

Tomáš Matuška

edice
stavitel

Solární zařízení v příkladech



edice
stavitel

Solární zařízení v příkladech

Tomáš Matuška

Grada Publishing

Upozornění pro čtenáře a uživatele této knihy

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této tištěné či elektronické knihy nesmí být reprodukována a šířena v papírové, elektronické či jiné podobě bez předchozího písemného souhlasu nakladatele. Neoprávněné užití této knihy bude **trestně stíháno**.



Tomáš Matuška

Solární zařízení v příkladech

Vydala Grada Publishing, a.s.
U Průhonu 22, Praha 7
obchod@gradapublishing.cz, www.grada.cz
tel.: +420 234 264 401, fax: +420 234 264 400
jako svou 5027. publikaci

Odpovědná redaktorka Ing. Jitka Hrubá
Sazba Vladimír Velička
Fotografie na obálce Wagner & Co / ESTIF
Fotografie a kresby v textu z archivu autora, pokud není uvedeno jinak

Počet stran 256
První vydání, Praha 2013
Vytiskla tiskárna GRASPO CZ, a. s.

Vydání odborné knihy schválila Vědecká redakce nakladatelství Grada Publishing, a.s.

© Grada Publishing, a.s., 2013
Cover Design © Eva Hradiláková, 2013

*Názvy produktů, firem apod. použité v knize mohou být ochrannými známkami
nebo registrovanými ochrannými známkami příslušných vlastníků.*

ISBN 978-80-247-3525-2

ELEKTRONICKÉ PUBLIKACE:

ISBN 978-80-247-8036-8 (elektronická verze ve formátu PDF)
ISBN 978-80-247-8039-9 (elektronická verze ve formátu EPUB)

Obsah

Předmluva	9
1 Sluneční energie	11
1.1 Slunce	11
1.1.1 Zdroj energie	11
1.1.2 Sluneční konstanta	13
1.1.3 Spektrum slunečního záření	14
1.2 Sluneční energie na zemském povrchu	16
1.2.1 Průchod slunečního záření atmosférou	16
1.2.2 Přímé a difuzní záření	17
1.3 Měření veličin slunečního záření	20
1.3.1 Měření celkového slunečního ozáření	21
1.3.2 Měření přímého slunečního ozáření	22
1.3.3 Měření difuzního slunečního ozáření	22
1.3.4 Měření doby trvání slunečního svitu	23
1.3.5 Měření odraženého slunečního záření	24
1.4 Sluneční energie v ČR	24
1.4.1 Zdroje údajů o slunečním záření	24
1.4.2 Roční hodnoty	26
1.4.3 Optimální orientace a sklon plochy	29
2 Solární kolektory	33
2.1 Druhy solárních kolektorů	33
2.1.1 Nekryté (nezasklené) kolektory	35
2.1.2 Ploché atmosférické kolektory	35
2.1.3 Ploché vakuové kolektory	37
2.1.4 Trubkové vakuové kolektory	38
2.1.5 Koncentrační kolektory	43
2.2 Charakteristiky solárních kolektorů	45
2.2.1 Teoretické vyjádření účinnosti	45
2.2.2 Vztažná plocha solárního kolektoru	50
2.2.3 Experimentální stanovení výkonu a účinnosti	52
2.2.4 Uvádění účinnosti kolektoru	54
2.2.5 Uvádění výkonu kolektoru	56
2.2.6 Křivky účinnosti různých druhů kolektorů	57
2.2.7 Optická charakteristika – modifikátor úhlu dopadu	58
2.2.8 Tepelná setrvačnost kolektoru	63
2.2.9 Výkonnost solárních kolektorů	65
2.2.10 Vliv umístění solárních kolektorů na výkonnost	68
2.3 Konstrukce solárního kolektoru	69
2.3.1 Zasklení	69
2.3.2 Absorpční povrch	72

2.3.3	Absorbér	74
2.3.4	Odvod tepla z absorbéru	79
2.3.5	Skříň kolektoru.	81
2.4	Zkoušení a certifikace solárních kolektorů	82
2.4.1	Normy	82
2.4.2	Zkoušky spolehlivosti	83
2.4.3	Značka CE	86
2.4.4	Solar Keymark	86
2.4.5	Modrý anděl (RAL-UZ 73)	89
3	Solární zásobníky tepla	91
3.1	Principy akumulace tepla	91
3.1.1	Akumulace v citelném teple	93
3.1.2	Akumulace ve skupenském teple	94
3.1.3	Akumulace s využitím sorpce	97
3.1.4	Akumulace s využitím chemických reakcí	99
3.2	Vodní solární zásobníky	100
3.2.1	Předávání tepla	101
3.2.2	Tlakové podmínky v zásobníku	101
3.2.3	Účel použití zásobníků	102
3.2.4	Jak velký zásobník?	103
3.3	Podmínky účinné akumulace tepla	104
3.3.1	Přívod a odběr tepla	105
3.3.2	Vodní zásobníky tepla s řízeným teplotním vrstvením	108
3.3.3	Tepelné ztráty zásobníků	111
3.3.4	Připojovací potrubí zásobníků	113
4	Solární tepelné soustavy.	115
4.1	Solární soustavy v ČR	115
4.1.1	Historie využívání sluneční energie v ČR	115
4.1.2	Instalace z 80. let	116
4.1.3	Statistika solárních kolektorů	118
4.2	Typologie solárních soustav	119
4.2.1	Průtok solární soustavou	120
4.2.2	Koncepce primárního okruhu	121
4.3	Energetické parametry solárních soustav	122
4.3.1	Využití tepelné zisky solární soustavy	123
4.3.2	Roční úspora energie	123
4.3.3	Dodatková energie.	124
4.3.4	Měrné využití tepelné zisky solární soustavy.	124
4.3.5	Solární pokrytí, solární podíl.	125
4.3.6	Provozní účinnost solární soustavy	128
4.3.7	Spotřeba pomocné energie soustavy	128
4.4	Hodnocení přínosů solárních soustav	129
4.4.1	Zjednodušené výpočty energetických přínosů	129
4.4.2	Počítačové simulace solárních soustav	131
4.4.3	Provozní měření zisků	134
4.4.4	Garantované solární zisky	138

