyslové oblasti
krátkodobě až 8	při vysoké koncentraci exhalací

- Přímé záření

Intenzita přímého slunečního záření na obecně položenou plochu je dána vztahem

$$I_p = I_{pn} \cos \gamma \quad [\text{W/m}^2] \quad (3)$$

kde I_{pn} je intenzita přímého záření na plochu kolmou ke slunečním paprskům

γ – úhel od normály oslněné plochy ke slunečním paprskům

$$I_{pn} = I_0 A^{-Z} \quad [\text{W/m}^2] \quad (4)$$

kde A je součinitel závislý na výšce Slunce nad obzorem

- Difúzní záření

Intenzita difúzního záření je dána vztahem [2]:

$$I_D = 0,5(1 - \cos \alpha) I_{Dh} + 0,5r(1 + \cos \alpha)(I_{Ph} - I_{Dh}) \quad [\text{W/m}^2] \quad (5)$$

kde I_{Ph} je intenzita přímého záření na vodorovnou plochu

$$I_{Ph} = I_{pn} \sin h \quad [\text{W/m}^2] \quad (6)$$

I_{Dh} – intenzita difúzního záření na vodorovnou plochu

$$I_{Dh} = 0,33(I_0 - I_{pn}) \sin h \quad [\text{W/m}^2] \quad (7)$$

r – reflexivní schopnost okolních ploch, tzv. *albedo*

α – úhel sklonu plochy od vodorovné roviny

h – výška slunce nad obzorem

Výšku Slunce nad obzorem lze vyjádřit také pomocí tzv. zenitového úhlu θ :

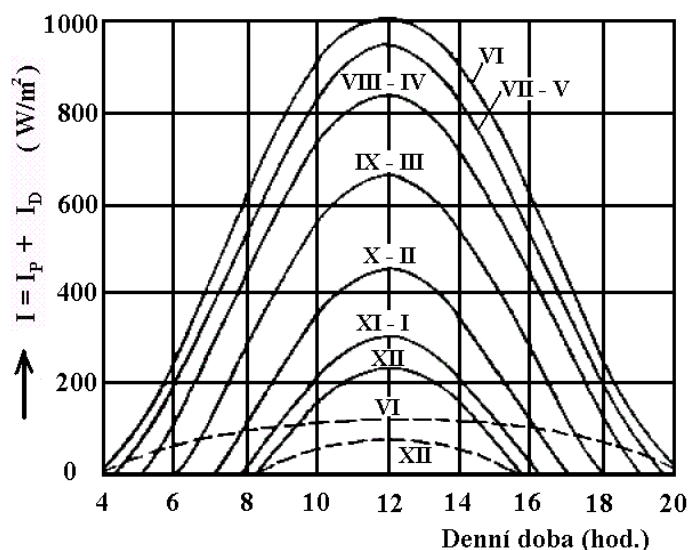
$$h = 90^\circ - \theta \quad [^\circ] \quad (8)$$

• Globální záření

Pro intenzitu celkového (globálního) slunečního záření platí

$$I = I_p + I_D \quad [\text{W/m}^2] \quad (9)$$

Existuje více způsobů výpočtu intenzity slunečního záření. Přesnější metody výpočtu zohledňují různé součinitele znečištění atmosféry, či zakřivení slunečních paprsků při průchodu atmosférou (tzv. refrakci).



Obr. 1.5 Intenzita celkového slunečního záření na vodorovnou plochu (na základě [2])

Obr. 1.5 popisuje průběh celkové intenzity slunečního záření na vodorovnou plochu v denní době při součiniteli znečištění atmosféry $Z = 3$, pro oblast zeměpisné šířky 50° . Jednotlivé křivky znázorňují charakteristický den v měsíci za jasného a slunečního počasí. Čárkovaná čára představuje průběh intenzity difúzního záření v měsících červen a prosinec. Difúzní záření za jasného počasí zpravidla nepřekračuje hodnotu 100 W/m^2 , což je asi 10 až 15 % z celkového záření [2].

Typické hodnoty intenzit celkového záření

Modré nebe:	800 – 1000 W/m^2	difúzní podíl	10 %
Zamlžené nebe:	600 – 900 W/m^2		až 50 %
Mlhavý podzimní den:	100 – 300 W/m^2		100 %
Zamračený zimní den:	50 W/m^2		100 %
Celoroční průměr	600 W/m^2		50 – 60 %

Zdroj [8].

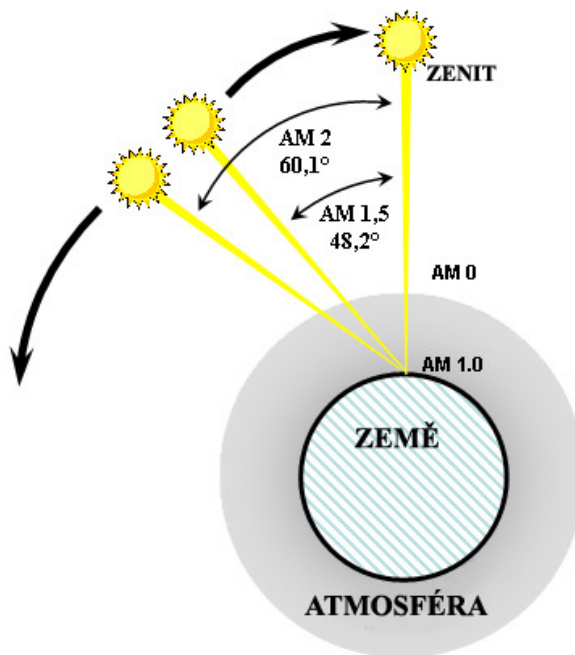
1.3 Vlivy na sluneční záření

Na sluneční záření na Zemi má zásadní vliv stav atmosféry. Ten je dán především oblačností. Mraky jsou největší překážkou v cestě slunečnímu záření na zemský povrch. Část dopadajícího záření je od mraků odražena a zbytek je rozptýlen do různých směrů. Rozptylem vzniká difúzní záření, které z energetického hlediska není příliš využitelné. Dalším zdrojem rozptylu záření je míra znečištění atmosféry. Čím více je v atmosféře obsaženo prachových částic a aerosolů, tím více se dopadající sluneční záření bude rozptylovat.

Sluneční záření ovlivňují následující faktory:

- stav atmosféry (oblačnost, znečištění atmosféry, případně mlha)
- tloušťka vrstvy atmosféry (AM faktor)
- roční období a denní doba
- zeměpisná šířka
- na intenzitu dopadajícího záření má vliv též sklon osluněné plochy a její orientace ke světovým stranám

Důležitým faktorem je tloušťka vrstvy vzduchu, kterou musejí sluneční paprsky překonávat. Tloušťku vrstvy vzduchu tzv. „Air Mass“ faktor určuje především výška Slunce nad obzorem (obr. 1.6) a pak nadmořská výška. Nachází-li se Slunce v zenitu (tzv. nadhlavníku) je AM faktor roven jedné. Sluneční paprsky svírají v tomto případě s horizontální rovinou na povrchu Země pravý úhel a tzv. zenitový úhel je roven nule.



Obr. 1.6 Výška slunce nad obzorem a AM faktor – převzato z [9]

Hodnota AM faktoru se vypočte z následujícího vztahu

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad , \text{ pro } \theta = 0^\circ \text{ až } 80^\circ \quad [-] \quad (10)$$

kde θ je úhel mezi Sluncem v zenitu a výchozí polohou (zenitový úhel). Hodnoty AM faktoru pro některé úhly jsou uvedeny v tabulce zařazené v příloze 2.

Každé místo na Zemi má své charakteristické klimatické podmínky a nadmořskou výšku. Stav atmosféry může člověk jen těžko ovlivnit, jediné k čemu může přispět, je snažit se o snížení míry znečištění ovzduší a to hlavně ve velkých průmyslových oblastech a městech.

1.4 Využití solárního záření

Solární energii lze využít dvěma způsoby. Tzv. solární architektura využívá sluneční energii *pasivním způsobem*, kdy se stavba navrhuje tak, aby ji co neúčelněji dokázala využít (obr. 1.7). K přeměně energie není použito žádné mechanické zařízení (např. solární kolektory). *Aktivní způsob* vyžaduje speciální technické zařízení (obr. 1.8 a obr. 1.9), které převede energii záření na jiný druh (elektrickou, nebo tepelnou).

Sluneční energie se dá využít například pro ohřev teplé užitkové vody, k vytápění domů, bazénů, k výrobě elektrické energie či k větrání průmyslových objektů (solární komín).

- Pasivní využití energie

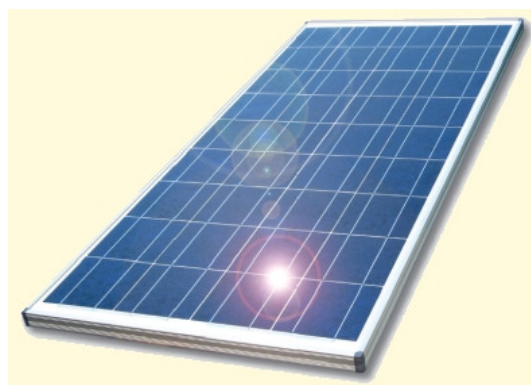


Obr. 1.7 Moravská zemská knihovna v Brně
(jižní fasáda je osazena pásovými okny za *předsazenou dvojitou solární stěnou*)

- Aktivní využití energie



Obr. 1.8 Solární kolektor [10]



Obr. 1.9 Fotovoltaický panel [11]

1.5 Výhody využití solárního záření

Jako každý jiný zdroj energie má i sluneční záření své výhody a nevýhody.

Mezi hlavní výhody využití solárního záření patří:

- nevyčerpatelný zdroj energie
- ekologicky čistá energie
- energie je dostupná všude a je zdarma
- šetří fosilní paliva, která znečišťují ovzduší
- nahrazuje až 50 % energie potřebné na vytápění a až 70 % na ohřev TUV
- vysoká životnost instalovaného zařízení (cca 30 let) a nenáročná údržba
- nízké provozní náklady
- solární zařízení je bezpečné, bezhlučné a dá se instalovat téměř kamkoli
- státní dotace na vybudování solárních systémů

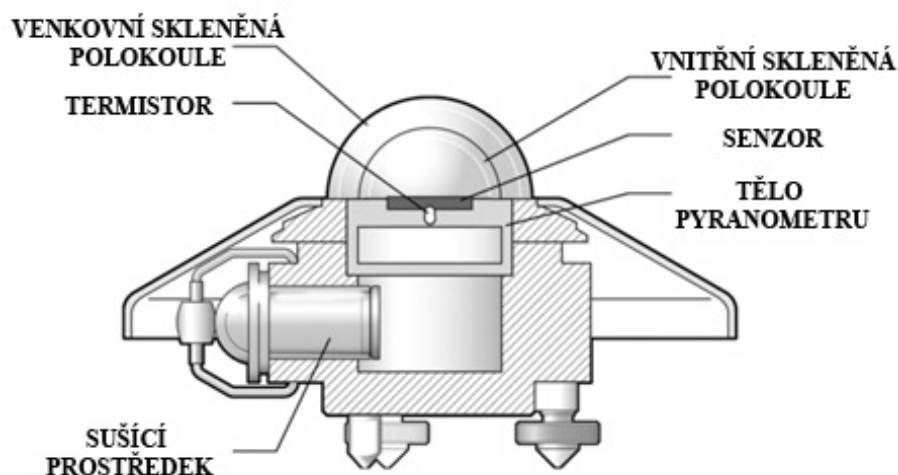
1.6 Nevýhody využití solárního záření

- intenzita slunečního záření a doba slunečního svitu během roku kolísá, proto je nutné používat také doplňkový zdroj energie, který nahradí solární systém v době nedostupnosti slunečního záření
- malá plošná hustota slunečního záření
- vysoké počáteční investiční náklady
- instalace solárních systémů vyžaduje dobrou izolaci objektu a úpravu topné soustavy
- solární systémy větších výkonů potřebují větší zástavnou plochu

2 MĚŘENÍ SOLÁRNÍHO ZÁŘENÍ

2.1 Měření globálního záření

K měření intenzity globálního solárního záření se používá přístroj zvaný *pyranometr* (obr. 2.1). Ten porovnává teplotu osluněné a neosluněné plochy, nebo teplotu černého a bílého povrchu pod skleněným krytem. Teplotní rozdíl je úměrný intenzitě dopadajícího záření. Přesné a kvalitní pyranometry obsahují velký počet sériově řazených termočlánků, pro zajištění dostatečně velkého výstupního napětí.



