

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky



Určení a využití horizontální osvětlenosti v průběhu roku
The determination and use of horizontal illuminance during
the year

Bakalářská práce

Bachelor's thesis

Jiří Pavlousek

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Zálešák

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

2014

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jiří Pavlousek**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Určení a využití horizontální osvětlenosti v průběhu roku**

Pokyny pro vypracování:

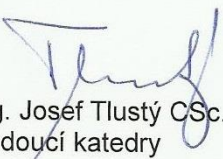
1. Horizontální osvětlenosti nezacloněné roviny
2. Stanovení osvětleností vertikálních rovin reprezentujících fasádu budovy
3. Určení příspěvku denního osvětlení pro regulaci soustavy umělého osvětlení

Seznam odborné literatury:

- [1] ISO 15469:2004 (CIE S 011/E:2003). Spatial distribution of daylight -- CIE standard general sky
- [2] DARULA, Stanislav. ZDROJE DENNÉHO OSVETLENIA. Bratislava, 2012. Habilitační práce. Slovenská technická univerzita, Stavebná fakulta.
- [3] HABEL Jiří, Dvořáček Karel, Dvořáček Vladimír, Žák Petr, Světlo a osvětlování 1, Praha FCC Public, 2013. 624 s. ISBN 978-80-86534-21-3

Vedoucí: Ing. Jan Zálešák

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015


prof. Ing. Josef Tlustý CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 12. 2. 2014

Abstrakt

Tato práce se zabývá výpočtem průběhu denní osvětlenosti v závislosti na zeměpisné poloze, datu, času a stavu oblohy.

Hlavním cílem práce je vyčíslení hodnoty osvětlenosti vertikální roviny s libovolnou orientací pro libovolně zvolené datum, čas a stav oblohy (reprezentovaný jednou ze standardizovaných obloh CIE). Další součástí práce jsou výpočty předcházející odvození osvětlenosti vertikální roviny, především výpočty polohy Slunce na obloze, horizontální osvětlenosti a rozložení jasů na obloze.

Dalším cílem je vytvoření vhodných funkcí v programu Microsoft Excel 2013, které umožní rychlé a efektivní výpočty výše uvedených problémů.

Klíčová slova

denní světlo, poloha Slunce na obloze, horizontální osvětlenost, standardizované oblohy CIE, rozložení jasů na obloze, osvětlenost vertikální roviny

Abstract

This work focuses on evaluation of daylight's parameters depending on geographical location, date, time, and sky conditions.

The main goal is calculation of the illuminance of the vertical plane with arbitrary chosen orientation for arbitrary chosen date, time and sky conditions (represented by CIE standard skies). Another part of the thesis focuses on calculations preceding deduction of the vertical plane illuminance, mainly position of the Sun, horizontal illuminance and sky luminance distribution.

Another goal is to create new functions in Microsoft Excel 2013, which enable fast and efficient calculations of these problems.

Keywords

daylight, position of the Sun, horizontal illuminance, CIE standard sky, sky luminance distribution, illuminance of the vertical plane

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně za použití zdrojů literatury uvedených v seznamu v závěrečné části práce.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 123/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 19. 5. 2014

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Pavlousek', on a light green rectangular background.

Jiří Pavloušek

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Janu Zálešákovi, slečně Ing. Zuzaně Pelánové a panu profesorovi Ing. Jiřímu Habelovi DrSc. za ochotu, cenné připomínky a věnovaný čas.

Obsah

1. Úvod.....	12
1.1 Denní světlo	12
1.2 Cíl práce.....	13
2. Zdroje denního světla.....	14
2.1 Sluneční světlo	14
2.1.1 Sluneční světelná konstanta.....	14
2.2 Oblohové světlo	17
3. Horizontální osvětlenost.....	18
3.1 Přepoččet sluneční světelné konstanty pro horizontální rovinu	18
3.1.1 Korekční činitel excentricity.....	19
3.1.2 Výška Slunce nad horizontem	20
3.1.2.1 Deklinace Slunce	21
3.1.2.2 Právý sluneční čas, časová rovnice	23
3.2 Přímá složka osvětlenosti	26
3.3 Oblohová složka osvětlenosti	27
4. Oblohy CIE.....	28
4.1 Typy obloh.....	28
4.2 Světelná difúznost a činitel zákalu CIE obloh	29
4.3 Parametry obloh pro výpočet jasu v absolutních jednotkách	30
5. Osvětlenost vertikální roviny	32
5.1 Přepoččet sluneční světelné konstanty pro vertikální rovinu	32
5.2 Výpočty shodné s horizontální osvětleností	33
5.3 Přímá složka osvětlenosti vertikální roviny.....	33
5.3.1 Azimut Slunce.....	35
5.3.2 Azimut vertikální roviny	35
5.4 Oblohová složka osvětlenosti vertikální roviny.....	36

5.4.1	Jas oblohového elementu.....	41
5.4.1.1	Zenitní úhel, úhlová vzdálenost Slunce a elementu.....	43
5.4.1.2	Indikatrix rozptylu pro element oblohy.....	43
5.4.1.3	Indikatrix rozptylu pro zenitní úhel Slunce	43
5.4.1.4	Gradační funkce	44
5.4.1.5	Jas zenitu oblohy.....	44
6.	Zpracování a zobrazení dat	46
6.1	Dokumentace vytvořených funkcí	46
6.1.1	Vstupní parametry	46
6.1.2	Funkce pro výpočet polohy Slunce	47
6.1.3	Funkce pro zjištění parametrů oblohy	47
6.1.4	Funkce pro výpočet horizontální osvětlenosti	48
6.1.5	Funkce pro výpočet relativního rozložení jasů	48
6.1.6	Funkce pro výpočet osvětlenosti vertikální roviny	48
6.2	Příklady vypočtených průběhů	49
7.	Závěr.....	57
7.1	Vyhodnocení cílů práce.....	57
7.2	Náměty možného pokračování práce	58
	Literatura	59
	Příloha 1 – Spektrální složení slunečního záření.....	61
	Příloha 2 – Poměrná světelná účinnost monochromatického záření.....	66
	Příloha 3 – Obsah přiloženého CD	70

Seznam obrázků

Spektrální složení slunečního záření	16
Křivka fotopického vidění	16
Hodnota přepočtené sluneční světelné konstanty	19
Hodnota korekčního činitele excentricity v průběhu roku	20
Rozdíl vypočtené výšky Slunce (rozdíl = ČSN – Darula).....	21
Rozdíly mezi deklinacemi Slunce spočtených dle různých norem.....	23
Průběhy časových rovnic (různá metodika výpočtu)	25
Porovnání přesnosti časových rovnic (různá metodika výpočtu)	25
Zeslabení světla v atmosféře v závislosti na výšce Slunce ($T_v = 1$).....	27
Přepočet sluneční světelné konstanty – horizontální rovina.....	32
Přepočet sluneční světelné konstanty – vertikální rovina.....	33
Poloha a velikost elementu oblohy – celková situace	37
Poloha a velikost elementu oblohy – pohled shora a z boku.....	38
Výpočet rozložení jasů na obloze – poloha Slunce a elementu oblohy	42
Poloha Slunce v průběhu roku	49
Podíl oblohové složky horizontální osvětlenosti různých CIE obloh	50
Celková horizontální osvětlenost - různé typy obloh.....	50
Horizontální osvětlenost v průběhu dne - podíly složek, změny obloh	51
Relativní rozložení jasů - zatažené oblohy	51
Relativní rozložení jasů - částečně oblačné oblohy	52
Relativní rozložení jasů - jasné oblohy	53
Osvětlenost různě natočené vertikální roviny.....	53
Osvětlenost vertikální roviny - orientace na východ.....	54
Osvětlenost vertikální roviny - orientace na jih.....	55
Osvětlenost vertikální roviny - orientace na západ	55
Osvětlenost vertikální roviny - orientace na sever.....	56

Seznam tabulek

CIE standardizované oblohy – parametry a , b , c , d , e	29
CIE standardizované oblohy – parametry k_{vd} a T_v	30
CIE standardizované oblohy – parametry A_1 , A_2 , B , C , D , E	31
Význam a rozměr vstupních parametrů funkcí	46
Funkce pro výpočet polohy Slunce	47
Funkce pro zjištění parametrů oblohy	47
Funkce pro výpočet horizontální osvětlenosti	48
Funkce pro výpočet relativního rozložení jasů	48
Funkce pro výpočet osvětlenosti vertikální roviny	48