5 Solární ohřev vody a vytápění	141
5.1 Příprava teplé vody	142
5.1.1 Potřeba teplé vody	142
5.1.2 Časové rozložení potřeby teplé vody	145
5.1.3 Tepelné ztráty přípravy teplé vody	147
5.1.4 Hygienické požadavky	147
5.2 Vytápění	148
5.2.1 Potřeba tepla na vytápění	148
5.2.2 Tepelné ztráty otopné soustavy	150
5.2.3 Nízkoteplotní otopné soustavy	151
5.3 Solární soustavy pro přípravu teplé vody	152
5.3.1 Malé solární soustavy pro přípravu teplé vody	152
5.3.2 Velké solární soustavy pro přípravu teplé vody	154
5.4 Kombinované solární soustavy	159
5.4.1 Malé solární kombinované soustavy	160
5.4.2 Velké solární kombinované soustavy	162
5.5 Nasazení solárního ohřevu v budovách	165
5.5.1 Vliv volby kolektoru	165
5.5.2 Tepelná izolace	166
5.5.3 Kolísání klimatických podmínek	168
5.5.4 Změny v potřebě tepla	169
5.5.5 Energetická náročnost vytápění	170
5.5.6 Teplotní spád otopné soustavy	171
5.6 Příklady realizací	172
5.6.1 Rodinný dům Mnichovice	172
5.6.2 Bytový dům Velká Skála	173
5.6.3 Doterm Servis	175
6 Solární ohřev bazénů	178
6.1 Ohřev vody v bazénech	178
6.1.1 Venkovní bazény a koupaliště	179
6.1.2 Vnitřní bazény	181
6.2 Bazénové solární soustavy	183
6.2.1 Sezónní soustavy	183
6.2.2 Solární soustavy pro celoroční provoz	184
6.2.3 Kolektory pro bazény	184
6.2.4 Čerpadla a spotřeba elektřiny	187
6.3 Příklady realizací	188
6.3.1 Venkovní koupaliště Rusava	188
6.3.2 Aquapark Jindřichův Hradec	191
7 Solární chlazení	193
7.1 Zařízení s uzavřeným oběhem	194
7.1.1 Absorpční uzavřený oběh	195
7.1.2 Adsorpční uzavřený oběh	197
7.2 Desikační zařízení s otevřeným oběhem	198
7.2.1 Zařízení s tuhým desikantem	199
7.2.2 Zařízení s kapalným desikantem	200

8 Solární zařízení v příkladech

7.3	Solární soustavy pro chlazení	202
7.3.1	Solární kolektory	203
7.3.2	Solární chladicí faktor	204
7.3.3	Zapojení solárních chladicích soustav.	205
7.4	Příklady realizací.	208
7.4.1	Hotel DUO v Praze.	208
7.4.2	Hypermarket TESCO Jaroměř.	209
8	Solární soustavy pro CZT	210
8.1	Historický vývoj solárních CZT	210
8.2	Základní koncepce soustav	213
8.2.1	Solární soustavy pro CZT s krátkodobou akumulací	214
8.2.2	Solární soustavy pro CZT s dlouhodobou akumulací.	215
8.3	Solární kolektory.	217
8.4	Sezónní zásobníky	218
8.4.1	Akumulační nádrž	219
8.4.2	Podpovrchový výkopový zásobník (pit)	220
8.4.3	Zemní sondy	222
8.4.4	Aquifer	223
8.5	Návrhové a provozní parametry.	224
8.6	Příklady realizací	226
8.6.1	Sídlíště Hirtenwiesen v Crailsheimu	226
8.6.2	CZT v Marstalu	228
8.6.3	Sídlíště ve Friedrichshafenu	230
9	Průmyslové aplikace	232
9.1	Průmyslové procesy	233
9.1.1	Mytí a čištění	234
9.1.2	Ohřev zásobníků a nádob	234
9.1.3	Sušení	235
9.1.4	Vytápění prostor	235
9.2	Nasazení solárních soustav v průmyslu.	235
9.2.1	Solární kolektory.	236
9.2.2	Soustavy pro ohřev vody	239
9.2.3	Soustavy pro ohřev lázní a van	240
9.2.4	Soustavy pro solární sušení	241
9.2.5	Soustava pro vytápění velkoprostorových objektů	242
9.3	Příklady realizací	243
9.3.1	Výrobní družstvo STYL Studená	243
9.3.2	Závod ETA Hlinsko	244
9.3.3	Biotechnologická hala v Nových Hradech.	246
	Literatura	248
	Rejstřík	253
	Zkratky ke schémátům	254

■ Předmluva

Mezi současnými zdroji tepla představují solární tepelné soustavy bezemisní zařízení s minimálním dopadem na spotřebu primární neobnovitelné energie. Jsou založeny na přímé přeměně nevyčerpatelné sluneční energie dostupné všem a všude bez rozdílu. To řadí solární zařízení mezi obnovitelné zdroje energie současnosti i budoucnosti bez ohledu na aktuální politické preference energetického mixu v České republice. Svým charakterem se solární zařízení řadí mezi úsporná opatření (spořiče energie) než typické zdroje, které lze na povel zapnout a vypnout. V ekonomicky reálných instalacích proto solární zařízení potřebují pro celoroční provoz vždy záložní zdroj tepla.

Solární teplo je využitelné všude, kde potřeba tepla vzniká. Ne všude jsou však solární zařízení konkurenceschopná s konvenčními zdroji tepla. Ekonomika projektů je zatím výzvou nejen výrobcům a výzkumníkům, ale i politické vůli a podpoře. Ke zlevnění výroby může dojít pouze v souvislosti s nasazením masové výroby ve velkých sériích. Druhou šancí je změna chápání solárního kolektoru jako primárně technologického zařízení, ale jako základního stavebního prvku obvodového pláště budov. S tím nutně souvisí změna materiálové základny a zjednodušení konstrukce.

Kniha je souhrnem zkušeností se solárními soustavami v různých oblastech použití od rodinných domů pro průmyslové provozy. Snahou bylo poskytnout aktuální a komplexní náhled na problematiku, přístupný širší veřejnosti, nejen té odborné. Těžiště zpracovaných témat leží v mé přednáškové činnosti z posledních let, nicméně pro účely knihy byla témata v jednotlivých oblastech výrazněji rozpracována a doplněna do podoby kompaktního textu. Jádro kapitol zpravidla tvoří vysvětlení principů jak konkrétní solární zařízení pracují; názorné analýzy (co a jak ovlivňuje návrh a provoz solárních zařízení) a příklady realizací na území ČR. Výjimkou jsou soustavy centralizovaného zásobování solárním teplem s dlouhodobou akumulací, které v České republice dosud realizovány nejsou.