Obr. 2.1 Pyranometr Kipp&Zonen CM6B [12]

Mezi přední světové výrobce snímačů solárního záření patří holandská firma *Kipp&Zonen*, která vyrábí solární snímače od standardní kvality až po vysoce kvalitní snímače určené pro meteorologické a vědecké účely. Kvalitu pyranometru určuje třída přesnosti. Levnější variantu představují pyranometry českého výrobce firmy *Tlust'ák* (obr. 2.2), kde je požadované výstupní napětí zesíleno operačním zesilovačem. Použitím operačního zesilovače se zhorší parametry přístroje. Zhorší se jeho dynamické vlastnosti a zvýší se chyba měření. K provozu je nutný externí zdroj napájení operačního zesilovače.

Jinou levnější variantu představují pyranometry s čidlem na bázi křemíkového fotovoltaického článku, např. K&Z typ SP Lite2 (obr. 2.3). Při dopadu slunečního záření se na fotovoltaickém čidle indukuje napětí, které je úměrné dopadajícímu záření. Intenzita záření se získá přepočtem pomocí kalibračního koeficientu.



Obr. 2.2 Pyranometr firmy Tlust'ák typ SG002 [13]



Obr. 2.3 Pyranometr K&Z SP Lite2 [14]

2.2 Měření difúzního záření

Pro měření *difúzního záření* je třeba zabránit přímému dopadu slunečních paprsků na snímač. Zábрана může být realizována pomocí pohyblivé kruhové clony (obr. 2.4), nebo pomocí stínítka na pohyblivém zařízení (obr. 2.6), které sleduje pohyb Slunce po obloze tzv. „*Sun Tracker*“.



Obr. 2.4 Měření difúzní složky záření pomocí kruhové clony [15]



Obr. 2.5 Pyrheliometr (měření přímého záření) [16]

2.3 Měření přímého záření

K měření *přímého slunečního záření* se používá tzv. *pyrheliometr* (obr. 2.5). Ten je konstruován tak, aby odstínil difúzní složku záření. Pracuje na stejném principu jako pyranometr. Vzhledem k dennímu pohybu Slunce po obloze musí být pyrheliometr umístěn na pohyblivém zařízení sledující pohyb Slunce (obr. 2.6). Pokud chceme měřit přímé sluneční záření pouze na určitých vlnových délkách, musí být pyrheliometr vybaven vyměnitelnými filtry.



Obr. 2.6 Sun Tracker [17]

Přípevněné stínítko brání přímému slunečnímu svitu v dopadu na senzor pyranometru. V pravé části přístroje je připevněn pyrheliometr. Zařízení sleduje polohu Slunce v reálném čase.

3 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ SOLÁRNÍHO ZÁŘENÍ

3.1 Lokalita měření

Nejpřesnější metoda určení velikosti intenzity slunečního záření na daném místě a v daný čas je její změřením. Měření solárního záření probíhá zpravidla dlouhodobě. Měřením můžeme zjistit skutečné množství energie, které dopadlo na sledovanou plochu v daném časovém úseku, nebo sledovaném období.

Lokalita měření: VUT FSI v Brně v areálu Technická 2 budova C3

GPS souřadnice stanice: 49°13'29.35N, 16°34'29.50E [18]

Nadmořská výška: 293 m [18]

Klimatologické podmínky města Brna

Průměrná roční teplota vzduchu	+8,7 °C
Dlouhodobý průměr denní teploty v měsících červen – srpen	+17,9 °C
Dlouhodobý průměr denní teploty v měsících prosinec – únor	-1,1 °C
Průměrné množství srážek za rok	490,1 mm
Průměrný sluneční svit za rok	1 677,4 hod
Dlouhodobé normály klimatických hodnot za období 1961-1990 [19]	

3.2 Měřicí stanice

Snímače solárního záření jsou součástí meteorologické stanice umístěné na střeše budovy C3 v areálu Technická 2, FSI VUT v Brně. Měřicí stanice je instalována na tzv. *solárním komínu* (obr. 3.1) a nepřetržitě měří následující veličiny:

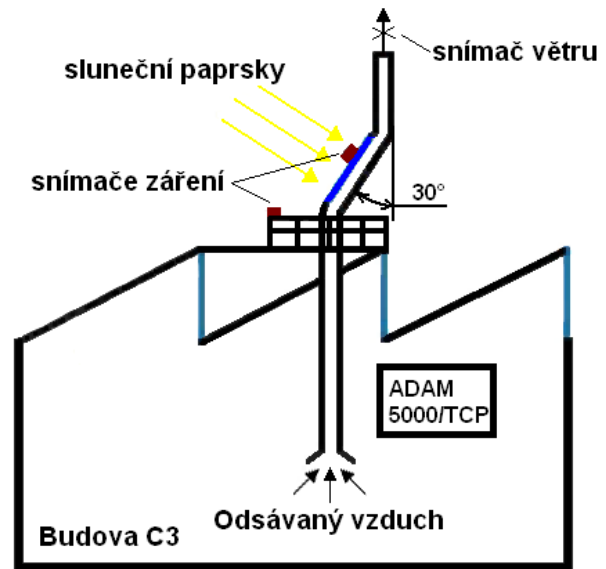
- Sluneční záření na horizontální plochu a na plochu v rovině komína
- Rychlost a směr větru
- Rychlost proudění v rouře těžkého i lehkého komína na obou stranách
- Rozdíl tlaku mezi exteriérem a interiérem budovy
- Měření teplot – venkovní, v hale, na vstupu, lehký a těžký komín nad sklem, lehký a těžký komín výstup, povrch plechu v lehkém, beton v těžkém, teplota trubky a souhrn dalších teplot k vědeckému výzkumu.

Solární komín je zařízení, které pasivním způsobem využívá dopadající sluneční energii, kterou mění na kinetickou energii proudícího vzduchu (obr. 3.2).

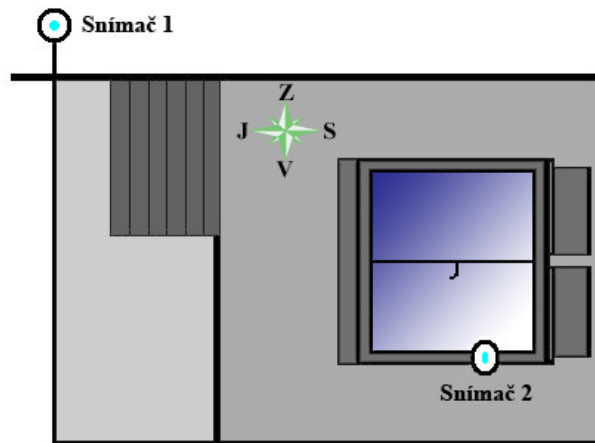
Měření probíhá v 10 sekundovém intervalu a je realizováno měřicí jednotkou *ADAM 5000/TCP*, která je umístěna v rozvaděči v hale pod solárním komínem. Pomocí počítačové sítě TCP jsou data přenášena do software, který je dále zpracovává. Měřená data jsou vizualizována ve formě grafu a ukládána do SQL databáze *Firebird 2.0* odkud mohou být snadno exportována do Excelu k dalšímu zpracování. [20]



Obr. 3.1 Solární komín
- externí část



Obr. 3.2 Schéma měřicí stanice (na základě [20])



Obr. 3.3 Pohled shora na měřicí stanici.

3.3 Použité snímače solárního záření

Měření slunečního záření je zprostředkováno dvěma snímači instalovanými na konstrukci měřicí stanice.

Snímač 1

Umístění: jihozápadní roh konstrukce, horizontálně (obr. 3.3 a obr. 3.4)

Typ snímače: pyranometr

Výrobce: Kipp&Zonen

Model: CM11

Citlivost: $5,16 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$

Odezva: 12 s

Přesnost: $\pm 10 \text{ W}/\text{m}^2$ na $1000 \text{ W}/\text{m}^2$

Popis: Sekundární standart, vysoká kvalita, meteorologické účely, testing



Obr. 3.4 Pyranometr 1 – měření dopadajícího solárního záření na vodorovnou plochu

Snímač 2

Umístění: na tělese solárního komína, skloněná plocha pod úhlem 30° od vertikály, orientovaná na jih (obr. 3.3 a obr. 3.5)

Typ snímače: Pyranometr

Výrobce: Kipp&Zonen

Model: CM6B (schéma snímače v kapitole 2.1)

Citlivost: 14,45 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$

Odezva: 18 s

Přesnost: $\pm 20 \text{ W}/\text{m}^2$ na $1000 \text{ W}/\text{m}^2$

Popis: První třída, dobrá kvalita, testing



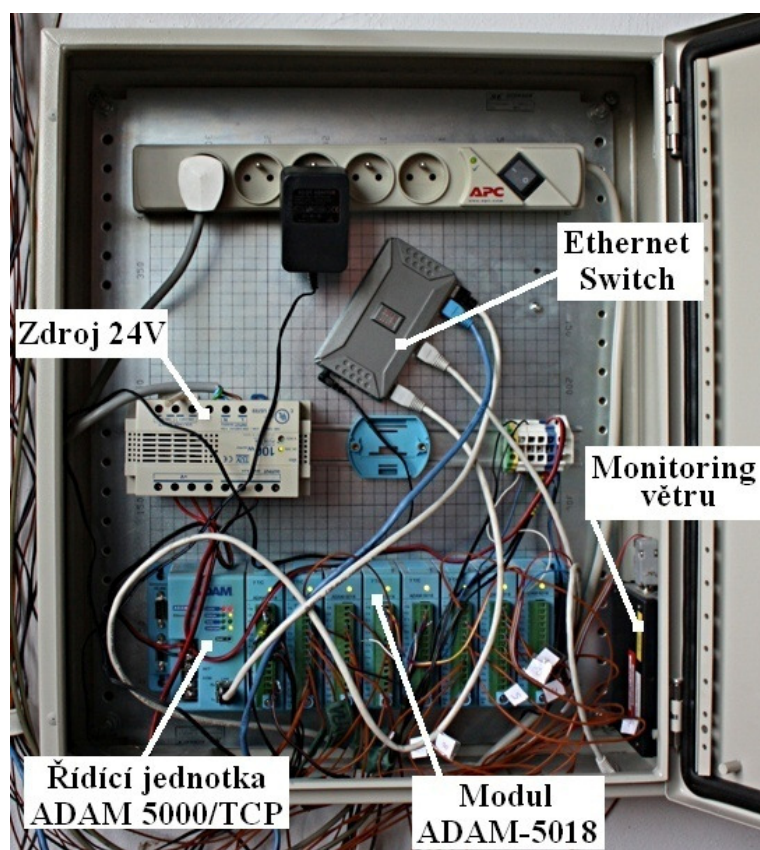
Obr. 3.5. Pyranometr 2 – měření dopadajícího slunečního záření na skloněnou plochu

3.4 Advantech ADAM 5000/TCP

Řídící jednotka ADAM 5000/TCP od firmy Advantech řídí veškerou činnost měřicí stanice. Jednotka se programuje pomocí nadřazeného počítače. Tento typ umožňuje realizovat přímé připojení na síť Ethernet do vzdálenosti až 100 m. Jádrem jednotky tvoří 32bitový procesor typu RISC. Jednotka obsahuje 4 MB RAM, 512 kB Flash ROM a dodává se s programovou podporou pro Windows, ModBus/ TCP a ActiveX. Umožňuje souběžně připojit až 8 hostitelských počítačů.