Seznam použitých symbolů

<i>Symbol</i>	<i>Význam</i>	<i>Jednotka</i>
E	Osvětlenost	lx
I	Svítivost	cd
L	Jas	cd.m ⁻²
Ω	Prostorový úhel	sr
E _{e0}	Solární (sluneční zářivá) konstanta	W.m ⁻²
E _{v0}	Sluneční světelná konstanta	lx
λ	Vlnová délka	nm
E _e	Extraterestriální ozáření	W.m ⁻²
V (λ)	Poměrná spektrální citlivost zraku	-
E _H	Horizontální osvětlenost	lx
E _{vz}	Přímá složka horizontální osvětlenosti	lx
E _{vd}	Oblohová složka horizontální osvětlenosti	lx
E _v	Sluneční světelná konstanta přepočtená na horizontální rovinu	lx
ϵ	Korekční činitel excentricity	-
γ_s	Výška Slunce nad obzorem	°
J	Pořadové číslo dne v roce	-
ϕ	Zeměpisná šířka uvažované polohy	°
δ	Deklinace Slunce	°
TST	Pravý sluneční čas	hod
τ	Hodinový úhel Slunce	hod
LT	Místní čas	hod
λ_o, λ	Zeměpisná délka uvažované polohy	°
λ_s	Zeměpisná délka příslušného časového pásma	°
ET	Časová rovnice	hod
D	Pořadové číslo dne v měsíci	-
M	Pořadové číslo dne v roce	-
a _v	Světelný extinkční činitel atmosféry	-
m	Relativní optická vzduchová tloušťka atmosféry	-
T _v	Světelný činitel zákalu atmosféry	-
k _{vd}	Světelná difúznost atmosféry	-
a, b, c, d, e	Parametry CIE obloh pro výpočet relativního rozložení jasů	-
A1, A2, B, C, D, E	Parametry CIE obloh pro výpočet rozložení jasů v absolutních jednotkách	-
E _V	Osvětlenost vertikální roviny	lx
E _{vzV}	Přímá složka osvětlenosti vertikální roviny	lx
E _{vdV}	Oblohová složka osvětlenosti vertikální roviny	lx
E _{vV}	Sluneční světelná konstanta přepočtená na vertikální rovinu	lx
A _S	Azimut Slunce	°

A_V	Azimut normály vertikální roviny	°
ΔA	Velikost úhlu mezi azimutem Slunce a azimutem normály vertikální roviny	°
A_{SN}	Azimut Slunce dle výpočtu z ČSN 73 0581	°
C	Meridiánová konvergence katastrálních map S-JTSK	°
i	Pořadové číslo oblohového elementu	-
β	Velikost úhlu mezi azimutem normály vertikální roviny a azimutem oblohového elementu	°
γ	Výška elementu nad obzorem	°
L_a	Jas oblohového elementu	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$
L_{VZ}	Jas zenitu oblohy	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$
L_a / L_{VZ}	Relativní jas elementu oblohy k jasů zenitu oblohy	-
Z	Zenitní úhel oblohového elementu	rad
Z_S	Zenitní úhel Slunce	rad
χ	Úhlová vzdálenost oblohového elementu a Slunce	rad
$f(\chi)$	Relativní indikatrix rozptylu pro oblohový element	-
$f(Z_S)$	Relativní indikatrix rozptylu pro zenitní úhel Slunce	-
$\varphi(Z)$	Gradační funkce pro oblohový element	-
$\varphi(0)$	Gradační funkce pro zenit oblohy	-

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage, Mezinárodní komise pro osvětlování
ČSN	Česká technická norma
DIN	Deutsche Industrie Norm, Německá průmyslová norma
BS	British Standard, Britská norma
EU	Evropská unie
CEN	Comité Européen de Normalisation, Evropský výbor pro normalizaci
CEN/TC	Technická komise CEN
ISO	International Organization for Standardization, Mezinárodní organizace pro normalizaci
ISO Standard	Mezinárodní norma ISO
NREL	National Renewable Energy Laboratory, Federální laboratoř obnovitelných zdrojů energie
S-JTSK	Souřadnicový systém jednotné trigonometrické sítě katastrální

1. Úvod

1.1 Denní světlo

Vliv denního světla pro život a životní podmínky lidí na Zemi je zásadní. Denní světlo ovlivňuje fyzický i psychický stav člověka a tím pádem i jeho momentální chování, únavu a v neposlední řadě i pracovní výkonnost.

V moderních civilizacích navíc lidé tráví velkou část svého života uvnitř budov, kde se špatně navržené či nefunkční osvětlení projeví v maximální možné míře. Umělé osvětlení zde nedokáže plnohodnotně nahradit přirozené denní světlo, zejména co se týče kvality zrakově náročných prací a správného rozlišení barev. Zajištění těchto hygienických potřeb lidí je v některých zemích řešeno pomocí norem (Česká republika, Slovensko, Spojené Království, Rakousko, atd.), stanovující kvalitativní i kvantitativní parametry osvětlení pro obytné a pracovní prostory. Některé státy naopak zabezpečení denního světla v budovách neřeší (Polsko, Maďarsko, atd.).

Vyjma zdravotního, existuje i ekologické hledisko využití denního světla při osvětlování budov. V současnosti, kdy se ekologie stává jedním z předních témat různých zájmových uskupení, se snížení energetické náročnosti osvětlovacích soustav stává nezbytným. Zde je jasně patrná výhoda denního světla – jeho produkce je neustálá a bez potřeby dalších zařízení.

Při snaze využít denní světlo k osvětlení budov však narážíme na řadu složitých problémů. I když jsme schopni určit časy východu a západu Slunce i jeho dráhu po obloze, není v našich silách přesně předpovědět povětrnostní podmínky a to zejména oblačnost a z ní vyplývající stínění slunečních paprsků.

Problém s nepředvídatelností množství využitelného denního světla se pokoušíme redukovat výpočtem světelně – technických veličin a jejich vyhodnocením. Různé, měnící se povětrnostní podmínky jsou reprezentovány pomocí patnácti standardních obloh, pro které lze výpočty provádět. Následně, dle předpovědi počasí, lze určit pravděpodobnosti výskytu jednotlivých typů obloh a z nich vyplývající (aspoň přibližné) hladiny osvětlenosti.

1.2 Cíl práce

Prvním cílem bakalářské práce je určit horizontální osvětlenost, tj. osvětlenost horizontální nezacloněné roviny v závislosti na zeměpisné poloze, datu, času a typu oblohy dle CIE.

Druhým, nejdůležitějším cílem práce je převod hodnoty horizontální osvětlenosti na vertikální rovinu, tudíž získá hodnoty osvětlenosti vertikální nezacloněné roviny, opět v závislosti na zeměpisné poloze, času, typu oblohy dle CIE a navíc na azimutu zmíněné vertikální roviny. Vertikální rovina reprezentuje stěnu budovy, a tudíž i umístění okenního otvoru.

Oba tyto hlavní cíle jsou navíc doplněny grafickým zobrazením některých stavů a průběhů pro lepší představu o této, ne příliš jednoduché, problematice.

Z hlediska praktického využití výsledků si práce klade za cíl, kromě textové dokumentace, vytvoření funkcí v programu Microsoft Excel (konkrétně v prostředí Visual Basic), umožňující rychlé a pohodlné výpočty, grafické zobrazení a následné vyhodnocení horizontálních osvětleností, osvětleností vertikálních rovin a s nimi souvisejících veličin, jakými jsou např. výška Slunce nad obzorem, rozložení jasů na obloze, atd. Tyto vytvořené funkce by měly umožnit další, podrobnější zkoumání a parametrizaci denního světla, a jeho využití při osvětlování vnitřních prostorů.

2. Zdroje denního světla

Viditelné světlo je elektromagnetické záření o vlnových délkách v rozmezí $\lambda = 380 - 780 \text{ nm}$. Hlavním přirozeným zdrojem světla je Slunce, přičemž množství dopadajícího světla je závislé na výšce Slunce nad horizontem, na momentálním složení atmosféry a na povětrnostních podmínkách.

Denní světlo se skládá ze dvou složek: ze slunečního světla (přímá složka) a z oblohového světla (nepřímá složka). Podíl těchto dvou složek závisí na aktuální povětrnostní situaci, zejména na oblačnosti a hustotě prachových částic rozptýlených v atmosféře.