Důraz je kladen na ukázání konkrétních čísel a reálných energetických přínosů využití sluneční energie, přestože pro lepší čitelnost textů nejsou uváděny všechny detailní okrajové podmínky výpočtů. Analýzy jsou provedeny pro klimatické údaje České republiky z let s nízkou sluneční aktivitou, tzn. uváděné údaje o přínosech jsou konzervativní hodnoty, za které je možné se zaručit a v běžné praxi očekávat vyšší. Vybrané příklady realizovaných soustav jsou buď nějakým způsobem technicky zajímavé, ať už nevšedním technickým řešením nebo jen tím, že jsou dlouhodobě monitorované a lze na nich ukázat skutečně dosahované přínosy. Nedílnou součástí kapitol jsou poznámky v modrých polích, které se snaží téma posunout a nahlédnout z jiné strany.

Řada představených analýz by nevznikla bez obětavé pomoci kolegy Bořivoje Šourka, který pro ně připravil simulační modely v prostředí TRNSYS. Podobně, uváděné výsledky ze zkoušek solárních kolektorů vznikly při naší společné práci v Solární laboratoři Ústavu techniky prostředí na ČVUT v Praze. Na závěr děkuji kolegům z firem dlouhodobě působících v oblasti solární tepelné techniky za poskytnutí obrazového materiálu, cenných rad a praktických náhledů i za kladené dotazy, které inspirovaly některé z představených analýz.

Věnováno Háně za nekonečnou trpělivost...

■ 1 Sluneční energie

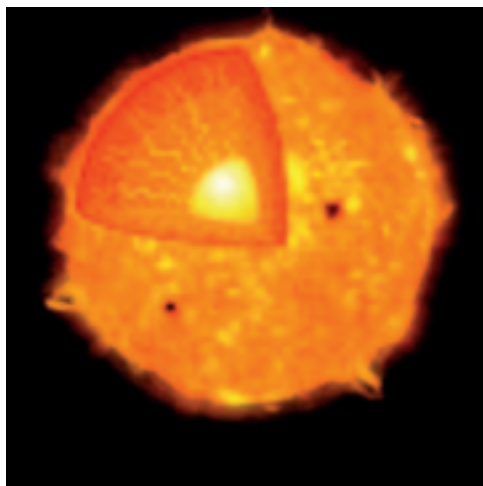
Člověk využívá sluneční energii od té doby, co je člověkem. Sluneční energie je zdrojem všeho živého na zemském povrchu. V prastarých kulturách bylo Slunce vždy předmětem úcty, člověk cítil naprostou závislost života na jeho energii. Sluneční energie je v historii lidského rodu tradičním a velmi dlouhou dobu jediným zdrojem energie. Využívání fosilních a jaderných paliv je z hlediska jejich časové dostupnosti pouhým přechodovým obdobím. Fosilní paliva nemají svůj původ nikde jinde než právě ve sluneční energii, uložené v biomase před stovkami miliónů let. V době, kdy se způsoby zajištění energetických potřeb lidstva stávají celospolečenským tématem, se pozornost obrací opět k základnímu zdroji energie pro naši planetu.

■ 1.1 Slunce

Země je součástí planetární soustavy, jejímž středem je Slunce. Slunce je nám nejbližší a nejdůležitější hvězdou. Je trvalým zdrojem veškeré energie pro naši planetu. Slunce má tvar koule o průměru 1,39 miliónů kilometrů, tj. 109krát větším než je průměr Země. Od Země je Slunce vzdáleno v průměru 150 miliónů kilometrů. Hmotnost Slunce je 2×10^{30} kg a je tak 330 000krát hmotnější než Země, tvoří přibližně 99,9 % hmotnosti celé sluneční soustavy. Proto jsou planety Sluncem přitahovány a obíhají okolo něj.

■ 1.1.1 Zdroj energie

Slunce se skládá převážně z atomárního vodíku (70 %), helia (28 %) a z nepatrného množství ostatních prvků periodické soustavy (2 %). Někdy se místo hmotnostních procent uvádí podíl počtu atomů jednotlivých prvků: 91 % vodíku, 9 % helia. Všechny prvky jsou ve hmotě Slunce obsaženy ve skupenství plazmy. Zdrojem energie Slunce je termonukleární reakce – **jaderná fúze** – probíhající v centrální oblasti Slunce, při které dochází k přeměně lehčích jader vodíku na těžší jádro helia. Přeměna probíhá při teplotách desítek miliónů K a tlacích desítek miliard MPa za stavu, při němž jsou všechny atomy zcela ionizovány. Protony za těchto podmínek na sebe narážejí tak vysokými rychlostmi, že se překonává jejich elektrická odpudivost. Při srážkách se dostávají k sobě natolik blízko, že vlivem vysoké jaderné přitažlivosti jádra atomů



Obr. 1.1 Schematický řez Slunce

splynou. Každou sekundu se přemění 564 miliónů tun vodíku na 560 miliónů tun helia. Hmotnost vzniklého jádra helia je menší než hmotnost čtyř protonů vodíku vstupujících do reakce. Rozdíl hmoty se při reakci přemění na energii podle známého vztahu $E = m \times c^2$. Vyčíslením vznikajícího výkonu lze dospět k hodnotě $3,6 \times 10^{26}$ W. Pro naše běžná technická měřítka je to nepředstavitelný výkon, který Slunce uvolňuje přeměnou hmoty v energii.

Na obr. 1.1 je znázorněn řez Sluncem. Jaderná fúze probíhá v centrální oblasti Slunce, která zasahuje do cca 23 % jeho poloměru. Nad jádrem, do 70 % poloměru Slunce, se nachází tzv. radiační zóna, oblast s velmi vysokou hustotou a teplotou postupně klesající až na 130 000 K. Energie uvolněná v jádru Slunce ve formě rentgenových fotonů s vysokým energetickým obsahem proniká velmi hustou radiační zónou směrem k povrchu. Rentgenové fotony se cestou přeměňují na tisíce energeticky „chudších“ fotonů o delší vlnové délce. Záření tak mění své spektrální složení směrem k větším vlnovým délkám a fotony snižují svůj energetický obsah. Konvekční zóna mezi radiační zónou a povrchem Slunce má hustotu již výrazně nižší a hlavním způsobem přenosu energie je konvekce. Vnější viditelným obalem Slunce – fotosférou – je energie vyzařována do kosmického prostoru již jako převážně ultrafialové, světelné a infračervené záření v oblasti vlnových délek 0,2 až 3,0 μm . Z nebezpečného rentgenového záření vznikajícího uvnitř Slunce se cestou na povrch stává převážně životodárné sluneční záření.