Komunikace s řídicím počítačem je zajištěna pomocí komunikační sběrnice RS-485 (do délky segmentu 1200 m), nebo RS-232 (15 m). Vzdálený přístup je zajištěn ethernetovým rozhraním TCP/IP. Montáž jednotky se realizuje na DIN lištu nebo panel.

Moduly ADAM jsou konstruovány pro průmyslové aplikace. Mají široký rozsah napájecího napětí, které je galvanicky odděleno od komunikačního rozhraní a měřicích obvodů. Každý modul je opatřen hlídacím obvodem (watchdog) i přepětíovou ochranou komunikačního vstupu. Pro všechny řady je k dispozici konfigurační software pro nastavení a testování sítě. [21]



Obr. 3.5 Pohled do rozvaděčové skříně.

Řídící jednotka je umístěna v rozvaděčové skříně (obr. 3.5) v hale pod solárním komínem. Rozvaděčová skříň obsahuje vlastní řídicí jednotku ADAM 5000/TCP s osmi moduly ADAM-5018, přívod elektrické energie pomocí rozbočovače APC s přepětíovou ochranou, zdroj napájecího napětí 24 V, Switch a jednotku pro měření rychlosti a směru větru.

3.5 Modul ADAM-5018

Jednotka je osazena osmi I/O moduly typu ADAM-5018 (obr. 3.6), což umožňuje připojení poměrně velkého počtu signálů z řízeného či monitorovaného procesu. Je to šestnáctibitový analogový vstupní modul, který obsahuje 7 kanálů s programovatelným vstupním rozsahem.

Technické specifikace

Bitové rozlišení: 16

Počet kanálů: 7 (diferenční)

Vstupní rozsah: $\pm 15 \text{ mV}$, $\pm 50 \text{ mV}$, $\pm 100 \text{ mV}$, $\pm 500 \text{ mV}$, $\pm 1 \text{ V}$, $\pm 2.5 \text{ V}$, $\pm 20 \text{ mA}$

Vstupní signál: mV, V, mA, termočlánek

Vzorkovací rychlost: 10 vzorků/s

Vstupní impedance: $2 \text{ M}\Omega$

Šířka pásma: $13.1 \text{ Hz @ } 50 \text{ Hz}$, $15.72 \text{ Hz @ } 60 \text{ Hz}$

Přesnost: $\pm 0.1\%$ (nebo vyšší)

Kolísání rozsahu: $\pm 25 \text{ PPM/}^\circ\text{C}$

Kolísání nuly: $\pm 6 \mu\text{V/}^\circ\text{C}$

Izolační ochrana: $3\,000 \text{ V (DC)}$

Přepět'ová ochrana: $\pm 35 \text{ V}$

Příkon: max. $0,63 \text{ W}$

Podporované typy termočláneků a rozsah pracovních teplot:

Tab. 3.1. Podporované typy termočláneků

Typ termočláneku	Rozsah pracovních teplot
J	$0 \sim 760 \text{ }^\circ\text{C}$
K	$0 \sim 1,370 \text{ }^\circ\text{C}$
T	$-100 \sim 400 \text{ }^\circ\text{C}$
E	$0 \sim 1,000 \text{ }^\circ\text{C}$
R	$500 \sim 1,750 \text{ }^\circ\text{C}$
S	$500 \sim 1,750 \text{ }^\circ\text{C}$
B	$500 \sim 1,800 \text{ }^\circ\text{C}$

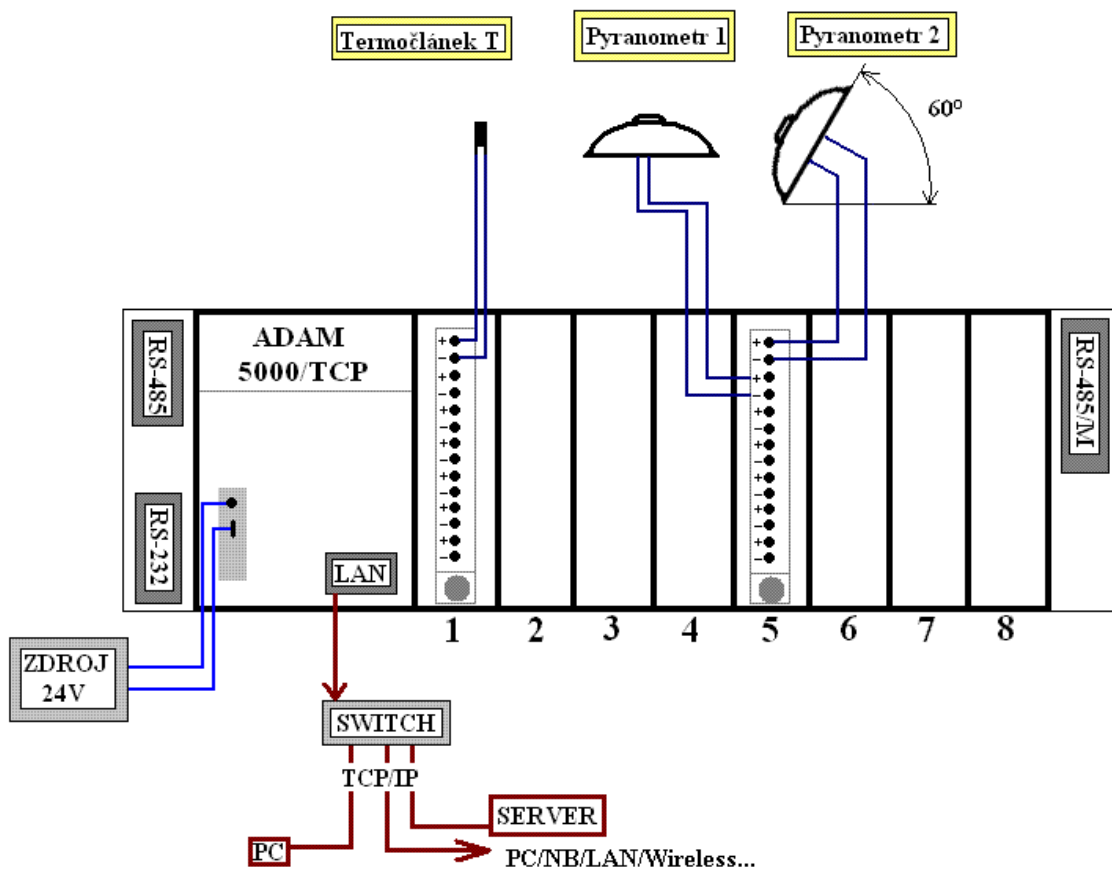


Obr. 3.6 Modul ADAM-5018 [22]

3.6 Schéma zapojení snímačů

Ze snímačů je vyveden signál do analogového modulu ADAM-5018, jehož činnost je řízena řídicí jednotkou ADAM 5000/TCP. Naměřená data jsou předávána k dalšímu zpracování po síti (TCP/IP). Hodnoty jsou ukládány do SQL databáze Firebird 2.0 a vizualizovány na internetových stránkách Energetického ústavu FSI VUT v Brně (odkaz [23]). Příklad grafického výstupu je uveden v příloze 3.

K modulům je přivedeno mnoho vstupních signálů. Z hlediska měření solárního záření mají význam pouze vstupní signály pyranometrů, které jsou přivedeny na modul 5. Teplota venkovního vzduchu je měřena termočlánkem typu T, jehož signál je přiveden na modul 1. Schéma zapojení je znázorněno na obrázku 3.6.



Obr. 3.6 Schéma zapojení snímačů

4 ZPRACOVÁNÍ DAT

Naměřené hodnoty jsou uloženy v SQL databázi Firebird 2.0. Pro jejich zpracování je třeba data nejdříve exportovat do MS Excelu. Export soubor obsahuje časový údaj měření s pořadovým číslem, velikost intenzity globálního slunečního záření na vodorovnou plochu, velikost intenzity globálního slunečního záření na skloněnou plochu a údaj o venkovní teplotě. Podle časového údaje exportovaných dat byly hodnoty zapisovány v časovém intervalu 65 sekund. Data se budou v tomto případě zpracovávat z období jednoho roku.

Sledované období

červen 2007 až květen 2008

červen 2008 až květen 2009.....vyhodnoceno v příloze 4

Z SQL databáze jsou data exportována po měsících. Je tedy celkem k dispozici 12 souborů, které je vzhledem k velkému objemu dat vhodné rozdělit na jednotlivé dny v roce. Každému dni v roce bude náležet jeden excelovský soubor, popřípadě jedna jeho záložka.

4.1 Ověření úplnosti dat

Po rozdělení a utřídění naměřených dat je třeba provést jejich vizuální kontrolu. V průběhu měření mohlo dojít k poruše na měřicí stanici, či k výpadku softwaru (např. při zamrznutí počítače) zaznamenávajícího měřená data. V době poruchy měřicího systému se žádná data nezaznamenávají. Byly pozorovány také případy cyklicky se opakujících hodnot se stejným pořadovým číslem.

Ve sledovaném období bylo registrováno celkem 36 případů selhání měřicího systému s celkovou dobou výpadku 1221,5 hodin, to je 50 dní a 21,5 hodin (viz tab. 4.1). Například v měsíci listopad 2007 došlo 3krát k selhání systému v celkovém počtu 142,5 hodin, což představuje 19,79 % z celkové doby měsíce. Funkčnost měřicího systémů musí být pravidelně kontrolována a případná porucha co nejdříve odstraněna.

Tab. 4.1. Přehled selhání systému měření

Měsíc	VI.07	VII.07	VIII.07	IX.07	X.07	XI.07	
počet selhání	1	1	1	1	1	3	
doba selhání (hod)	4	6,25	5,25	1,5	4,25	142,5	
(%)	0,56	0,84	0,71	0,21	0,57	19,79	
Měsíc	XII.07	I.08	II.08	III.08	IV.08	V.08	celkem za rok
počet selhání	2	8	8	4	1	5	36
doba selhání (hod)	222	121	141,5	58,5	209,25	305,5	1221,5
(%)	29,84	16,26	20,33	7,86	29,06	41,06	13,91 %

Chybějící data je třeba nahradit. Nejlépe průměrnými hodnotami záření z dostupných dat každého měsíce. Tím se zaručí, že měsíční průměry budou vycházet stejně. Pro vyhodnocení jsou však nejdůležitější data z letního období, která nejsou moc poškozena.

Dále je nutné brát na zřetel, že aplikace Firebird 2.0. při exportu čísla, jehož absolutní hodnota dosáhla 1000 a více, automaticky oddělí tisícovou hodnotu od zbytku čísla mezerou. MS Excel nepřidělí buňce s tisícovou hodnotou formát čísla a tudíž s ní ani nebude počítat. Buňky s tisícovými hodnotami je nutno upravit. Novější verze MS Office Excel 2007 umožňuje pracovat přímo s databázovým souborem ve formátu CSV, kde problém s tisícovými hodnotami odpadá.

4.2 Průměrné hodnoty intenzity slunečního záření

Průměrné hodnoty intenzity slunečního záření v denní době byly získány následujícím způsobem. Pomocí programu MS Excel a vhodně navrženého makra se určí průměrné hodnoty hodinové intenzity slunečního záření pro každý den v měsíci. Například průměrná hodnota intenzity záření ve 12 hodin odpoledne je rovna průměru intenzit v době od 11.30 do 12.30 hod. Navržené makro je třeba při aplikaci na každý následující den přizpůsobit, protože data jsou zapisována v intervalu 65 sekund. Jedna hodina tedy může obsahovat 55 hodnot a následující třeba 56.

Průměr všech dílčích hodinových intenzit záření v daném období je znázorněn v tabulkách 4.2 a 4.3.