2.1 Sluneční světlo

Slunce je největším a nejtěžším objektem sluneční soustavy. Má poloměr $696\,342 \text{ km}$ [1], což odpovídá poloměru 109 Zemí. V hmotnostním srovnání vyniká Slunce ještě více, jeho hmotnost je $1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$, což představuje hmotnost téměř 330 000 Zemí a zároveň tato hmotnost představuje přes 99,8 % hmotnosti celé sluneční soustavy. Jelikož Země neobíhá Slunce po kružnici, vzdálenost Země – Slunce se neustále mění. V perihéliu je Země vzdálena $1,471 \cdot 10^{11} \text{ m}$, zatímco v aféliu $1,521 \cdot 10^{11} \text{ m}$. Pro potřeby výpočtů se uvažuje průměrná vzdálenost Země – Slunce, která je stanovena na $1,4959787 \cdot 10^{11} \text{ m}$.

Sluneční energie dopadající na horní hranici atmosféry je $1,8 \cdot 10^{17} \text{ W} \pm 3\%$. Ozáření extraterestriálním slunečním zářením vyjadřuje tzv. solární (slunečná zářivá) konstanta. Ta je definována jako energie dopadající na povrch kolmý na sluneční paprsky při průměrné vzdálenosti Země od Slunce, její hodnotu uvádí docent Darula [2]:

$$E_{e0} = (1367 \pm 7) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} = 1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \pm 0,5 \% \quad (1)$$

2.1.1 Sluneční světelná konstanta

Sluneční světelná konstanta E_{v0} vyjadřuje množství světla dopadajícího na zemský povrch v kolmém směru ke slunečním paprskům, při průměrné vzdálenosti Země od Slunce. Od slunečné zářivé konstanty se liší tím, že vyjadřuje pouze energii vln ve viditelném spektru. Tím pádem se jedná o fotometrickou veličinu, jednotkou osvětlenosti je lux. Ač je definována jako konstanta, ve skutečnosti její velikost mírně kolísá podle slunečních cyklů. Tyto se v technické praxi neuvažují a používá se konstantní průměrná hodnota.

Pro zjištění sluneční světelné konstanty se využívají dva způsoby. První z nich je založen na zjištění jasů Slunce. Sluneční světelná konstanta se poté spočte:

$$E_{v0} = L_{v\odot} \cdot \Omega_S [lx] \quad (2)$$

kde $L_{v\odot}$ je průměrný jas Slunce [$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$],

Ω_S je prostorový úhel slunečního disku pozorovaného ze Země [sr].

Pokud uvažujeme průměrnou vzdálenost Slunce od Země $1,4959787 \cdot 10^{11}$ m a poloměr Slunce 696 342 km, spočteme výše uvedený prostorový úhel:

$$\Omega_S = \frac{\pi \cdot r^2}{l^2} = \frac{\pi \cdot (696\,342 \cdot 10^3)^2}{(1,4959787 \cdot 10^{11})^2} \doteq 0.000068068195 \text{ sr} \quad (3)$$

Složitější je určit průměrný jas Slunce. To je způsobeno nerovnoměrností jasu slunečního disku, na kterém se vyskytují více či méně světlé sluneční skvrny. Jak uvádí docent Darula ve své habilitační práci [2], žádným ze zatím uskutečněných pokusů se nepodařilo získat hodnotu přesnou tak, aby mohla být využita k dalším výpočtům.

Při získávání přesnějších hodnot sluneční světelné konstanty se tudíž využívá jiného postupu, který je sice technologicky náročnější, ale přináší mnohem přesnější výsledky. Způsob je založen na měření hustoty toku slunečního záření (na vnějším okraji atmosféry) a poměrné spektrální citlivosti zraku $V(\lambda)$. Sluneční světelná konstanta se poté spočte:

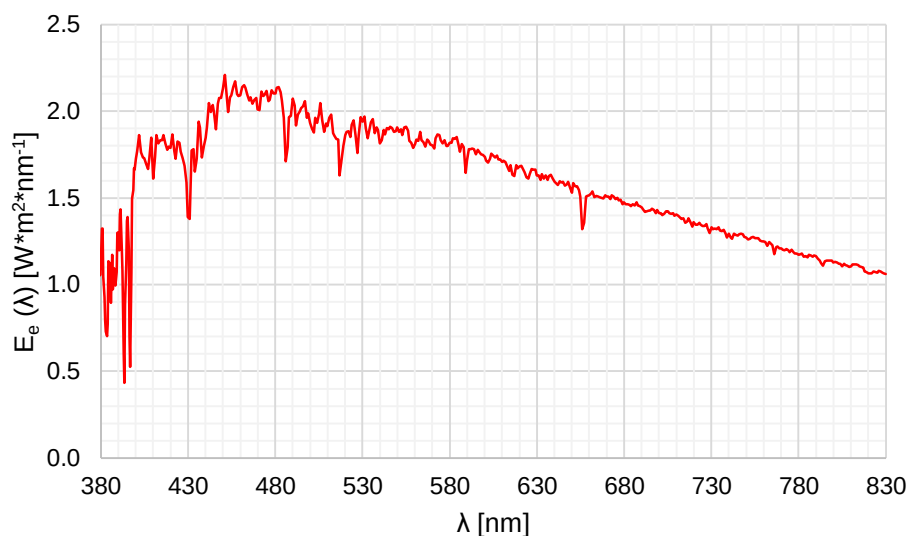
$$E_{v0} = K_m \cdot \int_{\lambda=380}^{\lambda=780} E_e(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda [lx] \quad (4)$$

kde $K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ je maximální účinnost záření pro $\lambda = 555 \text{ nm}$,

$E_e(\lambda)$ je extraterestriální ozáření [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$],

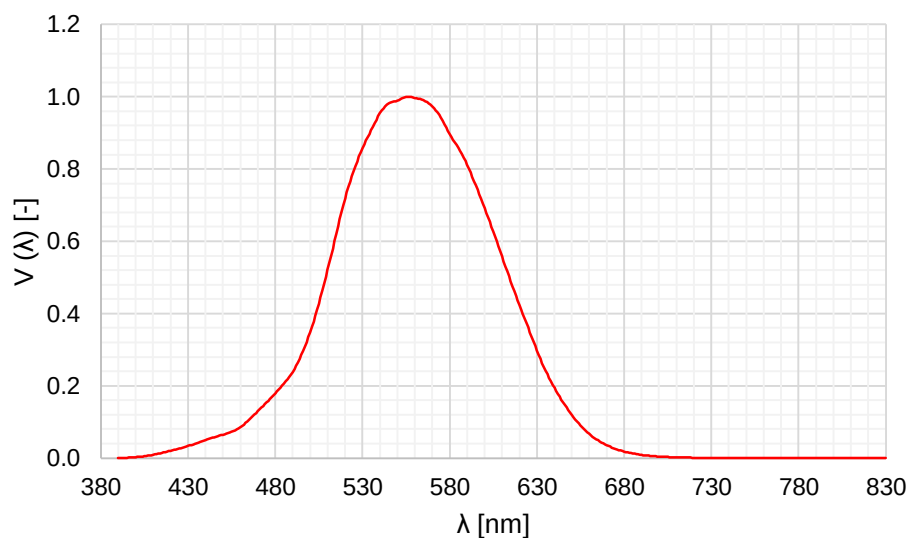
$V(\lambda)$ je poměrná spektrální citlivost zraku [-].

Měření spektrálního složení slunečního záření je složitý úkon, kterým se v historii zabývalo několik výzkumů. Pro naši potřebu stačí vědět, že v současnosti nejpodrobněji a nejpresněji spektrum popsal a publikoval [3] doktor Christian Gueymard.



Obrázek 1: Spektrální složení slunečního záření

Obrázek číslo 1 zobrazuje spektrální složení slunečního záření dle doktora Gueymarda [3], uvedeny jsou pouze hodnoty v okolí viditelné oblasti (viz Příloha 1).



Obrázek 2: Křivka fotopického vidění

Co se týče křivky $V(\lambda)$, CIE (Mezinárodní komise pro osvětlování) zveřejnila v průběhu let několik mírně se lišících hodnot, z nichž využijeme poslední hodnoty, tudíž ty z roku 2006 [4] (viz Příloha 2), průběh křivky je na obrázku číslo 2.

Z dat naměřených doktorem Gueymardem a křivky fotopického vidění byla podle výše uvedeného vztahu spočtena nová hodnota sluneční světelné konstanty. Tuto hodnotu spočetli a zveřejnili docenti Darula a Kittler s výsledkem [2]:

$$E_{v0} = 133\,334\,lx \quad (5)$$

2.2 Oblohové světlo

Druhým zdrojem denního světla je obloha. Oblohové světlo tvoří nepřímou složku denní osvětlenosti a je také nazýváno světlem difúzním. Vzniká rozptýlením slunečního světla v atmosféře, ale vzhledem k těžko popsateľným a časově velmi proměnlivým stavům atmosféry (oblačnost, vlhkost, přítomnost různých plynů a prachových částic, apod.) je velmi složité jeho hodnoty předem odhadnout. Pro modelování jasů obloh se tudíž využívají standardizované oblohy CIE, kterým se věnuje mj. čtvrtá část této práce.