Vzdálenost od středu k povrchu Slunce je zhruba 700 000 km a fotonům rentgenového záření trvá milion let než se proměňené v tisíce fotonů světelného záření dostanou k povrchu. Země je od Slunce vzdálena v průměru okolo 150 milionů kilometrů. Sluneční záření se ve volném meziplanetárním prostoru pohybuje přímočaře rychlostí 300 000 km/s, není ničím brzděno ani pohlcováno. Jednoduchým výpočtem lze určit, že na zemský povrch „doletí“ za pouhých 500 s, tj. 8 minut a 20 s. Jak uvádí známý český astronom J. Kleczek: „sluneční záření, které dnes vidíme jako světlo a pocítujeme jako teplo, bylo uvolněno jadernou fúzí v nitru Slunce v době, kdy pračlověk na Zemi zapaloval první oheň. Za dobu, než se sluneční energie prodrala z jádra Slunce k jeho povrchu, se zatím člověk vyvinul v inteligentní bytost současnosti“ [1].

Hustota toku energie vyzařované z povrchu Slunce je okolo 60 MW/m². Podle množství helia, které až dosud ve Slunci vzniklo, lze stáří Slunce odhadnout na zhruba 5 miliard let a předpokládá se, že jaderná fúze bude pokračovat ještě dalších 5 až 10 miliard let. Z naší lidské perspektivy je tedy **energie vyzařovaná Sluncem nevyčerpatelným a trvalým zdrojem energie**.

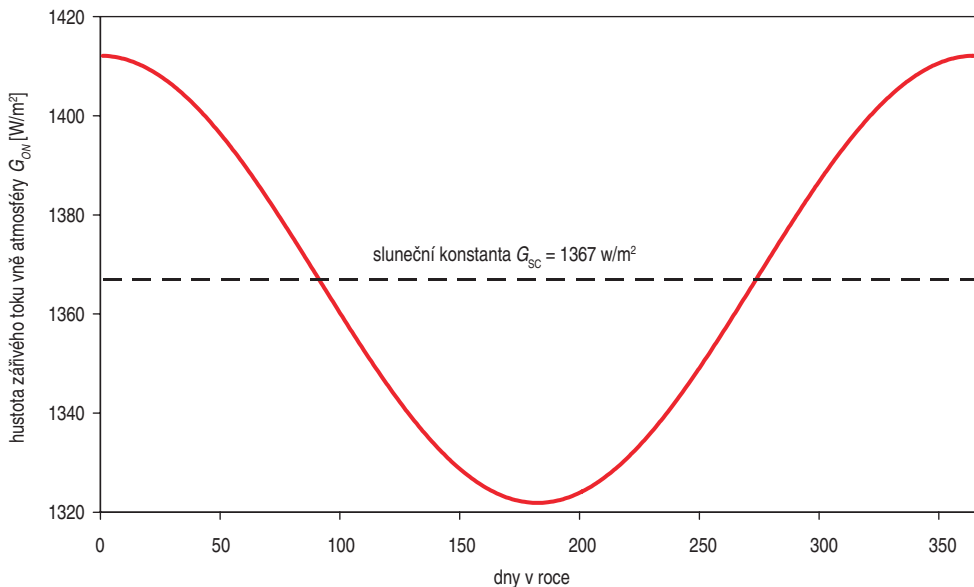
Sluneční záření na cestě k Zemi není ničím pohlcováno a přichází na hranici atmosféry ve stejném spektrálním složení, s nímž opustilo Slunce, avšak při značně zmenšené hustotě zářivého toku způsobené tím, že se výkon s rostoucí vzdáleností rozptýlí na větší plochu. Z celkového výkonu vyzařovaného Sluncem dopadá na naši Zemi pouze zlomek – jedna půlmiliardina – mezi 170 a 180 tisíci TW (bilionů wattů). Podobně nepatrná část je zachycena ostatními planetami sluneční soustavy. Zbývající tok záření, tzn. v podstatě téměř celý tok vyzařované sluneční energie, uniká do mezihvězdného a mezigalaktického prostoru.

Celosvětová spotřeba energie lidstvem na Zemi v roce 2010 byla odhadnuta na 12 275 milionů tun ropného ekvivalentu [33], což odpovídá 142 PWh nebo 512 miliardám GJ. Zhruba 90 % spotřebované energie pochází ze spalování fosilních paliv. Přitom na zemskou atmosféru ročně dopadne 1,5 milionu PWh sluneční energie, na zemský povrch se dostane zhruba jedna polovina. To znamená, že Slunce nás ročně zásobuje energií přesahující více než 5 000krát naše energetické potřeby. Tato energie je čistá, z pohledu lidského rodu věčná a sama o sobě zdarma.

1.1.2 Sluneční konstanta

Hustota zářivého toku sluneční energie na jednotku plochy kolmé ke směru šíření záření, dopadající při střední vzdálenosti Slunce od Země na vnější povrch zemské atmosféry, se nazývá **sluneční konstanta**. Na základě dlouhodobých družicových měření se hodnota sluneční konstanty uvádí $1\,367\text{ W/m}^2$. Z družicového pozorování byly zároveň v závislosti na přirozené sluneční aktivitě zjištěny pouze malé změny hodnoty sluneční konstanty o $0,1\%$. Na hranici atmosféry tedy každoročně přichází stejné množství energie bez výrazných výkyvů.

Je zajímavé se podívat, jak jsou na tom se sluneční konstantou ostatní planety sluneční soustavy. Například Merkur, Slunci nejbližší planeta, má sluneční konstantu $9\,040\text{ W/m}^2$, zatímco vzdálený Neptun pouze $1,5\text{ W/m}^2$.



Obr. 1.2 Změna toku slunečního záření dopadajícího na vnější povrch atmosféry během roku