Tab. 4.2 Intenzita globálního slunečního záření v denní době na vodorovnou plochu

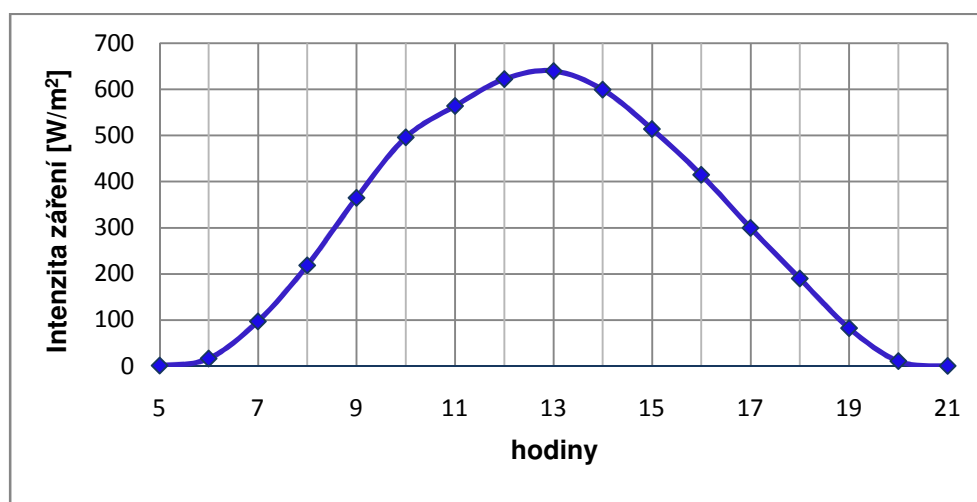
měsíc	Intenzita globálního záření ($I = I_p + I_D$ [W/m^2])											
	VI.07	VII.07	VIII.07	IX.07	X.07	XI.07	XII.07	I.08	II.08	III.08	IV.08	V.08
hodina												
5	11	5	2	2	2	2	3	3	2	1	2	4
6	66	47	17	3	2	2	3	3	2	4	4	24
7	188	157	97	26	6	8	3	3	9	42	41	95
8	309	279	218	103	37	44	14	13	46	123	138	195
9	393	422	365	208	107	103	50	53	143	241	229	286
10	531	535	496	316	202	151	82	92	204	329	362	388
11	581	600	564	386	273	190	101	140	283	368	477	466
12	627	646	622	425	317	188	106	155	289	385	536	472
13	652	602	639	415	322	168	119	165	286	407	534	441
14	570	626	599	386	269	116	69	116	228	373	477	430
15	542	528	514	350	221	64	31	65	172	279	471	437
16	406	501	415	286	142	16	6	18	85	192	388	325
17	355	401	299	184	68	2	3	3	19	92	294	281
18	246	257	190	80	11	2	3	2	1	18	222	202
19	134	150	83	12	1	2	3	3	1	1	108	115
20	53	52	11	1	2	2	3	2	1	1	17	36

Uvedená data se vztahují pouze na lokalitu VUT FSI v Brně a dané období, ve kterém probíhalo měření. Intenzita globálního záření na vodorovnou a skloněnou plochu je měřena pyranometry firmy Kipp&Zonen, umístěnými na měřicí stanici (viz kapitola 3.3. Použité snímače solárního záření). Hodnoty intenzity slunečního záření uvedené v tabulkách představují tzv. *charakteristický den v měsíci*, který charakterizuje průměrné hodnoty platné pro celý měsíc. Pro ukázkou je na obrázku 4.1 vyobrazen průběh intenzity solárního záření na vodorovnou plochu pro charakteristický den měsíce srpna 2007.

Tab. 4.3 Intenzita globálního slunečního záření v denní době na skloněnou plochu

měsíc	Intenzita globálního záření ($I = I_p + I_d$) [W/m^2]											
	VI.07	VII.07	VIII.07	IX.07	X.07	XI.07	XII.07	I.08	II.08	III.08	IV.08	V.08
hodina												
5	6	3	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1
6	30	23	9	1	1	1	1	1	1	2	2	13
7	67	55	44	20	4	6	1	1	7	39	22	44
8	152	136	136	98	35	69	16	18	52	125	84	101
9	265	286	297	221	133	159	73	87	226	277	183	200
10	410	422	458	362	280	233	106	142	322	396	325	311
11	483	518	559	461	380	286	139	223	438	439	465	406
12	539	581	638	500	431	271	158	226	424	448	539	411
13	570	549	659	479	429	254	216	277	421	485	535	384
14	502	578	619	466	365	173	115	196	351	475	482	393
15	464	481	521	424	318	113	41	111	291	348	475	400
16	333	431	403	346	206	26	4	32	146	248	398	286
17	257	309	270	216	102	1	1	1	26	115	280	225
18	149	162	144	86	12	0	1	1	0	15	193	152
19	65	73	47	9	0	0	1	1	0	0	75	75
20	27	26	7	0	0	0	1	1	0	0	11	20

Parametry skloněné plochy: sklon 60° od vodorovné plochy, orientace na jih.



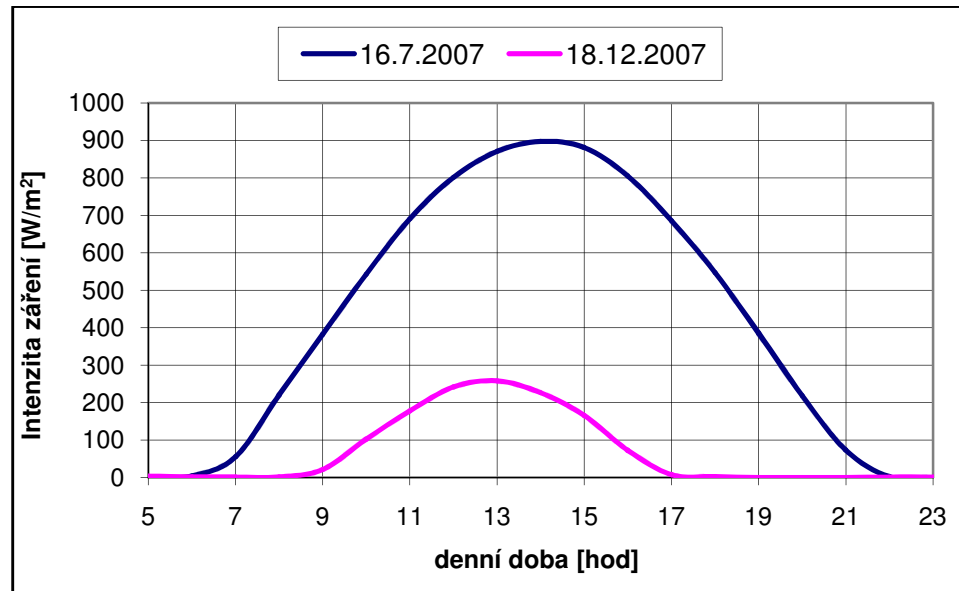
Obr. 4.1 Průběh intenzity záření na vodorovnou plochu pro charakteristický den měsíce srpna 2007.

Vliv zastínění

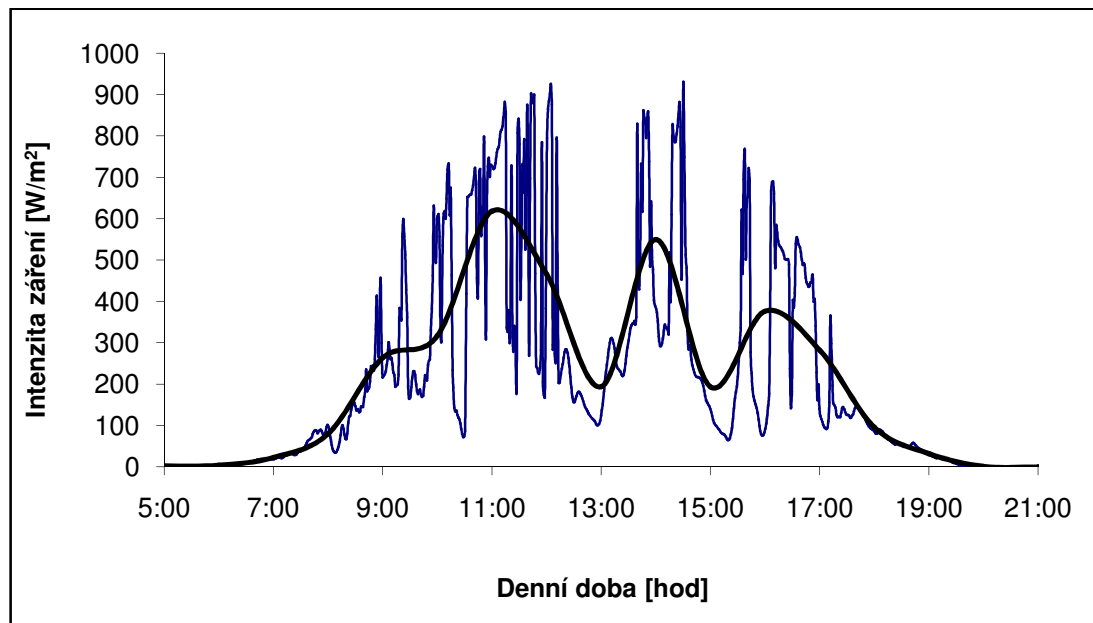
Zastínění nastává v případě, kdy v cestě přímým slunečním paprskům v dopadu na určité místo brání nějaké těleso, ráz krajiny (kopce, stromy) nebo budovy. V takovém případě je přítomná pouze difúzní složka záření. K zastínění dochází nejčastěji v brzkých ranních hodinách, nebo v pozdních odpoledních, kdy je Slunce nízko na obloze. Pro nejefektivnější využití sluneční energie je třeba vybírat místa bez vlivu zastínění okolním prostředím.

V brzkých ranních hodinách je pozorovatelné zastínění jednoho ze snímačů záření, patrně bodovou A1 FSI. Jedná se však o velmi krátkou dobu, která je vzhledem k celkové denní době záření zanedbatelná.

Velikost intenzity slunečního záření v denní době je náhodná veličina, která závisí především na stavu atmosféry. Letní slunečný den se vyznačuje vysokými hodnotami intenzity záření a poměrně dlouhou dobou slunečního svitu. Průběh intenzity v grafu je hladký s maximem kolem poledne. V zimních měsících je délka slunečního svitu velmi krátká a stejně tak intenzita záření nedosahuje vyšších hodnot. Porovnání letního a zimního slunečného dne znázorňuje obr. 4.2. Běžný reálný den se potýká se střídavou oblačností, to má za následek kolísání intenzity záření (obr. 4.3).



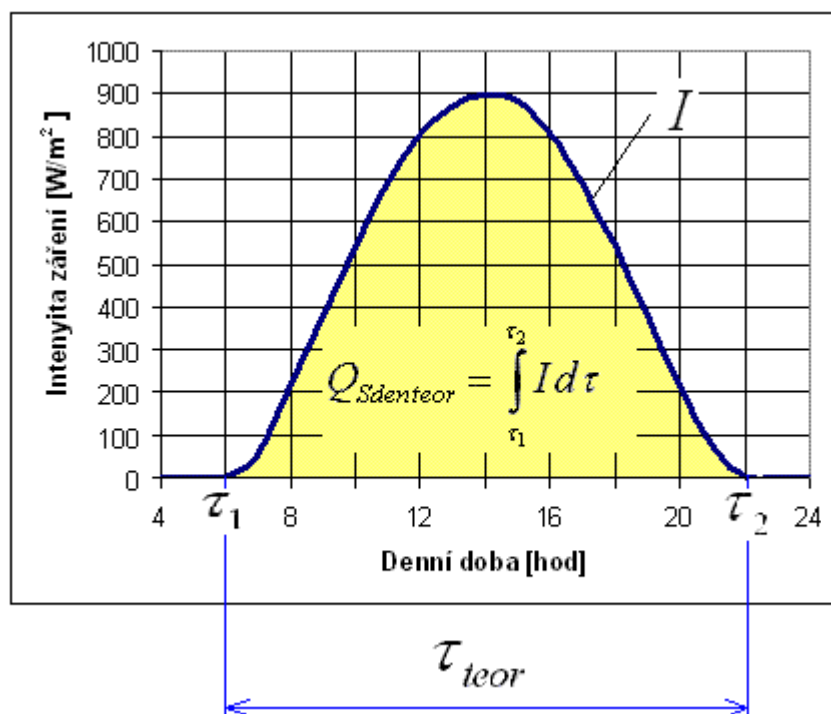
Obr. 4.2 Intenzita globálního záření na vodorovnou plochu slunečného dne v letním období 16. 7. 2007 a v zimním období dne 18. 12. 2007.