3. Horizontální osvětlenost

Výpočet horizontální osvětlenosti je základní postup pro analýzu a další modelování denního osvětlení. Horizontální osvětlenost je osvětlenost nezacloněné, nekonečně velké tečné roviny k Zemi, jednotkou je lux. Celková horizontální osvětlenost se spočte sečtením přímé a oblohové složky [2], [5]:

$$E_H = E_{vz} + E_{vd} \text{ [lx]} \quad (6)$$

kde E_{vz} je přímá složka horizontální osvětlenosti [lx],

E_{vd} je oblohová složka horizontální osvětlenosti [lx].

3.1 Přepočet sluneční světelné konstanty pro horizontální rovinu

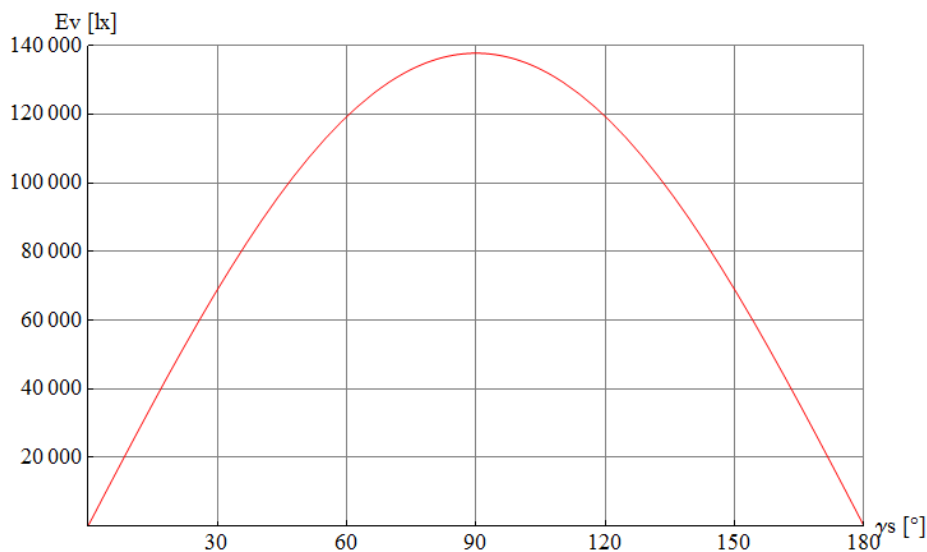
Pro výpočet obou částí horizontální osvětlenosti se využívá sluneční světelná konstanta. Tuto musíme ale přepočíst pro různé výšky Slunce nad horizontem (sluneční světelná konstanta je definována pro kolmý směr paprsků). Přepočet vztažený na horizontální rovinu je uveden v habilitační práci docenta Daruly [2] a ve své práci ho převzal i inženýr Zálešák [5]:

$$E_v = E_{v0} \cdot \epsilon \cdot \sin \gamma_s \text{ [lx]} \quad (7)$$

kde $E_{v0} = 133\,334 \text{ lx}$ je sluneční světelná konstanta,

ϵ je korekční činitel excentricity [-],

γ_s je výška Slunce [°].



Obrázek 3: Hodnota přepočtené sluneční světelné konstanty

Grafické znázornění hodnoty přepočtené sluneční světelné konstanty E_v je v příloženém souboru „Evmanipulate.nb“, na obrázku č. 4 je k dispozici náhled.

3.1.1 Korekční činitel excentricity

Korekční činitel excentricity ϵ zohledňuje neustále se měnící vzdálenost mezi Zemí a Sluncem. Stanovíme jej dle vzorce použitého docentem Darulou [2]:

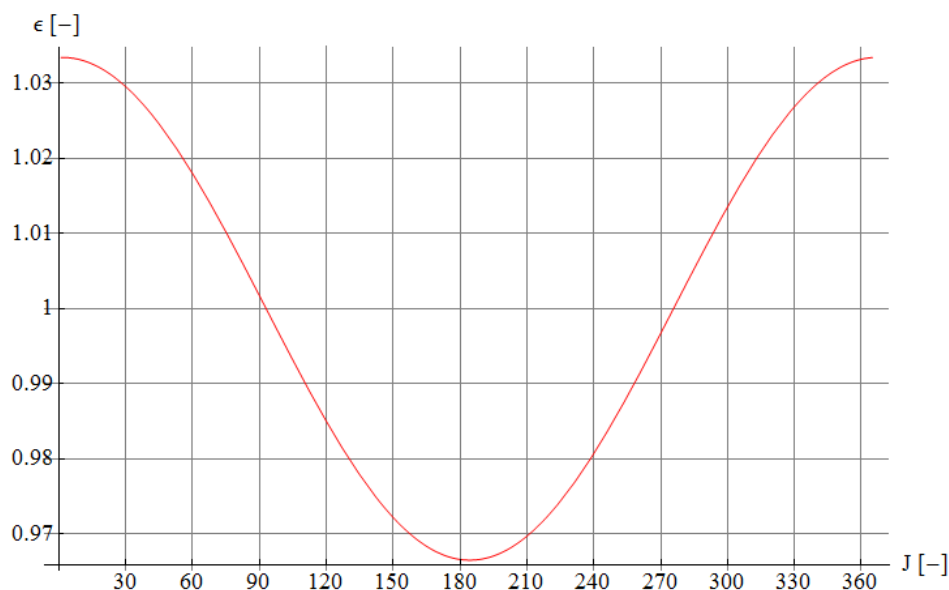
$$\epsilon = \left(\frac{r}{r_0}\right)^2 = 1 + 0,03344 \cdot \cos\left(360^\circ \cdot \frac{J - 1,7356^\circ}{365,25}\right) [-] \quad (8)$$

kde r je vzdálenost mezi Sluncem a Zemí v aktuální den [m],

r_0 je průměrná vzdálenost mezi Sluncem a Zemí [m],

J je pořadové číslo dne v roce [-].

Průběh korekčního činitele v průběhu roku je na obrázku 4.



Obrázek 4: Hodnota korekčního činitele excentricity v průběhu roku

Obrázek 4 ukazuje průběh hodnoty korekčního činitele excentricity v průběhu roku, graf je vytvořen v příloženém souboru „e.nb“.

3.1.2 Výška Slunce nad horizontem

Dále je třeba vypočítat výšku Slunce nad obzorem pro zvolenou zeměpisnou polohu a čas. K tomu se dá využít vzorce použitého docentem Darulou [2]:

$$\gamma_s = \sin^{-1}(\sin \varphi \cdot \sin \delta - \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos(15^\circ \cdot TST)) [^\circ] \quad (9)$$

kde φ je zeměpisná šířka [°] (na sever od rovníku kladná),

δ je deklinace Slunce [°],

TST je pravý sluneční čas [hod].

Z důvodu sjednocení postupu výpočtu polohy Slunce na obloze pro světelně – technické výpočty a pro posuzování oslunění budov byla v České republice vydána norma ČSN [6], uvádějící následující postup:

$$\gamma_s = \sin^{-1}(\sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \tau) [^\circ] \quad (10)$$

kde φ je zeměpisná šířka [°],

δ je deklinace Slunce [°],

τ je hodinový úhel Slunce [hod].

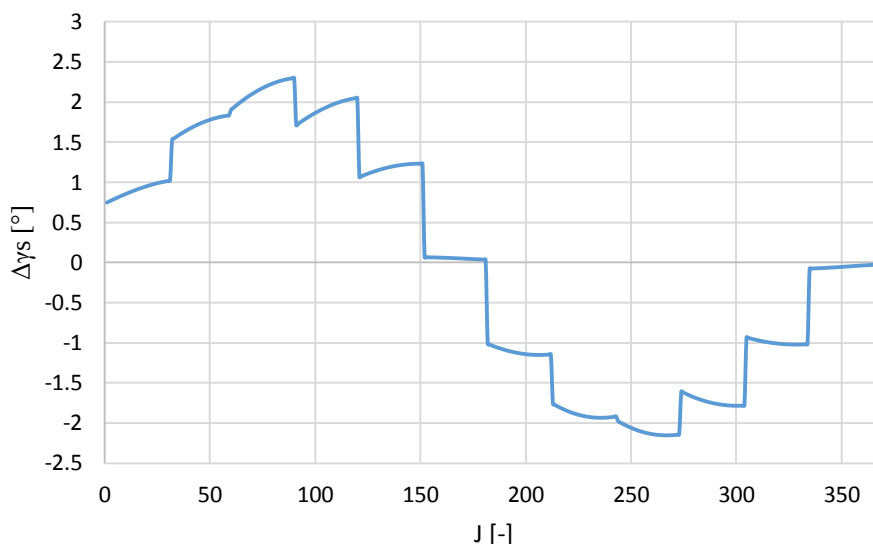
Hodinový úhel je úhel mezi místním poledníkem a deklinační kružnicí, dle normy [6] se spočte:

$$\tau = 15 \cdot (TST - 12) [\text{hod}] \quad (11)$$

kde TST je pravý sluneční čas [hod].