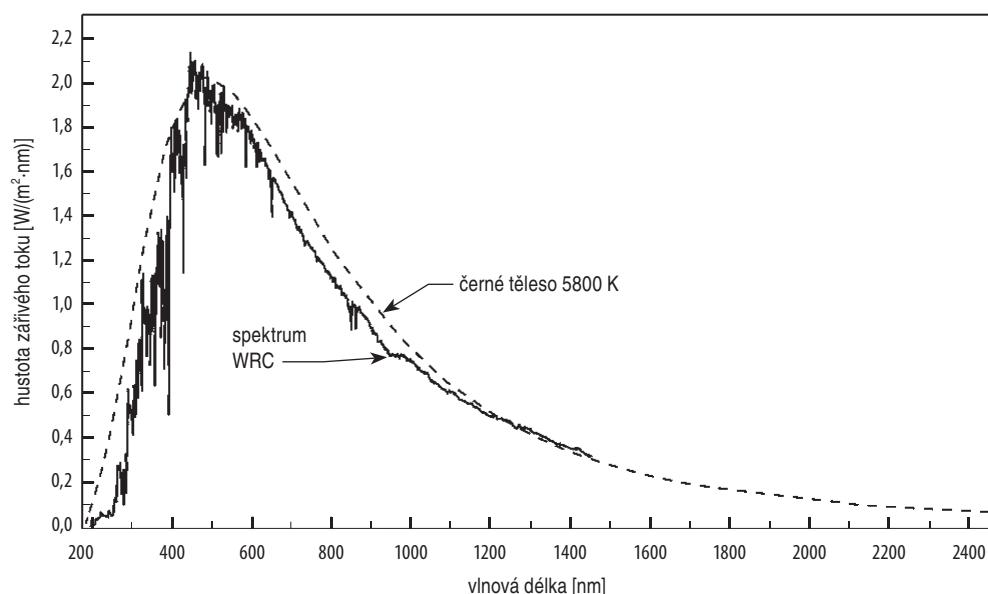
Sluneční konstanta se uvádí pouze jako jediná střední hodnota. Nicméně, hustota toku slunečního záření dopadajícího kolmo na vnější povrch zemské atmosféry během roku konstantní není. Země obíhá okolo Slunce po eliptické dráze, přičemž Slunce je v jednom z ohnisek. Vzdálenost mezi Sluncem a Zemí se během roku mění pouze o $\pm 1,7\%$. Tak malá změna je způsobena tím, že eliptická oběžná dráha je velmi blízká dráze kruhové. Se změnou vzdálenosti se mění i hustota toku slunečního záření o cca $\pm 3,3\%$. Z grafické závislosti proměnlivosti hustoty toku slunečního záření (viz obr. 1.2) je patrné, že v zimě vnější povrch atmosféry přijímá více slunečního záření než v létě, vzhledem ke skutečnosti, že Slunce je k Zemi blíže než v létě.

Životní zkušenost na severní polokouli však říká něco jiného. V létě je dopadajícího slunečního záření více než v zimě. Nízká úroveň slunečního záření v zimním období v našem klimatickém pásmu je však způsobena jiným jevem – a to odklonem severní polokoule Země od Slunce vlivem precesního pohybu zemské osy a tedy nižším úhlem dopadu slunečních paprsků, které překonávají větší hmotu atmosféry a více se pohltí. Druhým jevem působícím snížení dopadajícího záření v zimě je zvýšená oblačnost.

1.1.3 Spektrum slunečního záření

Záření Slunce si lze přiblížit jako záření dokonale černého tělesa s povrchovou teplotou okolo 5800 K. Sluneční záření je elektromagnetické vlnění, které zahrnuje vlnové délky řádově od nanometrů (rentgenové a ultrafialové záření) až do několika metrů (rádiové záření). Spektrální průběh hustoty zářivého toku v závislosti na vlnové délce záření je pro dokonale černé těleso při dané teplotě určen Planckovým zákonem. S klesající teplotou tělesa klesá hustota zářivého toku a zároveň se maximum spektrální charakteristiky posouvá do oblasti větších vlnových délek. Pro sluneční záření se maximum pohybuje okolo vlnové délky 0,5 μm , což je vlnová délka žluto/zelené barvy. Reálný spektrální průběh hustoty zářivého toku ze Slunce není tak hladký jako u dokonale černého tělesa vlivem nehomogenního povrchu fotosféry (viz *obr. 1.3*).

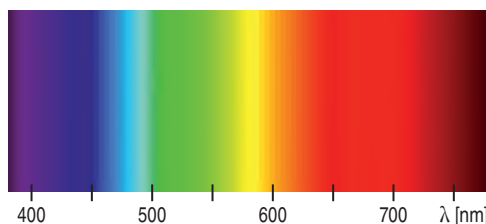
Naprostá většina energie slunečního záření odcházejícího ze slunečního kotouče je soustředěna v oblasti vlnových délek od 0,2 do 3,0 μm . V této oblasti lze rozlišit různé druhy záření s různým energetickým obsahem. V oblasti vlnových délek od 0,20 do 0,40 μm se nachází **ultrafialové záření** (zkratka UV), tj. záření „za fialovou“ barvou. Ultrafialové záření se dělí na UVC: pod 0,28 μm ; UVB: 0,28 až 0,32 μm a UVA: 0,32 až 0,40 μm . Energie „tvrdého“ UVC a UVB záření je schopná rozkládat nebo narušovat bílkoviny nebo jiné životně důležité organické sloučeniny



Obr. 1.3 Spektrální charakteristika zářivého toku sluneční energie na hranicích zemské atmosféry

s vážnými následky pro metabolismus postiženého organismu. Je zhoubné pro většinu živých organismů a negativně ovlivňuje růst rostlin. UVC záření se používá k dezinfekčním účelům (UV lampy). Pro život na Zemi je důležitým faktem, že naprostá většina škodlivého UV záření je absorbována ozónem v ozónové vrstvě. Na zemský povrch dopadá v podstatě pouze UVA záření (99 % z veškerého ultrafialového záření), které se někdy označuje jako „černé světlo“. Pro člověka je ultrafialové záření neviditelné, avšak někteří živočichové ho vnímají. V oblasti UV záření přichází do atmosféry okolo 9 % celkové energie slunečního záření.

Viditelné záření (VIS), které je člověk schopný vnímat zrakem, přichází ze Slunce v oblasti vlnových délek od 0,40 do 0,75 μm . Ve viditelném záření rozlišujeme konkrétní barvy. Každá barva má svou vlnovou délku, od kratších délek fialové a modré barvy přes zelenou, žlutou až po červenou (viz obr. 1.4). Záření o vlnové délce kratší nebo delší než v uvedeném rozmezí pro člověka viditelné není. Lze je zviditelnit zvláštní přístrojovou technikou převodem spektra do viditelné oblasti (např. termovizní snímky v infračervené oblasti). Oblast viditelného záření obsahuje významnou část energie slunečního záření, okolo 41 % z celkové dopadající energie.



Obr. 1.4 Spektrální barvy a jejich vlnové délky, spojené spektrum bílého světla

Slunce, jako většina reálných zdrojů světla, vysílá záření různých vlnových délek (směs). Lidské oko není schopné samostatně rozlišit jednotlivé složky spektra, ale vnímá směs vlnových délek jako jednu barvu. Směs všech barev vnímá jako bílou (neutrální barvu). A opačně, bílé světlo lze na optickém hranolu nebo rozptýlením na kapičkách vody v atmosféře rozložit na jednotlivé složky – barvy – ve formě duhy. Mícháním různých vlnových délek je možné vytvořit barvy, které ve viditelném spektru nenalezneme, neboť nemohou být reprezentovány jedinou vlnovou délkou. Tyto nespektrální barvy jsou například šedá, růžová nebo zmíněná bílá.