Obr. 4.3 Průběh skutečné intenzity slunečního záření ze dne se střídavou oblačností 1. 9. 2007. Skutečný průběh lze nahradit průměrnými hodnotami záření v daném časovém intervalu (černá křivka).

4.3 Energie dopadající na osluněnou plochu

Plocha pod křivkou udávající denní průběh intenzity celkového slunečního záření je úměrná energii dopadající na osluněnou plochu za den $Q_{Sden\ teor}$ (Wh/m^2) [2].



Obr. 4.4 Množství energie dopadající na plochu $1m^2$ za den (na základě [2])

Pokud se křivka popíše vhodnou matematickou rovnicí, lze množství energie vypočítat integrováním dané rovnice.

$$Q_{Sden\ teor} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} I d\tau \quad [Wh/m^2] \quad (11)$$

kde $Q_{Sden\ teor}$ je teoretické množství energie dopadající na $1m^2$ osluněné plochy

I je velikost intenzity slunečního záření vyjádřené jako $I = f(\tau)$

τ_1 a τ_2 udávají teoretickou (astronomickou) dobu slunečního svitu τ_{teor}

Tento způsob výpočtu můžeme použít např. pro průběh intenzity záření charakteristického dne v měsíci. Po vynásobení denního množství energie počtem dní daného měsíce, získáme celkové množství energie dopadající na jednotkovou plochu za měsíc. Stejným způsobem lze určit celkové množství energie za určité období, nebo za rok.

Skutečné množství energie dopadající na osluněnou plochu je dáno především oblačností. Oblačnost propouští jen část slunečního záření, které se rozptýlí do různých směrů (difúzní záření). Nejpřesnějším způsobem určení množství dopadající energie je spočítat skutečnou plochu pod křivkou skutečného průběhu intenzity solárního záření. Pro zjednodušení se dá skutečný průběh intenzity záření rozdělit podle časových fází na úseky jasné a zatažené oblohy.

Pokud nemáme k dispozici údaje o časových fázích (jasno a zataženo) můžeme vycházet z dlouhodobých klimatických údajů. Množství skutečně dopadající energie je pak rovno

$$Q_{skut} = \frac{\tau_{skut}}{\tau_{teor}} Q_{Sden\ teor} \quad [\text{Wh/m}^2] \quad (12)$$

kde τ_{skut} je skutečná doba slunečního svitu

τ_{teor} je teoretická (astronomická) doba slunečního svitu

V našem případě, kdy známe průměrné hodinové hodnoty intenzit slunečního záření v daném období, je způsob určení množství dopadající energie na jednotkovou plochu následující. Průměrná intenzita slunečního záření v každé hodině se počítala pomocí průměru v intervalu 60 minut. Tím se všechny naměřené hodnoty v daném intervalu nahradili jednou konstantní hodnotou. Za předpokladu konstantního záření po určitou dobu dopadne na osluněnou plochu množství energie úměrné této době. Při konstantním záření 500 W/m^2 po dobu jedné hodiny dopadne na ozářenou plochu 500 Wh/m^2 . Známe-li tedy průměrné hodinové intenzity v jednotlivých dnech, můžeme stanovit množství energie dopadající na osluněnou plochu jejich součtem (viz tab. 4.4)

Tab. 4.4 Množství energie dopadající na osluněnou plochu

Množství sluneční energie Q				
měsíc	$Q_{pH}(\text{den})$ [Wh/m ²]	$Q_{pV}(\text{den})$ [Wh/m ²]	$Q_H(\text{měs})$ [kWh/m ²]	$Q_V(\text{měs})$ [kWh/m ²]
VI.07	5610	4293	168,3	128,8
VII.07	5754	4606	178,4	142,8
VIII.07	5036	4758	156,1	147,5
IX.07	3085	3593	92,6	107,8
X.07	1889	2576	58,6	79,9
XI.07	980	1490	29,4	44,7
XII.07	558	847	17,3	26,3
I.08	786	1262	24,4	39,1
II.08	1738	2671	50,4	77,4
III.08	2831	3394	87,8	105,2
IV.08	4172	3983	125,2	119,5
V.08	4160	3402	129,0	105,5

$Q_{pH}(\text{den})$průměrné denní množství energie dopadající na vodorovnou plochu

$Q_{pV}(\text{den})$průměrné denní množství energie dopadající na šikmou plochu

$Q_H(\text{měs})$množství energie dopadající na vodorovnou plochu za měsíc

$Q_V(\text{měs})$množství energie dopadající na šikmou plochu za měsíc

Celkové množství energie, které dopadlo na osluněnou plochu za období červen 2007 až květen 2008:

$$Q_{H(\text{celk})} = 1117,2 \text{ kWh/m}^2 \quad (13)$$

$$Q_{V(\text{celk})} = 1124,4 \text{ kWh/m}^2 \quad (14)$$

Roční úhrn záření v našich klimatických podmínkách je 800-1250 kWh/m² [8]

4.4 Délka slunečního svitu a průměrná teplota

Délkou slunečního svitu rozumíme počet hodin, po které dopadalo na zemský povrch přímé sluneční záření. Naměřené hodnoty délky slunečního svitu ve sledovaném období jsou uvedeny v tab. 4.5. Dobou slunečního svitu označujeme časový interval působení přímého slunečního záření např. 12.00 až 15.30 hod. Sluneční záření od 120 W/m^2 lze podle Světové meteorologické organizace (WMO) prohlásit za přímé.

K měření slunečního svitu se používá zařízení zvané *slunoměr*, nebo také *heliograf*. *Campbellův-Stokesův* slunoměr (obr. 4.5) využívá tepelného účinku slunečních paprsků. Soustředěním sluneční energie se vypaluje na speciální teplocitlivou registrační pásku stopa. Jedná se o klasický způsob měření, který je stále hojně rozšířen v oblasti meteorologie. V současné době je však nahrazován mnohem přesnějšími digitálními přístroji (obr. 4.6), které pracují na bázi fotovoltaiických článků.

Tab. 4.5 Délka slunečního svitu

Meorologická stanice Brno, Tuřany												
Měsíc	VI.07	VII.07	VIII.07	IX.07	X.07	XI.07	XII.07	I.08	II.08	III.08	IV.08	V.08
$\tau_{\text{skut}}[\text{h}]$	239,5	268,9	248,6	160,6	101,2	53,4	24,5	47,6	107,6	139,1	182,6	219,6

Zdroj: Český hydrometeorologický ústav [24]

Celková délka slunečního svitu v období červen 2007 až květen 2008

$$\tau_{\text{skut (celk)}} = 1793,2 \text{ hodin} \quad (15)$$

Dlouhodobý roční průměr délky slunečního svitu pro Brno je 1677,4 hodin [19]



Obr. 4.5 Campbellův-Stokesův slunoměr [25]



Obr. 4.6 Digitální slunoměr CSD 3 K&Z [26]

Průměrná teplota venkovního vzduchu byla stanovena na základě měření a následného zpracování exportních dat. Měření teploty probíhá nepřetržitě termočlánkem typu T (omega), umístěným na měřicí stanici. Průměrné teploty jsou uvedeny v tab. 4.6.

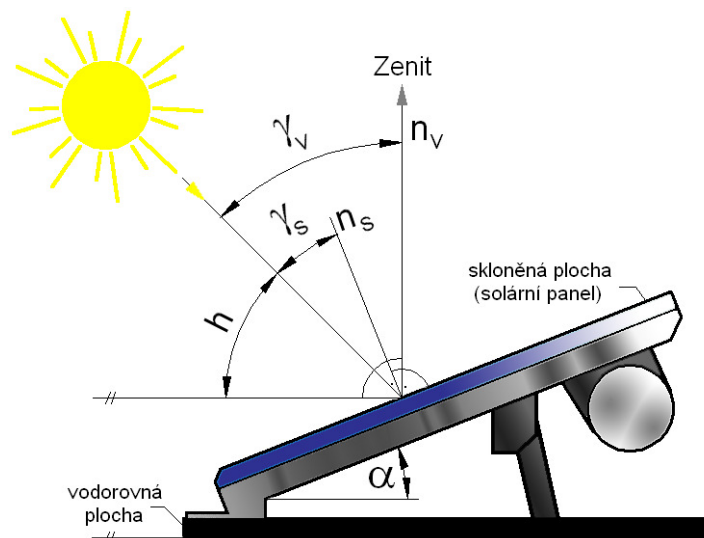
Tab. 4.6 Průměrná teplota vzduchu v jednotlivých měsících

Meteorologická stanice Brno, VUT FSI												
Měsíc	VI.07	VII.07	VIII.07	IX.07	X.07	XI.07	XII.07	I.08	II.08	III.08	IV.08	V.08
$t [^{\circ}\text{C}]$	21,2	21,5	21,1	13,6	8,3	2,1	-2,0	2,5	3,1	4,1	11,7	14,0

4.5 Porovnání dopadajícího záření na vodorovnou a skloněnou plochu

Z měření je patrné, že velikost intenzity slunečního záření na vodorovné ploše je odlišná od velikosti intenzity slunečního záření na ploše šikmé. Tento rozdíl intenzit je dán odlišným úhlem dopadu paprsků slunečního záření na vodorovnou a šikmou plochu. Podle vztahu (3) je velikost intenzity přímé složky slunečního záření úměrná kosinu úhlu γ od normály osluněné plochy ke slunečním paprskům (obr. 4.7).

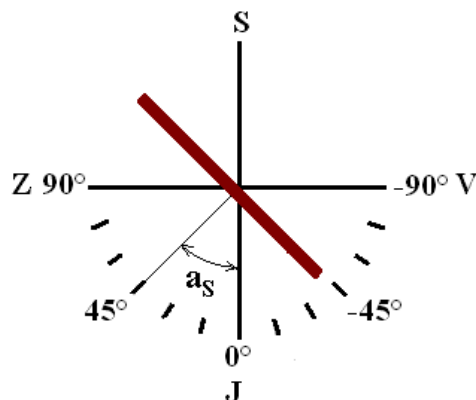
Největší intenzity slunečního záření se dosáhne v okamžiku, kdy budou sluneční paprsky dopadat kolmo na osluněnou plochu. Intenzita slunečního záření bude s rostoucím úhlem γ klesat, až do okamžiku kdy bude směr dopadajících slunečních paprsků rovnoběžný s osluněnou plochou, kdy je intenzita slunečního záření dána pouze její difúzní složkou.