V normě [6] je pro pravý sluneční čas použita zkratka PSC , ale v této práci bude používána výhradně anglická zkratka TST .

Vzhledem k rozdílnému výpočtu výšky Slunce nad horizontem je na následujícím obrázku znázorněno porovnání výpočtů dle normy [6] a podle docentů Daruly a Kittlera [2], [7].



Obrázek 5: Rozdíl vypočtené výšky Slunce (rozdíl = ČSN – Darula)

V grafu je rozdíl vypočtených výšek Slunce (dle metodiky výpočtu) v 8:00 místního času, 50° s. š., 14° v. d. v průběhu roku. Maximální rozdíl mezi vypočtenými hodnotami tvoří necelých $2,5^\circ$. Z důvodu dodržení v Česku platných norem je pro výpočet dále používán vztah z normy ČSN [6]. Výpočet je proveden v příloženém souboru „porovnani.xlsx“.

3.1.2.1 Deklinace Slunce

Deklinace je úhel, který svírá spojnice středů Slunce a Země s rovinou rovníku. Tento úhel se kvůli sklonu zemské osy v průběhu roku neustále mění v intervalu přibližně $-23,45^\circ$ až $23,45^\circ$ [8]. Nulová deklinace je ve dnech rovnodennosti (21. 3. a 23. 9.), extrémů nabývá při slunovratech (nejmenší 22. 12. a největší 21. 6.).

Jak popisuje docent Kaňka [8] deklinace Slunce se neopakuje periodicky, ale mění se i v průběhu let. Přesné hodnoty pro každý rok jsou pravidelně vydávány v hvězdářských ročenkách. Pro světelně – technické výpočty se využívá vztah uvedený v normě [6]:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin(0,98 \cdot D + 29,7 \cdot M - 109) [^\circ] \quad (12)$$

kde D je číslo dne v měsíci [-],

M je číslo měsíce v roce [-].

V souvislosti s plánovaným zavedením jednotné evropské normy pro výpočet deklinace se různými způsoby výpočtu zabíral inženýr Marcel Pelech [9] a dospěl k závěru, že normalizované výpočty deklinací v různých státech EU (podle vlastních norem) se více či méně liší. Pro zajímavost porovnáme výpočet podle české (ČSN 73 0581), německé (DIN 5034) a britské (BS 8206) normy.

Vzorec pro výpočet dle ČSN viz rovnice č. 12, výpočet dle DIN 5034:

$$\begin{aligned} \delta = & 0,3948 - 23,2559 \\ & \cdot \cos(J' + 9,1^\circ) - 0,3915 \\ & \cdot \cos(2 * J' + 5,4^\circ) - 0,1764 \cdot \cos(3 * J' + 26^\circ) [^\circ] \end{aligned} \quad (13)$$

kde $J' = (360^\circ \cdot J)/365 [^\circ]$,

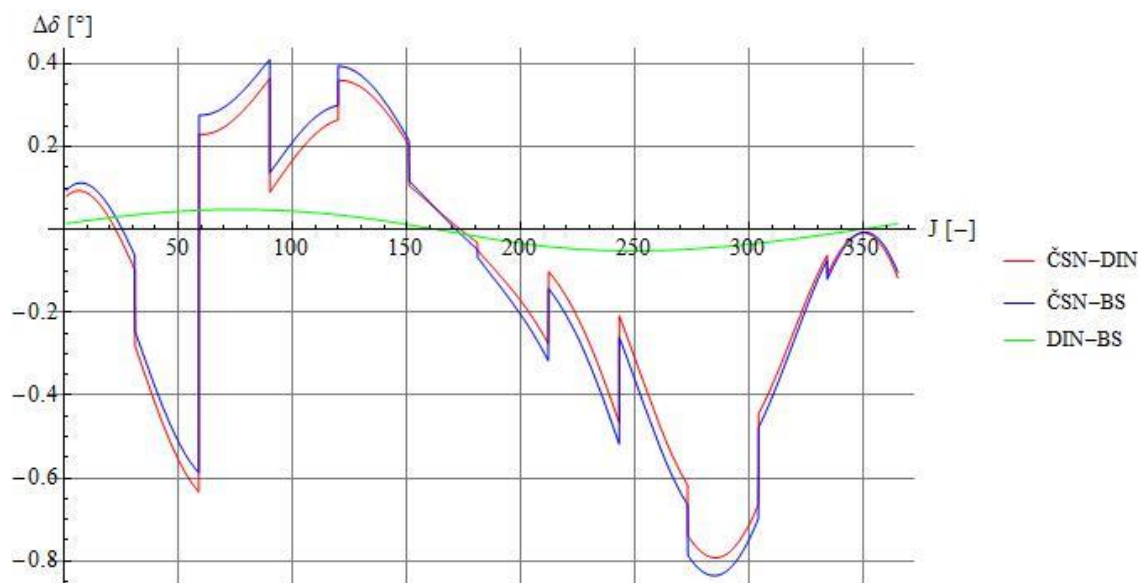
J je pořadové číslo dne v roce [-].

Jako poslední porovnáme metodu z britské normy BS 8206:

$$\begin{aligned} \delta = & 0,006918 - 0,399912 \\ & * \cos \tau_d + 0,070257 * \sin \tau_d - 0,006758 * \cos 2\tau_d \\ & + 0,000907 * \sin 2\tau_d - 0,002697 * \cos 3\tau_d \\ & + 0,001480 * \sin 3\tau_d [rad] \end{aligned} \quad (14)$$

$$\tau_d = \frac{2 \cdot \pi \cdot (J - 1)}{365} [rad]$$

kde J je pořadové číslo dne v roce [-].



Obrázek 6: Rozdíly mezi deklinacemi Slunce spočtených dle různých norem

Obrázek 6 zobrazuje rozdíly deklinací vypočtených dle různých norem. Vidíme, že maximální rozdíl činí cca $0,8^\circ$, čímž výpočet není příliš významně ovlivněn, a tudíž stačí zvolit a uvést použitý vztah. Výpočet rozdílu je proveden v příloženém souboru „declination.nb“.

Jak je dále uvedeno [9], bylo na setkání CEN/TC 169/WG 11 v Kodani v květnu 2013 rozhodnuto, že v případě vytvoření jednotné evropské normy bude využito vztahu z německé DIN 5034.

Tímto se dostáváme do sporu, zda nadále využívat vztah ze stále platné normy ČSN [6] či se již přiklonit k užití německé DIN 5034. Vzhledem k rozdílům, jež zaznamenáváme v řádech desetiny stupně a kvůli současné neexistenci jednotné evropské normy, bude v dalších částech práce, zejména z důvodu dodržení českých norem, používán vztah z normy ČSN [6].

3.1.2.2 Právý sluneční čas, časová rovnice

Právý sluneční čas (TST – „true solar time“) je založen na poloze skutečného středu pravého Slunce a jeho úhlu k místnímu meridiánu. Jelikož je úhlová rychlost Slunce pozorovaného ze Země v důsledku druhého Keplerova zákona různá, neplyne pravý sluneční čas rovnoměrně. Výpočet pravého slunečního času podle docenta Daruly [2] se neliší od výpočtu uvedeného v normě [6]:

$$TST = LT + \frac{\lambda_{lo} - \lambda_s}{15} + ET \text{ [hod]} \quad (15)$$

kde LT je místní čas (local time) [hod],

λ_{lo} je zeměpisná délka místa [$^\circ$] (na východ od nultého poledníku kladná),

λ_s je zeměpisná délka časového pásma [$^\circ$] (střední Evropa $\lambda_s = 15^\circ$),

ET je časová rovnice (equation of time) [hod].