„Pod červenou“ barvou v oblasti vlnových délek od 0,75 μm do 1 mm se nachází oblast **infračerveného záření**. Pro upřesnění se dělí na blízké infračervené záření od 0,75 do 5,00 μm , střední od 5 do 30 μm a daleké od 30 μm do 1 mm. Oblast infračerveného záření obsahuje nezanedbatelných 50 % energie slunečního záření. S tím je nutné při využití sluneční energie počítat. Předměty kolem nás při běžných teplotách 0 až 100 $^{\circ}\text{C}$ září ve střední infračervené oblasti. Teplotě 0 $^{\circ}\text{C}$ odpovídá vlnová délka maxima 10 μm , teplotě 100 $^{\circ}\text{C}$ odpovídá maximum okolo 7,8 μm .

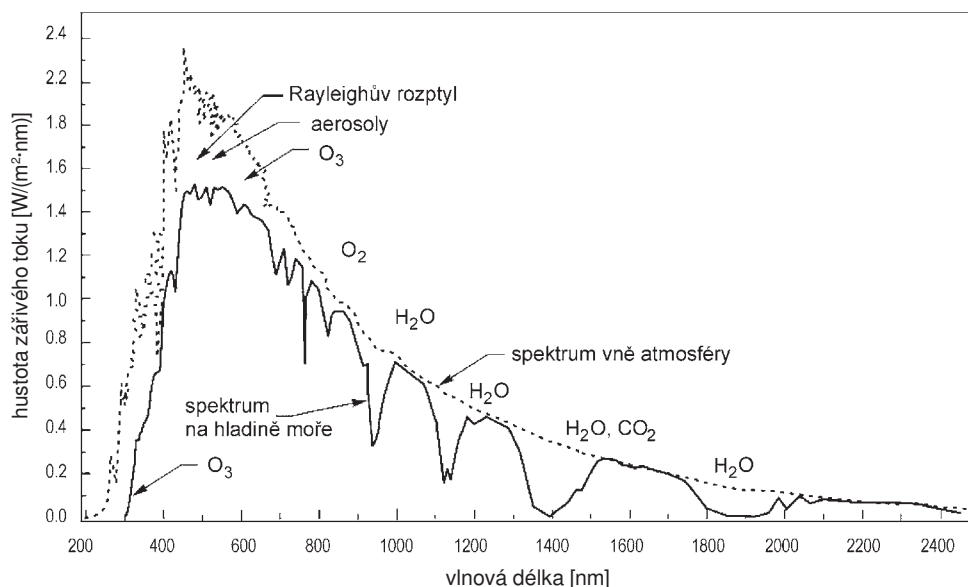
■ 1.2 Sluneční energie na zemském povrchu

■ 1.2.1 Průchod slunečního záření atmosférou

Sluneční záření vstupuje do atmosféry ve výšce cca 60 km na zemském povrchem. Atmosféra se skládá převážně z dvojjatomových plynů dusíku a kyslíku. Ve vysokých vrstvách atmosféry – ionosféry – pohlcují tyto dva základní atmosférické plyny přicházející ultrafialové a rentgenové záření. Niž se nachází ozonosféra, vrstva s vysokým obsahem ozonu, který pohlcuje zbývající část žívu nebezpečného ultrafialového záření (UVC). V nejnižších vrstvách atmosféry – v troposféře – dochází k pohlcování různých vlnových délek spektra slunečního záření vodní párou, oxidem uhličitým, prachem a aerosoly.

Když se hovoří o tom, že sluneční záření dopadající na Zemi vstupuje do atmosféry, je dobré si uvědomit, že nelze určit jednoznačnou hranici, kde atmosféra začíná. Svrchní vrstva atmosféry plynule přechází do meziplanetárního prostoru.

Atmosféra nás v podstatě chrání před škodlivými účinky záření o krátkých vlnách: ultrafialového, rentgenového a gama záření. Na zemský povrch se dostává neškodná část ultrafialového záření, viditelné světlo, infračervené záření a rádiové vlny. Na obr. 1.5 je kromě spektrální charakteristiky slunečního záření vně atmosféry (spektrum AM0) znázorněna spektrální charakteristika po průchodu atmosférou kolmo na zemský povrch (spektrum AM1). Ze spektrální charakteristiky na zemském povrchu je patrné především „odfiltrování“ UVC záření a významné pohlcení záření



Obr. 1.5 Spektrální charakteristika zářivého toku sluneční energie procházejícího zemskou atmosférou

vodní párou v atmosféře. Na zemský povrch dopadá sluneční záření s významným energetickým obsahem v oblasti vlnových délek **od 0,3 do 3,0 μm** .

Označení spektra AM (Air Mass) označuje hmotu atmosféry, resp. vyjadřuje poměrnou délku dráhy pomyslného slunečního paprsku procházejícího atmosférou vzhledem k nejkratší možné dráze, tj. kolmo na zemský povrch. S úhlem dopadu slunečního záření na zemský povrch se mění délka dráhy, kterou sluneční paprsek musí urazit a tedy i tloušťka vzduchové vrstvy atmosféry, kterou musí projít. Spektrum AM1 je pro kolmý úhel dopadu, AM1,5 pro zenitový úhel 37° a AM2 pro 60°.

V průměrné roční bilanci se z celkového toku energie slunečního záření ze Slunce zpět do vesmíru odrazí od mraků, částec prachu a zemského povrchu zhruba 34 %. Atmosféra pohltí okolo 19 %. Zbývající část sluneční energie je pohlcena zemským povrchem (47 %). Záření pohlcené zemským povrchem se mění v teplo, které je vyzařováno z povrchu Země jako infračervené záření (14 %). Infračervené záření je pohlcováno v atmosféře víceatomovými plyny, což vede k trvalému zvýšení teploty zemského povrchu (skleníkový efekt). Tuto tepelnou energii prostředí (vzduchu, země, vody) o nízké teplotě lze využívat přečerpáváním na vyšší využitelnou teplotu **tepelnými čerpadly**. Značné množství energie dopadající na rozsáhlé plochy oceánů se spotřebuje na vypařování vody (23 %). Vodní pára je proudy vzduchu vynášena nahoru, kde v chladnějších vrstvách atmosféry kondenzuje, předává své skupenské teplo okolnímu vzduchu a ve formě srážek přichází zpět na zemský povrch a je základem vodní energie využitelné ve **vodních elektrárnách**. Zbytek slunečního záření pohlcené zemským povrchem (10 %) je odveden konvekcí do vzduchu. Vzduch zahřátý od povrchu Země stoupá nahoru a na jeho místo proudí těžší chladný vzduch, čímž vznikají větry. Energii lokálního nebo globálního proudění větru je možné využívat ve **větrných elektrárnách**. Pouze nepatrné množství sluneční energie dopadající na Zemi (asi 1 ‰) připadá na biologické reakce probíhající v biosféře, především na fotosyntézu, která s využitím energie slunečního záření vytváří biologickou hmotu ze základních prvků uhlíku, kyslíku a vodíku – **biomasu**.