Obr. 4.7 Geometrie dopadu slunečního paprsku na osluněnou plochu

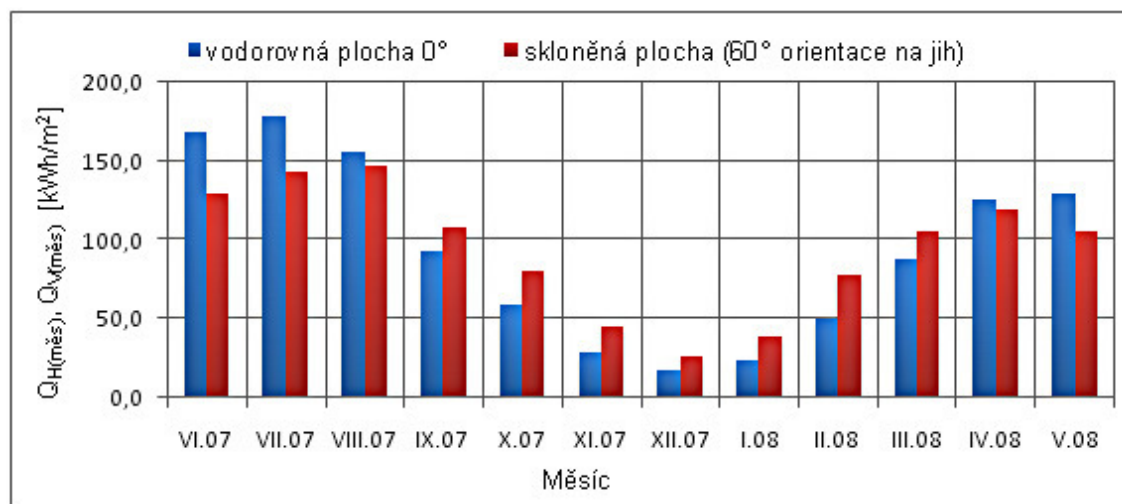
γ_v – úhel dopadu paprsku na vodorovnou plochu (též zenitový úhel θ), γ_s – úhel dopadu paprsku na skloněnou plochu, n_v – normála vodorovné plochy, n_s – normála skloněné plochy, h – výška Slunce na obloze, α – úhel sklonu plochy.

Parametry osluněné plochy jsou dány její rozlohou, sklonem a orientací. Sklonem osluněné plochy rozumíme úhel, který svírá s vodorovnou rovinou. Orientace plochy je dána její pozicí vůči světovým stranám (azimutový úhel a_s obr. 4.8).



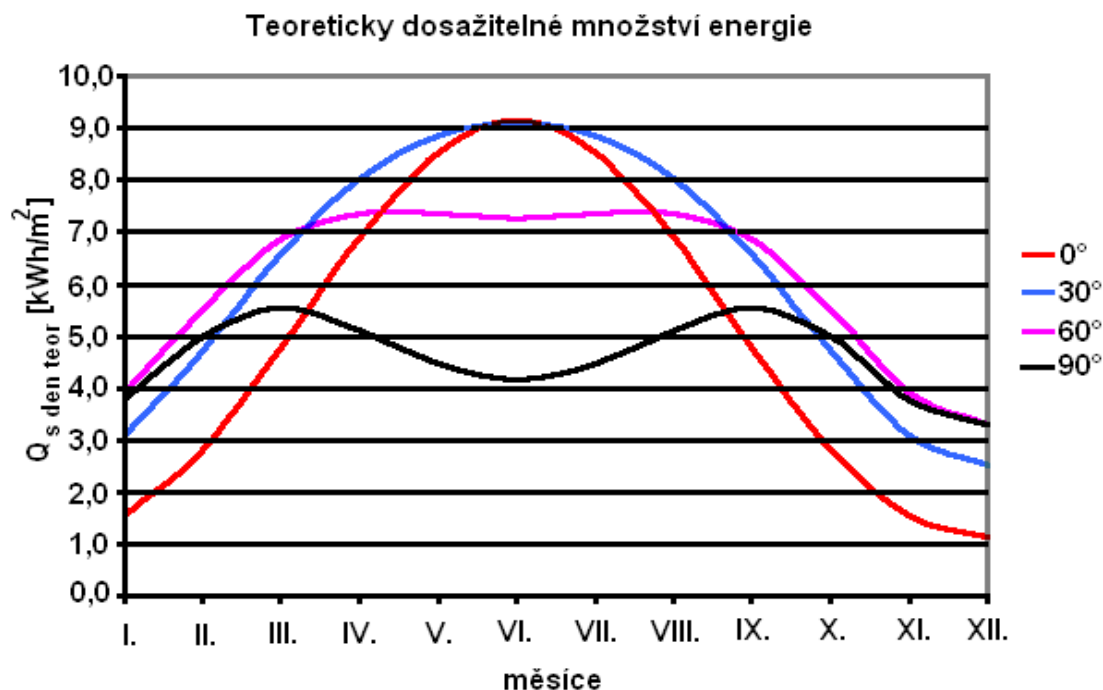
Obr. 4.8 Azimutový úhel plochy – azimut 45° jihozápadně

Obr. 4.9 porovnává skutečné množství sluneční energie, které dopadlo na osluněnou plochu v lokalitě VUT FSI ve sledované době. Z obrázku je patrné, že v letním období má vyšší energetický zisk vodorovná plocha. V zimním období (září-březen) se Slunce pohybuje poměrně nízko po obloze, proto je úhel od slunečních paprsků k normále osluněné plochy menší v případě skloněné plochy, která má v tomto období vyšší zisk energie.



Obr. 4.9 Energie dopadajícího slunečního záření na vodorovnou a skloněnou plochu za měsíc (na základě tab. 4.4, lokalita VUT FSI Brno)

Porovnání teoreticky dosažitelných energetických zisků jižně orientované plochy s různým sklonem je vyobrazeno na obr. 4.10. V letním období je vhodné provozovat solární zařízení se sklonem 25° až 35° a v zimním období 60° až 90°. Pro celoroční provoz je optimální sklon plochy 40° až 45°. Nejlépe je vždy orientovat plochu na jih ($\pm 30^\circ$).



Obr. 4.10 Teoretické energetické zisky při různém sklonu osluněné plochy - orientace jih (na základě [27])

V kapitole 4.3 byl zpracováním naměřených dat zjištěn roční energetický zisk vodorovné plochy $Q_{H(\text{celk})} = 1117,2 \text{ kWh/m}^2$ a šikmé plochy $Q_{V(\text{celk})} = 1124,4 \text{ kWh/m}^2$. V letním období je energeticky výhodnější vodorovná plocha, která má např. v měsíci červen 2007 až o 30,7 % vyšší energetický zisk. V chladných měsících je tomu naopak. Např. v měsíci leden 2008 vykazuje skloněná plocha až o 60,6 % vyšší zisk energie proti vodorovné. V ročním souhrnu je rozdíl mezi vodorovnou a skloněnou plochou minimální (méně než 1 %). V případě jiného sklonu a jiné orientace šikmé plochy by energetické rozdíly mezi osluněnými plochami nabývaly jiných hodnot.

Pro neefektivnější využití dopadajícího slunečního záření je žádoucí, aby sluneční paprsky dopadaly na osluněnou plochu pod pravým úhlem. Tím se dosáhne maximálního energetického zisku a minimálních ztrát odrazem. Proto je dobré vybavit solární soustavu přídatným natáčecím zařízením, které v průběhu dne sleduje pohyb Slunce po obloze. Natáčení může být realizováno buď v jednom směru (sleduje se azimut Slunce od východu k západu), nebo dvousosé (sleduje azimut i výšku Slunce nad obzorem).

Přídavné natáčecí zařízení vyžaduje nákladnější investici do solárního zařízení. Natáčení je náročnější na údržbu a vnáší do systému vyšší pravděpodobnost poruchy. Z těchto důvodů se v praxi moc nevyužívá. Přídavným natáčecím zařízením je možno zvýšit celkový energetický zisk plochy o 20 až 30 %. Další možností jak docílit vyššího energetického zisku na danou plochu je využití koncentrátorů slunečních paprsků. Nejběžnějším koncentrátorem je zrcadlo, které odráží paprsky do potřebného místa. Koncentrací slunečních paprsků lze výkon solárního systému až zdvojnásobit. Na obr. 4.11 je vyobrazen solární panel s natáčením v jedné ose (polární natáčení) a s hřebenovým koncentrátorem záření.



Obr. 4.11 Pohyblivý solární panel instalovaný ve Španělsku (500W) [28]

ZÁVĚR

Vlivem pohybu Slunce po obloze se nabídka solárního záření v průběhu roku mění. Nejpřesnější metodou určení množství dopadajícího solárního záření je experimentální měření. K tomuto účelu byla vybudována v lokalitě VUT FSI v Brně meteorologická stanice, která je umístěna na konstrukci tzv. solárního komínu. Měření probíhá za pomoci dvou snímačů záření od světového výrobce Kipp&Zonen. První z pyranometrů snímá záření v horizontální rovině. Druhý pyranometr je upevněn tak, aby svíral s horizontální rovinnou úhel 60° . Sklon roviny je orientován na jih.

Z měřených údajů vyplynulo, že ve sledovaném období dopadlo na vodorovnou plochu celkem $1117,2 \text{ kWh/m}^2$ energie, z toho přibližně 76 % připadá na letní období od dubna do září. V případě skloněné plochy se jedná o $1124,4 \text{ kWh/m}^2$ energie, z toho na letní období připadá přibližně 67 %. Průměrný roční úhrn dopadající sluneční energie se v našich klimatických podmínkách pohybuje v rozmezí od 800 až do 1250 kWh/m^2 .

V letním období má vyšší energetický zisk vodorovná osluněná plocha. V období od září do března dopadá více energie na plochu skloněnou. Energetický zisk osluněné plochy souvisí s úhlem dopadu slunečních paprsků na povrch plochy a s dobou slunečního svitu. Úhel dopadu slunečních paprsků je dán výškou Slunce na obloze, sklonem a orientací osluněné plochy ke světovým stranám. Dobu slunečního svitu určuje roční období a oblačnost atmosféry. Délka slunečního svitu čítá v červenci 2007 celkem 268,9 hodin, zatím co v prosinci 2007 jen 24,5 hodiny. Zimní měsíce jsou charakteristické malou výškou Slunce na obloze a krátkou dobou slunečního svitu. Proto je v této době ze solárního záření mnohem menší energetický zisk. Jak velké množství z celkové dopadající energie lze využít k přeměně na jiný druh energie, záleží na vlastnostech použitého solárního systému.

V příloze 4 jsou oproti požadavku v zadání bakalářské práce vyhotovena také data za další rok, tedy za období červen 2008 až květen 2009. Výsledky práce vychází z experimentálního měření solárního záření a mohou tedy sloužit jako podklad pro výpočty solárních kolektorů a fotovoltaiky.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Murtinger, K; Beranovský, J; Tomeš, M. *Fotovoltaika, elektřina ze slunce*. 1. vyd. Brno : ERA, 2007. 81 s. ISBN 978-80-7366-100-7
- [2] Cihelka, Jaromír. *Sluneční vytápěcí systémy*. Praha : SNTL, 1984. 206 s.
- [3] Kleczek, Josip. *Sluneční energie : úvod do helioenergetiky*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1981. 192 s.
- [4] Wikipedia The Free Encyclopedia : *Sun [online]*. 2001, last updated 2010-4-20 [2010-4-20].< <http://en.wikipedia.org/wiki/Sun>>.
- [5] Chemistry of the Environment : *Greenhouse Effect [online]*. 1996, 2008-3-26 [2010-4-20].< <http://bouman.chem.georgetown.edu/S02/lect23/lect23green.html>>.
- [6] Atmospheric Science Data Center : *Earth's Radiation Budget Facts [online]*. 2007, [2010-4-21]. Dostupný z WWW: <http://eosweb.larc.nasa.gov/EDDOCS/radiation_facts.html>.
- [7] Isofen Energy s.r.o. : *Teorie fotovoltaiky [online]*. 2009, [2010-4-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.isofenenergy.cz/fotovoltaika.aspx>>.
- [8] Ball Brno, v.o.s. : *Využitelnost solárních zařízení v České republice [online]*. 2010, [2010-4-21]. Dostupný z WWW: <http://www.ballbrno.cz/html_cz/produkty-kolektory.html>.
- [9] University of Durham : *Durham Physic, Semiconductor & Electroceramic [online]*. 2003, [2010-4-22]. Dostupný z WWW: <http://www.dur.ac.uk/~dph0www5/am1_5.html>.
- [10] Petr Koubek, solární systémy: *Pust'te solární energii do domu [online]*. 2008, [2010-4-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.petrkoubek.cz/obecne-informace.htm>>.
- [11] Solar Power s.r.o. : *Fotovoltaické panely KIOTO [online]*. 2009, [2010-4-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.solarpower.cz/default.asp?p=fotovoltaika>>
- [12] Kipp & Zonen B.V. : *Gebrauchsanleitung CM6B, CM7B [online]*. 2003, [2010-4-22]. Dostupné z WWW: <[http://www.kippzonen.com/?download/661/CM+6B+++7B+Pyranometer+-+Manual+\(German\).aspx](http://www.kippzonen.com/?download/661/CM+6B+++7B+Pyranometer+-+Manual+(German).aspx)>.
- [13] Fiedler – Magr. : *Elektronika pro ekologii [online]*. 2010, [2010-4-27]. Dostupný z WWW: <<http://www2.fiedler-magr.cz/index.php?str=v/SG002&ela>>.
- [14] Kipp & Zonen Brochure SP Lite. : *SP Lite2 Pyranometer [online]*. 2010, [2010-4-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.kippzonen.com/?product/991/SP+Lite2.aspx>>.
- [15] Project Energie Solara : *Prezentare stație [online]*. 2009, [2010-4-27]. Dostupné z WWW: <<http://solar.physics.uvt.ro/srms/index.php?target=info&lang=ro>>.