Časová rovnice popisuje změny místního času způsobené elipsovitou oběžnou dráhou Země. Udává rozdíl mezi pravým a středním slunečním časem. Velmi přesný průběh časové rovnice je uveden docenty Darulou a Kittlerem [7]:

$$ET = 0,008 \cdot \cos J' - 0,052 \cdot \cos 2J' - 0,001 \cdot \cos 3J' - 0,122 \cdot \sin J' - 0,157 \cdot \sin 2J' - 0,005 \cdot \sin 3J' \text{ [hod]} \quad (16)$$

kde $J' = (360^\circ \cdot J)/365$ [$^\circ$] a J je pořadové číslo dne v roce [-].

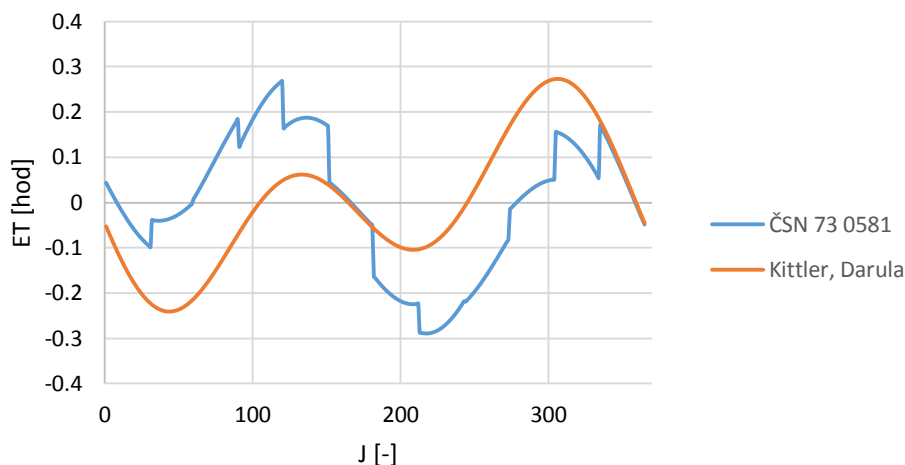
Platná česká norma [6] uvádí časovou rovnici v jiném tvaru:

$$ET = 0,125 \cdot \sin(32^\circ - 0,98^\circ \cdot D + 29,7^\circ \cdot M) + 0,165 \cdot \sin(38^\circ - 2 \cdot (0,98^\circ \cdot D + 29,7^\circ \cdot M)) \text{ [hod]} \quad (17)$$

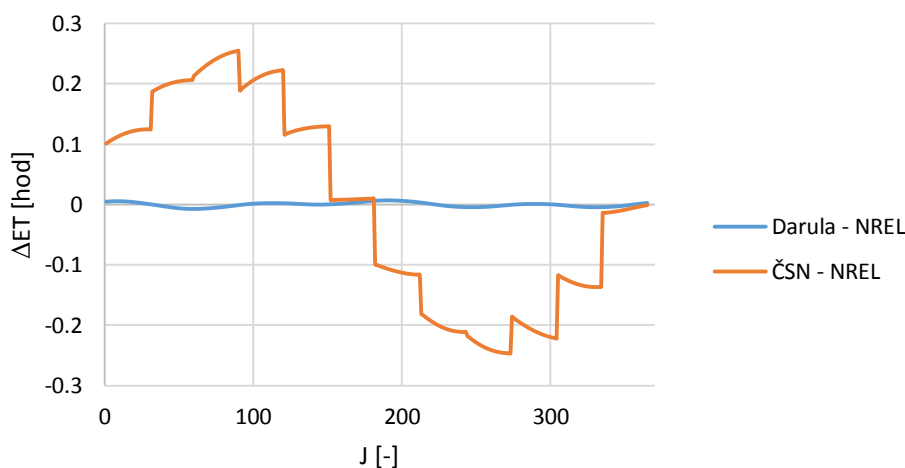
kde D je číslo dne v měsíci [-],

M je číslo měsíce v roce [-].

Tento tvar časové rovnice je vhodný pouze pro metodiku výpočtu popsaného v normě [6], kde jsou rozdílné hodnoty časové rovnice korigovány dalším postupem výpočtu. Tvar časové rovnice uvedený v normě [6] nelze použít pro zjištění rozdílu mezi slunečním středním a pravým časem.



Obrázek 7: Průběhy časových rovnic (různá metodika výpočtu)



Obrázek 8: Porovnání přesnosti časových rovnic (různá metodika výpočtu)

Na obrázku 7 jsou průběhy časových rovnic během roku dle různých výpočtů, na obrázku 8 jsou hodnoty vypočtené časové rovnice porovnány s tabulkovými hodnotami pro rok 2014, 8:00 místního času, 50° s. š., 14° v. d. Tabulkové hodnoty (považované za přesné) jsou převzaty z kalkulace provedené pomocí kalkulátoru na stránkách *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, americké federální laboratoře pro oblast obnovitelných zdrojů energie [10]. Výpočty jsou provedeny v přiloženém souboru „porovnani.xlsx“.

Jak je z grafů patrné, rozdíly jsou opravdu značné – rozdíl činí přes 0,2 hodiny, což jsou hodnoty velikostí blízkých přesným hodnotám časové rovnice. To jen potvrzuje výše uvedený fakt, že časová rovnice dle normy ČSN [6] může být užita pouze v rámci celého postupu výpočtu dle normy ČSN [6], nikoliv samostatně.

3.2 Přímá složka osvětlenosti

Při určování přímé složky horizontální osvětlenosti je třeba zohlednit různé stavy atmosféry. Sluneční záření je totiž dále zeslabováno při průchodu atmosférou. Pro popis tohoto zeslabení a pro výpočet přímé složky využijeme postup popsany docentem Darulou [2], který je zmíněný i v knize *Světelná technika* profesora Skokanského [11]:

$$E_{vz} = E_v \cdot \exp(-a_v \cdot m \cdot T_v) \text{ [lx]} \quad (18)$$

kde E_v je přepočtená sluneční konstanta [lx],

a_v je světelný extinkční činitel atmosféry [-],

m je relativní optická vzduchová tloušťka atmosféry [-],

T_v je světelný činitel zákalu atmosféry [-].

Relativní vzduchová tloušťka zohledňuje zakřivení Země a dopad paprsků při nízkých výškách Slunce. Vzorec z roku 1989 je použit nejen docenty Darulou a Kittlerem [2], [7], ale i doktorem Antónem [12] a má tvar:

$$m = \frac{1}{\sin \gamma_s + 0.050572 \cdot (\gamma_s + 6,07995^\circ)^{-1,6364}} \text{ [-]} \quad (19)$$

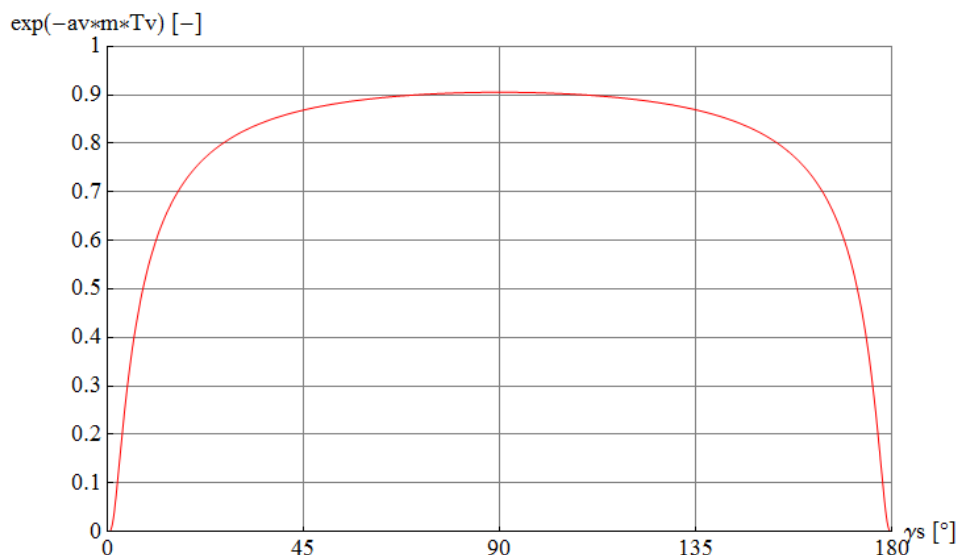
kde γ_s je výška Slunce nad horizontem [°].

Pro výpočet světelného extinkčního činitele a_v (vyjadřuje útlum světla v atmosféře) použijeme namísto vztahu použitého docentem Darulou [2], vztah publikovaný později doktorem Navvabem [13], o kterém se zmiňuje i docent Kittler [7]:

$$a_v = \frac{0.1}{1 + 0.0045 \cdot m} \text{ [-]} \quad (20)$$

kde m je relativní vzduchová tloušťka atmosféry [-].