Energie slunečního záření je tak nepřímo podstatou všech obnovitelných zdrojů energie na Zemi: energie prostředí, vodní energie, větrné energie, energie biomasy s výjimkou energie geotermální a slapové, jejichž příspěvky jsou o několik řádů nižší.

■ 1.2.2 Přímé a difuzní záření

Na vnější povrch atmosféry dopadá sluneční záření v nerozptýlené formě, které si lze představit jako paprsky přicházející přímo ze slunečního kotouče. Průchodem atmosférou dochází k jeho rozptýlení na částicích prachu, krystalcích ledu či kapičkách vody. Část zářivého toku pak z oblohy přichází ve formě rozptýleného, tzv. **difuzního slunečního záření**, které nemá směrový charakter – je všesměrové – přichází ze všech směrů se stejnou intenzitou. Sluneční záření nerozptýlené se označuje jako **přímé slunečního záření** a má výrazně směrový charakter. Zjednodušeně lze konstatovat, že přímé sluneční záření přichází tehdy, je-li viditelný sluneční kotouč. Výkonová hustota přímého slunečního záření je oproti difuznímu značně závislá na úhlu dopadu. K difuznímu záření se počítá i **záření odražené** od okolních ploch, zvláště od terénu.

Vychází se z předpokladu, že naprostá většina povrchů v přírodě jsou povrchy difuzní, tzn. že i přímé úhlově závislé sluneční záření dopadající na takový povrch se odrazí do všech stran více či méně se stejnou intenzitou (všesměrově). V prostředí měst s výrazným podílem lesklých ploch tento předpoklad platí omezeně.

Rozlišují se dvě základní veličiny popisující energetický obsah slunečního záření: jednak výkonová hustota zářivého toku slunečního záření, označovaná jako **sluneční ozáření G** ve W/m^2 a dále hustota dopadající energie za časový úsek, označovaná jako **dávka slunečního ozáření H** v kWh/m^2 .

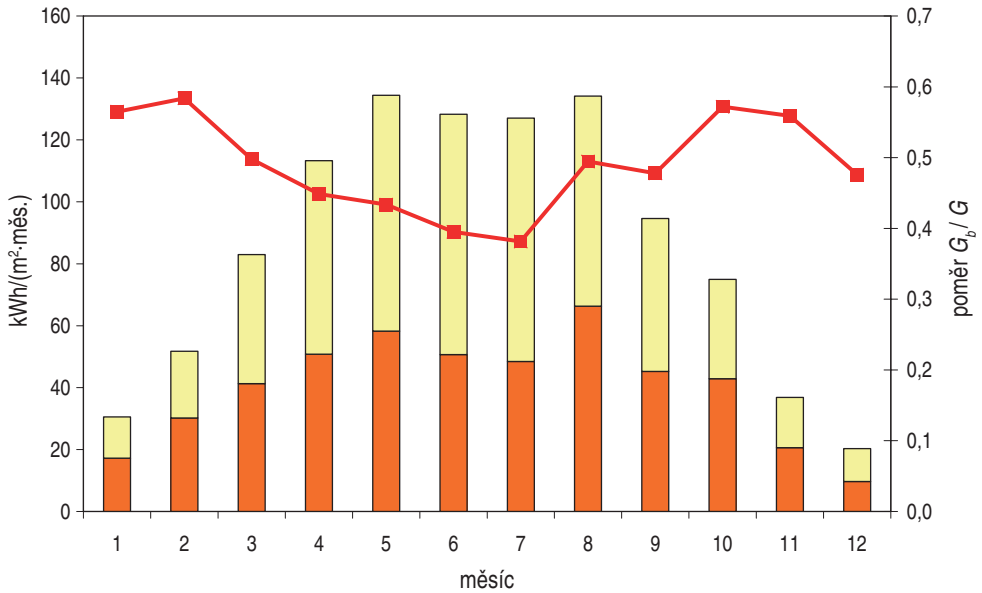
Pro rozlišení základních termínů je vhodné ještě zavést následující jednoduchou a snad srozumitelnou konvenci používanou nejen v této knize. Termín **sluneční** přísluší všem veličinám a jevům, které souvisí se Sluncem a jeho aktivitou, např. sluneční záření, sluneční konstanta, sluneční soustava, apod. Termín **solární** je spojen s technickým využitím slunečního záření, např. solární kolektor, solární soustava, solární zisk, apod. Pro další termíny z oblasti solární tepelné techniky viz [4].

Tab. 1.1 Hodnoty celkového slunečního ozáření

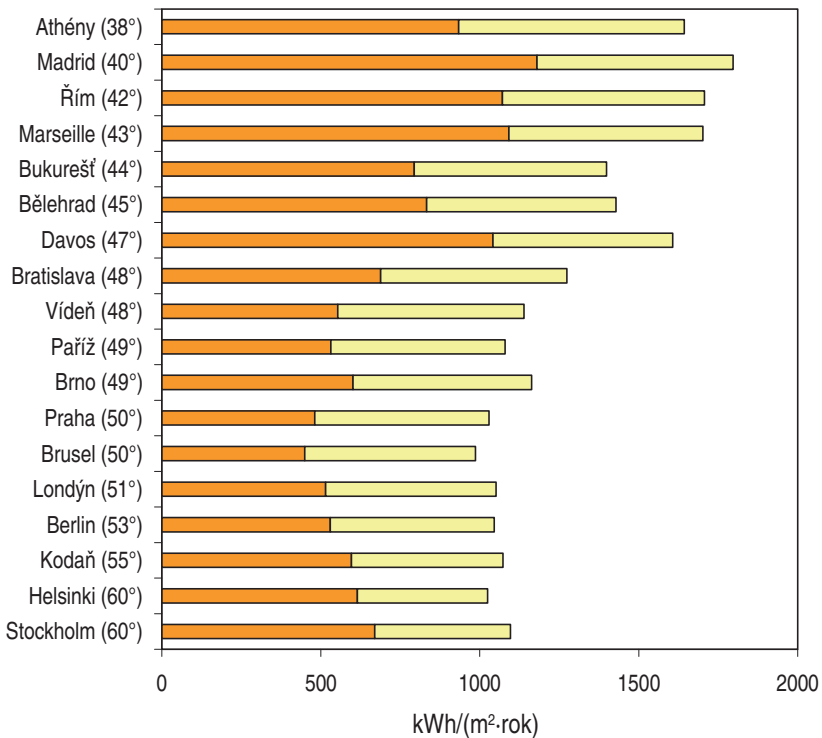
	$G = G_b + G_d$	poměr G_d / G
Jasná obloha	700–1 000 W/m^2	10–20 %
Lehce zataženo	200–700 W/m^2	20–80 %
Silně zataženo	100–200 W/m^2	80–100 %