- [16] EKO Instruments co., ltd. : *Pyrheliometer MS-54 [online]*. 1996, [2010-4-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.eko-usa.com/products/am/pyrheliometer/MS-54/index.html>>.
- [17] EKO Instruments co., ltd. : *Sun Trackers STR 21 [online]*. 1996, [2010-4-27]. Dostupné z WWW : <<http://www.eko-usa.com/products/am/STR/STR-2x/index.html>>.
- [18] Software : *Google Earth 5.0 [online]*. 2010, [2010-4-28]. Dostupný z WWW : <<http://earth.google.com>>.
- [19] Český hydrometeorologický ústav : *Dlouhodobé normály klimatických hodnot za období 1961-1190 [online]*. 2010, [2010-4-28]. Dostupné z WWW : <<http://www.chmu.cz/meteo/ok/okdata12.html>>.
- [20] Energetický ústav - Odbor termomechaniky a techniky prostředí : *laboratoře [online]*. [2010-4-28]. Dostupný z WWW : <<http://ottp.fme.vutbr.cz/index.php?lang=1&menu=5&polozka=3>>.
- [21] AUTOMA : *Deset let modulů ADAM na našem trhu [online]*. 2009, [2010-4-28]. Dostupný z WWW : <http://automa.mpresent.cz/index.php?id_document=28846>.
- [22] Advantech : *7-ch Thermocouple Input Module [online]*. 2009, [2010-4-30]. Dostupný z WWW : <http://www.advantech.com/products/ADAM-5018/mod_1-2MLB3D.aspx>.
- [23] Energetický ústav – Odbor termomechaniky a techniky prostředí : *Informační systém solárního komínu [online]*. 2010, [2010-4-30]. Dostupný z WWW : <<http://147.229.133.254:8081/>>.
- [24] Český hydrometeorologický ústav : *Informace o klimatu [online]*. 2010, [2010-4-30]. Dostupné z WWW : <<http://www.chmu.cz/meteo/ok/infklim.html>>.
- [25] Moravec, Jan. *Vítání podzimu [online]*. 2009, [2010-4-30]. Dostupný z WWW : <<http://www.etf.cuni.cz/moravec/fotky/stredh06.html>>.
- [26] Kipp & Zonen Products. : *Sunshine Duration Sensors CSD 3 [online]*. 2009, [2010-5-1]. Dostupné z WWW: <<http://www.kippzonen.com/?product/35132/CSD+3.aspx>>.
- [27] NÁPRSTEK, Karel. *Dostupné sluneční záření, počty slunečných dnů v ČR [online]*. 2009 [2010-5-1]. Šetrné budovy. Dostupné z WWW: <<http://www.setrnebudovy.cz/component/content/article/33>> .
- [28] Traxle : *Solar trackers / concentrators [online]*. 2007, [2010-5-1]. Dostupný z WWW : <<http://solar-solar.com/default.asp?p=fotogalerie&lang=en&galid=8>>.

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

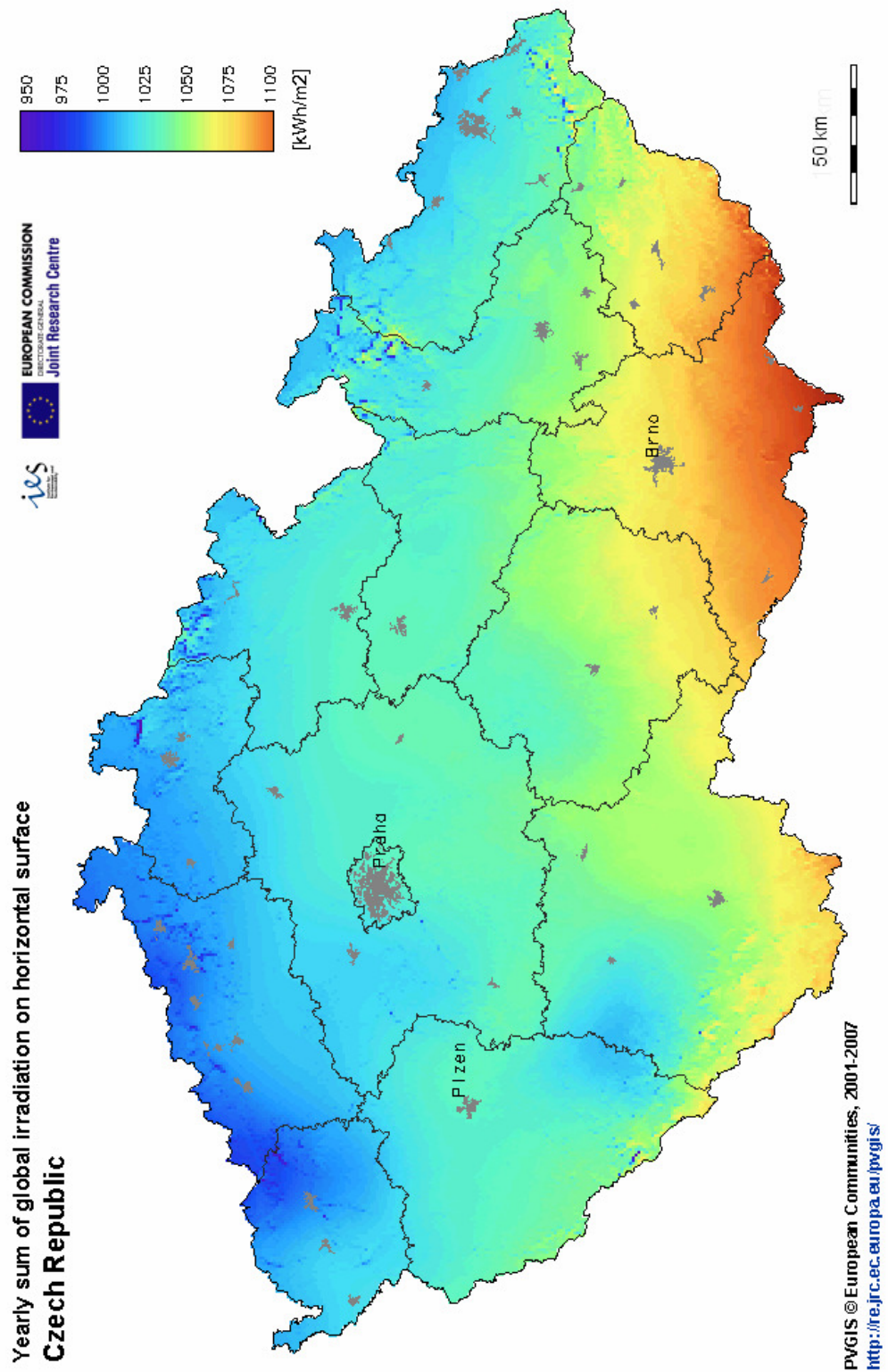
Značka	Význam	Jednotka
A	součinitel závislý na výšce Slunce nad obzorem	-
AM	Air Mass faktor	-
a_s	azimutový úhel	°
h	výška slunce nad obzorem	°
I	intenzita celkového (globálního) slunečního záření	W/m ²
I_0	solární konstanta	W/m ²
I_{CA}	intenzita slunečního záření na plochu kolmou ke slunečním paprskům při dokonale čistém ovzduší	W/m ²
I_D	intenzita difúzního záření	W/m ²
I_{Dh}	intenzita difúzního záření na vodorovnou plochu	W/m ²
I_N	intenzita slunečního záření na plochu kolmou ke slunečním paprskům při daném znečištění ovzduší	W/m ²
I_p	intenzita přímého slunečního záření	W/m ²
I_{ph}	intenzita přímého záření na vodorovnou plochu	W/m ²
I_{Pn}	intenzita přímého záření na plochu kolmou ke slunečním paprskům	W/m ²
$Q_{H(cekl)}$	celkové množství dopadající energie na vodorovnou plochu za sledované období (1 rok)	kWh/m ²
$Q_{H(měs)}$	množství energie dopadající na vodorovnou plochu za měsíc	kWh/m ²
$Q_{pH(den)}$	průměrné denní množství energie dopadající na vodorovnou plochu	Wh/m ²
$Q_{pV(den)}$	průměrné denní množství energie dopadající na šikmou plochu	Wh/m ²
$Q_{Sden teor}$	teoretické množství energie dopadající na 1m ² osluněné plochy	Wh/m ²
Q_{skut}	skutečné množství energie dopadající na 1m ² osluněné plochy	Wh/m ²
$Q_{V(cekl)}$	celkové množství dopadající energie na skloněnou plochu za sledované období (1 rok)	kWh/m ²
$Q_{V(měs)}$	množství energie dopadající na šikmou plochu za měsíc	kWh/m ²
r	reflexivní schopnost okolních ploch (albedo)	%
t	průměrná teplota vzduchu	°C
Z	Linkeho součinitel znečištění atmosféry	-
α	úhel sklonu plochy od vodorovné roviny	°
γ	úhel od normály osluněné plochy ke slunečním paprskům	°
θ	zenitový úhel	°
τ_{skut}	skutečná doba slunečního svitu	hod.
$\tau_{skut (cekl)}$	skutečná doba slunečního svitu ve sledovaném období (1 rok)	hod.
τ_{teor}	teoretická (astronomická) doba slunečního svitu	hod.

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Celkové množství energie dopadající na horizontální osluněnou plochu na území České republiky v průběhu roku.
- Příloha 2 Hodnoty AM faktoru pro některé polohy Slunce.
- Příloha 3 Příklad vizualizace měřených hodnot intenzity solárního záření ze dne 7. 5. 2009.
- Příloha 4 Solární záření v lokalitě FSI VUT Brno, sledované období červen 2008 až květen 2009.

Příloha 1

Mapa průměrných ročních úhrnů celkového slunečního záření dopadajícího na horizontální plochu v ČR.