Hodnoty světelného činitele zákalu T_v jsou zcela závislé na atmosférických podmínkách – na oblačnosti, počtu prachových částic a dalších. Pro další výpočty se dá využít hodnot světelného činitele zákalu určených z dlouhodobých měření a zaznamenaných pro standardizované oblohy CIE (viz další část práce).



Obrázek 9: Zeslabení světla v atmosféře v závislosti na výšce Slunce ($T_v = 1$)

Výpočet zeslabení slunečního světla v atmosféře a animace zeslabení v závislosti na světelném činiteli zákalu je v příloženém souboru „Tvmanipulate.nb“, na obrázku 9 je ukázán náhled.

3.3 Oblohová složka osvětlenosti

Oblohová složka horizontální osvětlenosti závisí téměř výhradně na oblačnosti oblohy a samozřejmě na přepočtené sluneční světelné konstantě. Oblohová složka se tedy vypočte:

$$E_{vd} = k_{vd} \cdot E_v \text{ [lx]} \quad (21)$$

kde k_{vd} je koeficient světelné difúznosti atmosféry [-],

E_v je sluneční světelná konstanta přepočtená pro horizontální rovinu [lx].

Koeficient světelné difúznosti závisí na aktuálním stavu atmosféry, jeho hodnoty jsou získávány měřením. Díky dlouhodobému měření se současným zapisováním stavu oblohy se daří určit jeho hodnoty pro standardizované oblohy CIE.

4. Oblohy CIE

Z důvodu značné závislosti denního světla na atmosférických podmínkách bylo nutné zavést jednotný popis situací na obloze. Tohoto úkolu se zhostila *Commission Internationale de l'Eclairage* (angl. *The International Commission on Illumination*, česky *Mezinárodní komise pro osvětlování*), se sídlem ve Vídni, známá pod zkratkou CIE. Ve druhé polovině 90. let 20. století a na počátku 21. století CIE vydala několik norem popisujících 15 standardních obloh (5 zatažených, 5 částečně oblačných a 5 jasných).

4.1 Typy obloh

Nejnovější a v současnosti platná norma pro standardizaci obloh „Spatial distribution of daylight -- CIE standard general sky“ byla vydaná v roce 2003 a v roce 2004 byla uznaná jako standard ISO (International Organization for Standardization). Tabulka obloh přímo z této normy [14] je uvedena jako tabulka č. 1, český překlad názvů obloh společně s dalšími parametry je v tabulkách 2 a 3:

Type	Grada- tion group	Indi- catix group	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	Description of luminance distribution
1	I	1	4,0	-0,70	0	-1,0	0	CIE Standard Overcast Sky , Steep luminance gradation towards zenith, azimuthal uniformity
2	I	2	4,0	-0,70	2	-1,5	0,15	Overcast, with steep luminance gradation and slight brightening towards the sun
3	II	1	1,1	-0,8	0	-1,0	0	Overcast, moderately graded with azimuthal uniformity
4	II	2	1,1	-0,8	2	-1,5	0,15	Overcast, moderately graded and slight brightening towards the sun
5	III	1	0	-1,0	0	-1,0	0	Sky of uniform luminance
6	III	2	0	-1,0	2	-1,5	0,15	Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, slight brightening towards the sun
7	III	3	0	-1,0	5	-2,5	0,30	Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, brighter circumsolar region
8	III	4	0	-1,0	10	-3,0	0,45	Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, distinct solar corona
9	IV	2	-1,0	-0,55	2	-1,5	0,15	Partly cloudy, with the obscured sun
10	IV	3	-1,0	-0,55	5	-2,5	0,30	Partly cloudy with brighter circumsolar region

11	IV	4	-1,0	-0,55	10	-3,0	0,45	White-blue sky with distinct solar corona
12	V	4	-1,0	-0,32	10	-3,0	0,45	CIE Standard Clear Sky, low luminance turbidity
13	V	5	-1,0	-0,32	16	-3,0	0,30	CIE Standard Clear Sky, polluted atmosphere
14	VI	5	-1,0	-0,15	16	-3,0	0,30	Cloudless turbid sky with broad solar corona
15	VI	6	-1,0	-0,15	24	-2,8	0,15	White-blue turbid sky with broad solar corona

Tabulka 1: CIE standardizované oblohy – parametry a , b , c , d , e

Koeficienty a , b , c , d , e jsou v další části práce využívány při určení rozložení jasů na konkrétní standardní obloze v daný časový moment. Při výpočtu se uplatňují koeficienty a , b při výpočtu gradační funkce a koeficienty a , c , d , e pro funkci indikatrix rozptylu.

Rozložení jasů se také dále využívá pro určení typu oblohy např. na základě fotografie oblohy objektivem typu „rybí oko“, kdy je specializovaným softwarem vyhodnocen jasový stav oblohy a tento je porovnán s vypočtenými jasy. Tomuto tématu se ale tato práce dále nevěnuje.

4.2 Světelná difúznost a činitel zákalu CIE obloh

Pro posouzení horizontální osvětlenosti při standardních oblohách CIE potřebujeme znát především rozptylové a zákalové vlastnosti atmosféry. Tyto vlastnosti vyjadřují dva parametry – koeficient světelné difúznosti k_{vd} , který ovlivňuje oblohovou složku, a světelný činitel zákalu T_v , který ovlivňuje výpočet přímé složky horizontální osvětlenosti. Oba parametry nelze zjistit teoreticky, stanovují se z dlouhodobých měření se současným zápisem stavů obloh při každém odečtu hodnot. Nejblíže České Republice je kvalitativně i kvantitativně vhodné měření prováděno na Slovensku v Bratislavě, využijeme tedy typické hodnoty zjištěné docentem Kittlerem a Darulou a publikované mj. docentem Darulou [2]. Hodnoty jsou zpracovány v následující tabulce současně s překladem popisu obloh do češtiny.

Typ	Označení	k_{vd}	T_v	Popis oblohy
1	I. 1	0,10	-	CIE standardní zatažená obloha , se strmou gradací a azimutovou rovnoměrností
2	I. 2	0,18	-	Zatažená se strmou gradací a lehkým zjasněním směrem k Slunci
3	II. 1	0,15	-	Zatažená, s mírnou gradací a azimutovou rovnoměrností
4	II. 2	0,22	-	Zatažená, s mírnou gradací a lehkým zjasněním směrem k Slunci
5	III. 1	0,20	-	Obloha s konstantním jasnem
6	III. 2	0,38	-	Částečně oblačná, bez gradace a s lehkým zjasněním směrem k Slunci
7	III. 3	0,42	12,0	Částečně oblačná, bez gradace a s jasnějšími místy okolo Slunce
8	III. 4	0,41	10,0	Částečně oblačná, bez gradace a s jasnou sluneční korónou
9	IV. 2	0,40	12,0	Částečně oblačná, se zastíněním Slunce
10	IV. 3	0,36	10,0	Částečně oblačná, s jasnějšími místy okolo Slunce
11	IV. 4	0,23	4,0	Modrobílá, s jasnou sluneční korónou
12	V. 4	0,10	2,5	CIE standardní jasná obloha, se slabým zákalem
13	V. 5	0,28	4,5	CIE standardní jasná obloha, znečištěná atmosféra
14	VI. 5	0,28	5,0	Jasná, se zákalem a širokou sluneční korónou
15	VI. 6	0,30	4,0	Modrobílá, se zákalem a širokou sluneční korónou

Tabulka 2: CIE standardizované oblohy – parametry k_{vd} a T_v

U obloh typů 1 – 6 se uvažuje, že jsou úplně zamračené bez vlivu přímé složky osvětlenosti.