V *tab. 1.1* jsou uvedeny typické hodnoty celkového slunečního ozáření G pro různé stavy oblačnosti. Celkové sluneční ozáření G je součtem přímého slunečního ozáření G_b , a difuzního slunečního ozáření G_d . Úrovně slunečního ozáření jsou podmíněny ročním obdobím pouze částečně, zejména však aktuální oblačností a sklonem přijímající plochy. Proto při jasném zimním dnu lze v poledne při kolmém úhlu dopadu naměřit úroveň slunečního ozáření blízkou hodnotě $1\,000\,W/m^2$. Naměření hodnot slunečního ozáření významně přesahujících $1\,000\,W/m^2$ zpravidla naznačuje významnou složku odraženého slunečního záření, např. od lesklé plechové střechy.

Na *obr. 1.6* jsou porovnány podíly přímého záření na celkové dopadající sluneční energii během roku pro Prahu v typickém meteorologickém roce. V průměru během roku se přímé sluneční ozáření na plochu skloněnou pod úhlem odpovídajícím zeměpisné šířce (zjednodušeně uvažováno jako optimum 50°) podílí na celkovém ozáření okolo 50 %. Vyšší poměrné hodnoty jsou patrné v zimním období, v letním poměr klesá vzhledem k odlišnému typu oblačnosti. Podobně jsou na *obr. 1.7* porovnány celoroční poměry mezi přímým a difuzním slunečním ozářením pro různá místa v Evropě od severních zeměpisných šířek po jih Evropy. Jižní Evropa pod zeměpisnou šířkou 45° vykazuje celoroční podíly přímého slunečního záření nad 60 % a odpovídající vysoké úrovně dopadající sluneční energie nad $1\,500\,kWh/(m^2 \cdot rok)$. Zatímco celoroční dopadající sluneční energie ve střední a severní Evropě je srovnatelná, střední Evropa okolo padesáté rovnoběžky má podíly přímého záření zhruba o 10 % nižší než severní část Evropy. Podíl přímého slunečního záření v České republice se pohybuje pod 50 %.



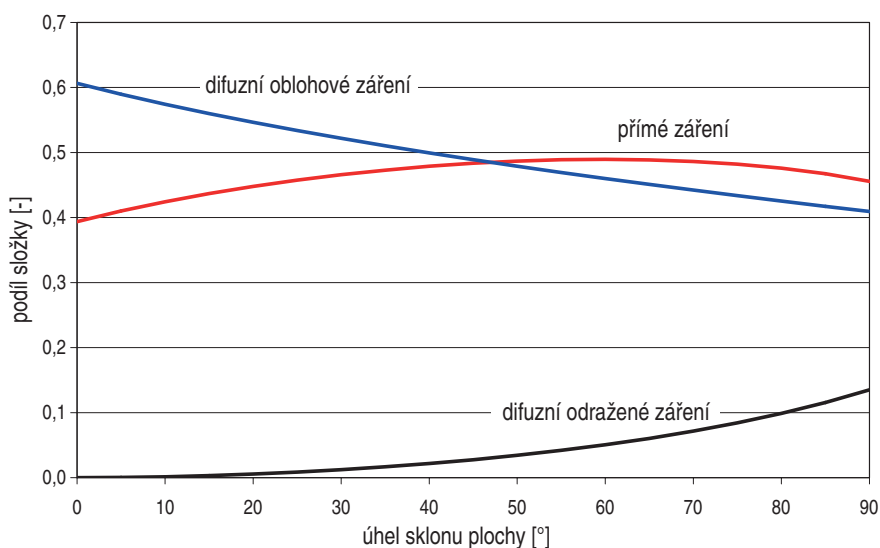
Obr. 1.6 Podíl přímého (tmavá) a difuzního (světlá) slunečního záření během roku (typický rok pro Prahu)



Obr. 1.7 Podíl přímého (tmavá) a difuzního (světlá) slunečního záření během roku pro různá místa Evropy při optimálním sklonu (TMY Meteornorm)

Z podílu přímé složky dopadající energie slunečního záření lze usuzovat na vhodnost lokality pro použití optických prvků pro soustředění slunečního záření, např. reflektorů či čoček. V České republice se solární kolektory s vysokými koncentračními faktory neprosazují právě z důvodu nepříliš vhodných klimatických podmínek s nízkým podílem energie přímého záření. Lze tedy předpokládat, že se na našem území nebudou stavět koncentrační solární elektrárny, využívající parabolických žlabů k produkci přehřáté páry pro turbínu nebo Stirlingových motorů umístěných v ohnisku parabolické mísy.

Jak se mění podíl jednotlivých složek slunečního záření při dopadu na plochu s různým sklonem je naznačeno na obr. 1.8. Pro případ jižně orientované plochy a údajů typického meteorologického roku pro Prahu jsou vyjádřeny poměry v závislosti na úhlu sklonu. Čím větší sklon má plocha od vodorovné roviny, tím více přijímá odražené záření od terénu. Jinými slovy lze říci, že „více vidí“ terén a tedy od něj více přijímá odražené záření. Podobně – avšak naopak – rostoucí sklon neumožňuje difuznímu záření z celé polokoule oblohy dopadat na plochu, neboť plocha „vidí“ pouze omezenou výšeč oblohy danou sklonem plochy. To se projeví v nižší úrovni difuzní oblohové složky dopadajícího slunečního záření.



Obr. 1.8 Podíl složek slunečního záření dopadajícího na jižně orientovanou plochu s různým sklonem

1.3 Měření veličin slunečního záření

Informace o úrovni slunečního záření jsou zapotřebí pro návrhové výpočty a hodnocení projektovaných i realizovaných solárních soustav. Hlavními radiačními veličinami, které se měří v meteorologických stanicích, jsou především celkové sluneční ozáření na vodorovnou rovinu a doba trvání slunečního svitu. Při zkoušení solárních kolektorů a soustav se měří také celkové sluneční ozáření, avšak na rovinu se sklonem solárních kolektorů. U speciálních metod zkoušení kolektorů (viz quazidynamická metoda) se měří i difuzní ozáření.