Zdroj: Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)

<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/countries/europe.htm>

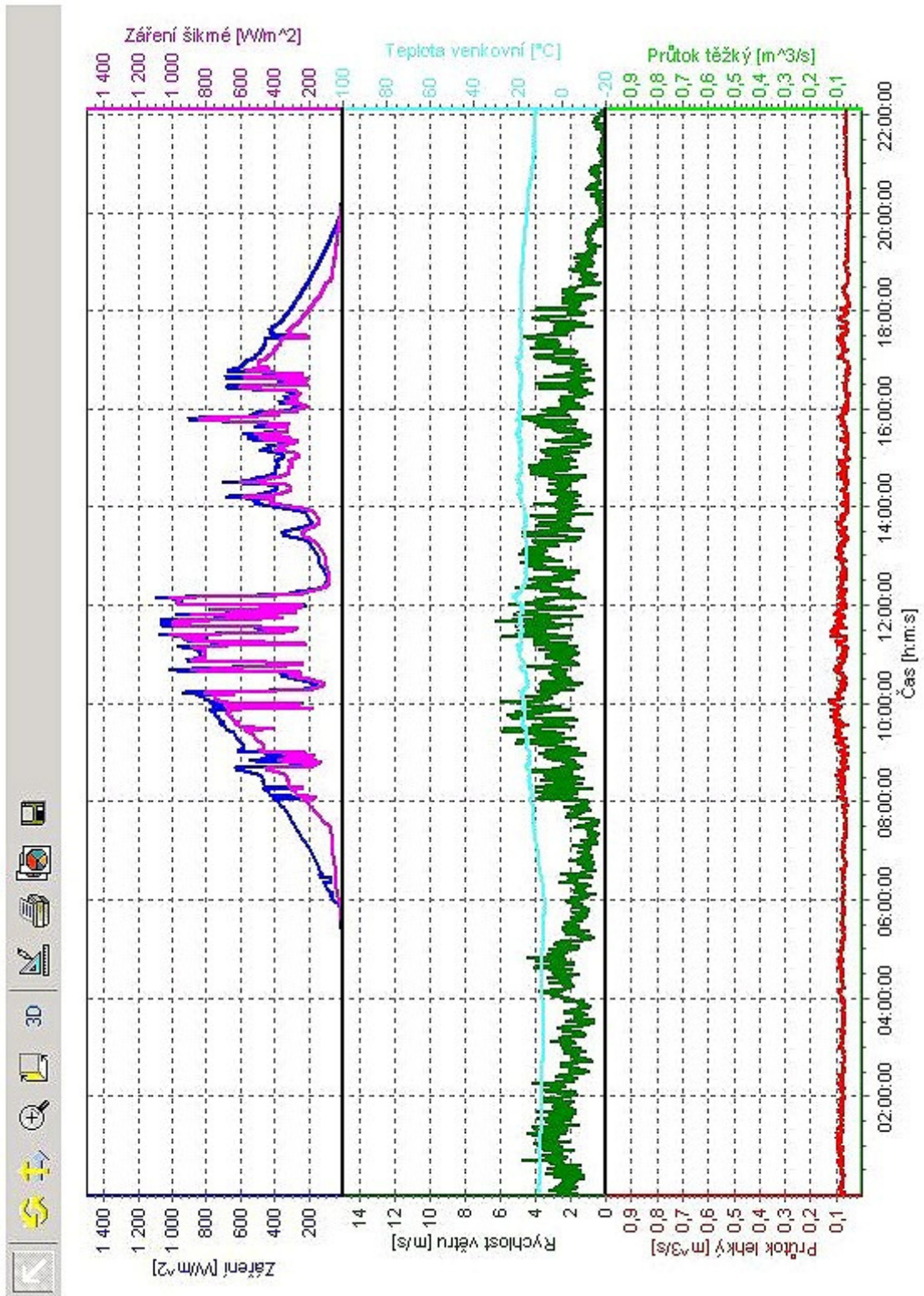
Příloha 2

AM faktor některých poloh Slunce

zenitový úhel θ [°]	0	15	30	45	48,2	60,1	70	80
AM faktor [-]	1	1,04	1,15	1,41	1,5	2	2,92	5,76

Příloha 3

Příklad vizualizace měřených hodnot intenzity solárního záření ze dne 7. 5. 2009.



Zdroj: Energetický ústav – Odbor termomechaniky a techniky prostředí

Informační systém solárního komínu <http://147.229.133.254:8081/2>

Příloha 4

Solární záření v lokalitě FSI VUT Brno Sledované období červen 2008 až květen 2009

Tab. 1 Intenzita globálního slunečního záření v denní době na vodorovnou plochu

měsíc	Intenzita globálního záření ($I = I_p + I_d$ [W/m^2])												
	VI.08	VII.08	VIII.08	IX.08	X.08	XI.08	XII.08	I.09	II.09	III.09	IV.09	V.09	
hodina													
5	10	4	2	2	3	2	3	3	3	3	1	4	
6	67	48	16	3	3	3	3	3	3	4	10	42	
7	185	180	93	28	7	6	3	3	7	11	93	132	
8	284	305	218	105	39	37	13	10	34	37	237	243	
9	446	421	350	226	95	86	45	40	93	78	386	375	
10	576	544	478	320	173	135	85	70	144	153	535	475	
11	613	672	563	409	232	171	113	108	176	171	652	534	
12	636	570	587	417	271	186	114	124	188	167	691	558	
13	631	597	616	405	262	167	114	118	173	140	743	553	
14	626	606	566	356	222	112	85	94	145	145	672	541	
15	537	556	528	310	181	58	41	57	101	98	602	531	
16	456	544	425	229	120	13	6	17	56	56	465	461	
17	346	389	326	155	57	2	2	3	13	20	346	360	
18	268	264	212	66	12	2	2	3	3	4	202	227	
19	167	102	87	12	2	2	2	3	3	3	61	120	
20	86	29	13	1	2	2	2	3	3	3	4	30	

Tab. 2 Intenzita globálního slunečního záření v denní době na skloněnou plochu

měsíc	Intenzita globálního záření ($I = I_p + I_d$ [W/m^2])												
	VI.08	VII.08	VIII.08	IX.08	X.08	XI.08	XII.08	I.09	II.09	III.09	IV.09	V.09	
hodina													
5	6	2	0	0	1	1	1	1	1	1	0	2	
6	32	22	9	1	1	1	1	1	1	1	6	21	
7	72	60	42	18	4	4	1	1	4	6	43	55	
8	145	143	138	91	41	52	17	11	29	27	162	139	
9	298	288	287	233	114	131	63	60	123	61	339	275	
10	439	434	441	360	215	211	120	106	188	153	542	393	
11	514	593	557	478	294	260	170	161	232	166	699	470	
12	554	527	599	481	343	284	146	194	229	159	759	506	
13	555	553	640	452	324	273	175	191	199	123	837	508	
14	555	570	585	400	280	179	152	144	166	162	762	500	
15	465	514	546	357	233	91	78	89	112	103	675	487	
16	375	477	424	259	159	16	7	21	73	61	504	407	
17	256	305	299	169	77	1	1	1	12	18	354	286	
18	165	170	165	66	13	0	1	1	1	1	178	149	
19	80	55	51	9	0	1	1	1	1	1	42	59	
20	40	17	8	0	0	0	1	1	1	1	3	17	

Parametry skloněné plochy: sklon 60° od vodorovné plochy, orientace na jih.

Tab. 3 Množství energie dopadající na osluněnou plochu

Množství sluneční energie Q				
měsíc	$Q_{pH}(\text{den})$ [Wh/m ²]	$Q_{pV}(\text{den})$ [Wh/m ²]	$Q_H(\text{měs})$ [kWh/m ²]	$Q_V(\text{měs})$ [kWh/m ²]
VI.08	5848	4511	175,4	135,3
VII.08	5803	4714	179,9	146,1
VIII.08	4978	4731	154,3	146,6
IX.08	2961	3297	88,8	98,9
X.08	1594	2003	49,4	62,1
XI.08	914	1428	27,4	42,8
XII.08	595	904	18,5	28,0
I.09	611	944	18,9	29,3
II.09	1111	1351	31,1	37,8
III.09	1076	1038	33,3	32,2
IV.09	5633	5860	169,0	175,8
V.09	5156	4257	159,8	132,0

$Q_{pH}(\text{den})$průměrné denní množství energie dopadající na vodorovnou plochu

$Q_{pV}(\text{den})$průměrné denní množství energie dopadající na šikmou plochu

$Q_H(\text{měs})$množství energie dopadající na vodorovnou plochu za měsíc

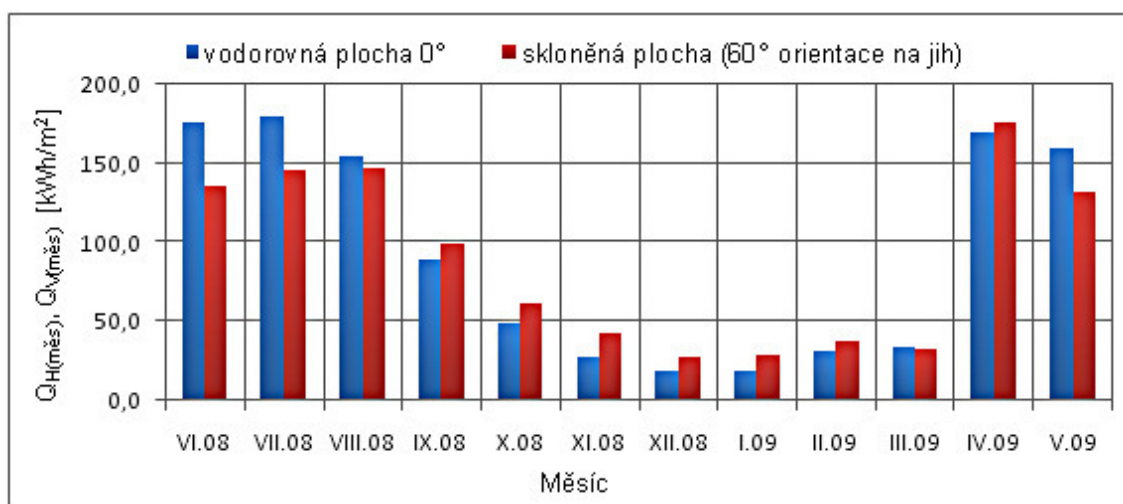
$Q_V(\text{měs})$množství energie dopadající na šikmou plochu za měsíc

Celkové množství energie, které dopadlo na osluněnou plochu za období červen 2008 až květen 2009:

$$Q_{H(\text{celk})} = 1106,0 \text{ kWh/m}^2$$

$$Q_{V(\text{celk})} = 1067,0 \text{ kWh/m}^2$$

Roční množství záření v našich klimatických podmínkách je 800-1250 kWh/m²



Obr. 1 Energie dopadajícího slunečního záření na vodorovnou a skloněnou plochu za měsíc (na základě tab. 3, lokalita VUT FSI Brno)

Tab. 4 Přehled selhání systému měření

Měsíc	VI.08	VII.08	VIII.08	IX.08	X.08	XI.08	
doba selhání (hod)	154	558	83	75	116	21	
(%)	21,39	75	11,16	10,42	15,59	2,92	
Měsíc	XII.08	I.09	II.09	III.09	IV.09	V.09	celkem za rok
doba selhání (hod)	27	80	64	532	260	52	2022
(%)	3,93	10,75	9,52	71,51	36,11	6,99	23,08%

Příkladem: V červnu 2008 došlo k selhání systému v celkovém počtu 154 hodin, což představuje 21,39 % z celkové doby měsíce. Selháním systému měření se rozumí například výpadek v důsledku zamrznutí počítače, selhání snímače, nebo cyklicky se opakující hodnoty.

Poznámka: V březnu 2009 došlo k výpadku měřicího systému na delší dobu. Naměřená data jsou téměř ze 72 % poškozena.

Tab. 5 Délka slunečního svitu

Měsíc	Meorologická stanice Brno, Tuřany											
	VI.08	VII.08	VIII.08	IX.08	X.08	XI.08	XII.08	I.09	II.09	III.09	IV.09	V.09
$\tau_{\text{skut}}[\text{h}]$	238,1	217,7	234	155,4	84,8	59,8	39,2	38,6	28,6	82,3	300,5	229,4

Zdroj: Český hydrometeorologický ústav [24]

Celková délka slunečního svitu v období červen 2008 až květen 2009

$$\tau_{\text{skut (celk)}} = 1708,4 \text{ hodin}$$

Dlouhodobý roční průměr délky slunečního svitu pro Brno je 1677,4 hodin [19]

Tab. 6 Průměrná teplota vzduchu v jednotlivých měsících

Měsíc	Meteorologická stanice Brno, VUT FSI											
	VI.08	VII.08	VIII.08	IX.08	X.08	XI.08	XII.08	I.09	II.09	III.09	IV.09	V.09
t [°C]	20,3	23,0	20,1	12,6	9,8	5,9	1,2	-2,8	-0,1	4,7	14,8	14,7