4.3 Parametry obloh pro výpočet jasu v absolutních jednotkách

Z důvodu výpočtu oblohové složky osvětlenosti vertikální roviny je nutné vyjádřit v další části práce jas elementu oblohy relativně i v absolutních hodnotách. Výpočet relativního rozložení jasů se řídí standardem ISO [14] a využívá se k němu parametrů uvedených v tabulce 2. Pro výpočet jasů elementů oblohy v absolutních jednotkách (který není ve standardu ISO [14] obsažen) je využit postup docenta Daruly z jeho habilitační práce [2], kde uvádí následující parametry obloh:

Typ	Označení	k_{vd}	T_v	$A1$	$A2$	B	C	D	E
1	I. 1	0,10	-	-	-	54,63	1,00	0,00	0,00
2	I. 2	0,18	-	-	-	12,35	3,68	0,59	50,47
3	II. 1	0,15	-	-	-	48,30	1,00	0,00	0,00
4	II. 2	0,22	-	-	-	12,23	3,57	0,57	44,27
5	III. 1	0,20	-	-	-	42,59	1,00	0,00	0,00
6	III. 2	0,38	-	-	-	11,84	3,53	0,55	38,78
7	III. 3	0,42	12,0	0,957	1,790	21,72	4,52	0,63	34,56
8	III. 4	0,41	10,0	0,830	2,030	29,35	4,94	0,70	30,41
9	IV. 2	0,40	12,0	0,600	1,500	10,34	3,45	0,50	27,47
10	IV. 3	0,36	10,0	0,567	2,610	18,41	4,27	0,63	24,04
11	IV. 4	0,23	4,0	1,440	- 0,750	24,41	4,60	0,72	20,76
12	V. 4	0,10	2,5	1,036	0,710	23,00	4,43	0,74	18,52
13	V. 5	0,28	4,5	1,244	- 0,840	27,45	4,61	0,76	16,59
14	VI. 5	0,28	5,0	0,881	0,453	25,54	4,40	0,79	14,56
15	VI. 6	0,30	4,0	0,418	1,950	28,08	4,13	0,79	13,00

Tabulka 3: CIE standardizované oblohy – parametry $A1$, $A2$, B , C , D , E

U obloh číslo 1 – 6 se opět uvažuje nulový vliv přímé složky osvětlenosti a z něho vyplývající rozdílný postup výpočtu. Výpočet rozložení jasů jednotlivých typů obloh je zpracován v další části práce.

5. Osvětlenost vertikální roviny

Prvním cílem této práce bylo určení horizontální osvětlenosti v průběhu roku pro různé polohy a typy obloh. Pro využití vypočtených hodnot je ale třeba převést je na vertikální rovinu, reprezentující stěnu domu. Tomuto úkolu je věnována následující část práce. Postup výpočtu je založený, obdobně jako u výpočtu horizontální osvětlenosti, na sečtení přímé a oblohové složky osvětlenosti:

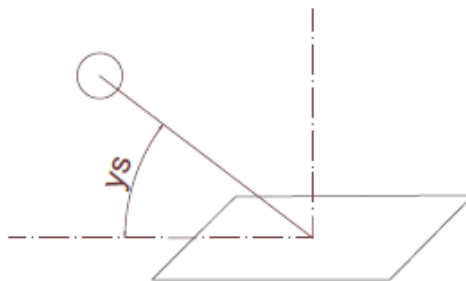
$$E_V = E_{vzV} + E_{vdV} \text{ [lx]} \quad (22)$$

kde E_{vzV} je přímá složka osvětlenosti vertikální roviny [lx],

E_{vdV} je oblohová složka osvětlenosti vertikální roviny [lx].

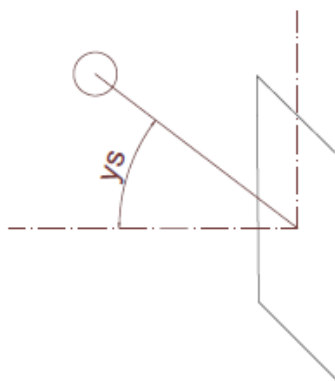
5.1 Přepočet sluneční světelné konstanty pro vertikální rovinu

Stejně jako u výpočtu horizontální osvětlenosti, je třeba vyjít z přepočtu sluneční světelné konstanty. Tentokrát ji ale namísto pro horizontální rovinu vztažena na rovinu vertikální. Přepočet vychází z následujícího obrázku:



Obrázek 10: Přepočet sluneční světelné konstanty – horizontální rovina

Na obrázku je vidět situace při přepočtu sluneční světelné konstanty vztažené na horizontální rovinu, v tomto případě je přepočtená hodnota závislá na $\sin$ úhlu γ_s (výška slunce nad obzorem). Situace pro vertikální rovinu vypadá takto:



Obrázek 11: Přepočet sluneční světelné konstanty – vertikální rovina

Z obrázku 11 lze odvodit vztah pro přepočet sluneční světelné konstanty vztažené na vertikální rovinu:

$$E_{vV} = E_{v0} \cdot \epsilon \cdot \sin(\gamma_s - 90^\circ) = E_{v0} \cdot \epsilon \cdot \cos \gamma_s \text{ [lx]} \quad (23)$$

kde $E_{v0} = 133\,334 \text{ lx}$ je sluneční světelná konstanta,

ϵ je korekční činitel excentricity [-],

γ_s je výška Slunce nad horizontem [°].

5.2 Výpočty shodné s horizontální osvětleností

Postupy výpočtů některých parametrů a koeficientů osvětlenosti vertikální roviny jsou v mnoha případech shodné s postupy pro horizontální osvětlenost. Proto nebude jejich postup uváděn znovu. Toto se týká výpočtu korekčního činitele excentricity, výšky Slunce nad horizontem (včetně deklinace Slunce, časové rovnice, pravého slunečního času, apod.) a dále výpočtů relativní vzduchové tloušťky atmosféry a světelného extinkčního činitele. Rovněž parametry jednotlivých typů obloh se nemění.

5.3 Přímá složka osvětlenosti vertikální roviny

Výpočet přímé složky osvětlenosti vertikální roviny je mírně obtížnější úkol než v případě horizontální roviny. Na rozdíl od horizontální osvětlenosti, která je závislá pouze na vertikální poloze Slunce (výška Slunce nad obzorem), je třeba při výpočtu osvětlenosti vertikální roviny uvažovat i polohu Slunce horizontální (azimut).

Při odvození vyjdeme z rovnice přímé složky horizontální osvětlenosti. Ta bude platná (se sluneční světelnou konstantou přepočtenou pro vertikální rovinu) v případě, že azimut Slunce a azimut vertikální roviny budou shodný. Pokud bude azimut

Slunce ležet v rozmezí $-90^\circ - +90^\circ$ od azimutu roviny, dojde k zeslabení přímé složky osvětlenosti. Pokud bude úhel mezi Sluncem a rovinou ležet mimo tuto oblast, nebude přímé sluneční záření na vertikální rovinu dopadat, tzn., že přímá složka osvětlenosti bude nulová a rovina bude ozářena pouze oblohovou složkou osvětlenosti.

Klíčový je rozdíl úhlů A_S a A_V (dále označený ΔA). Je třeba vyjádřit absolutní velikost úhlu mezi azimuty Slunce a vertikální roviny:

1) Pokud $A_S \leq A_V$, tak platí:

$$\Delta A_0 = A_V - A_S [^\circ] \quad (24)$$

2) Pokud $A_S > A_V$, tak platí:

$$\Delta A_0 = A_S - A_V [^\circ] \quad (25)$$

3) Pokud výsledný rozdíl $\Delta A_0 > 180^\circ$, tak platí:

$$\Delta A = 360 - \Delta A_0 [^\circ] \quad (26)$$

4) Pokud výsledný rozdíl $\Delta A_0 \leq 180^\circ$, tak platí:

$$\Delta A = \Delta A_0 [^\circ] \quad (27)$$

kde A_S je azimut Slunce $[^\circ]$,

A_V je azimut vertikální roviny $[^\circ]$.

Rozdíl azimutů ΔA udává odklon úhlu dopadu slunečních paprsků od směru kolmého na stěnu (v absolutní hodnotě). Toho využijeme a vyčíslíme přímou osvětlenost vertikální roviny dle kosinového zákona.

Přímá osvětlenost vertikální roviny pro $\Delta A < 90^\circ$:

$$E_{vzv} = E_{vV} \cdot \exp(-a_v \cdot m \cdot T_v) \cdot \cos \Delta A [lx] \quad (28)$$

kde E_{vV} je sluneční světelná konstanta přepočtená pro vertikální rovinu $[lx]$,

a_v je světelný extinkční činitel atmosféry $[-]$,

m je relativní optická vzduchová tloušťka atmosféry $[-]$,

T_v je světelný činitel zákalu atmosféry $[-]$,

ΔA je absolutní hodnota úhlu mezi azimutem Slunce a azimutem normály vertikální roviny $[^\circ]$.

Pro $\Delta A > 90^\circ$ se přímá složka osvětlenosti neprojeví, tudíž:

$$E_{vzV} = 0 [lx] \quad (29)$$

5.3.1 Azimut Slunce

Horizontální poloha Slunce se popisuje pomocí azimutu. V běžné praxi (např. kartografie, navigace) je azimut definován jako úhel mezi severem a příslušným směrem, přičemž úhel se měří od pravého severu po směru hodinových ručiček. Pravému severu přísluší hodnota 0° a 360° stupňů. V normě ČSN [6] je výpočet azimutu proveden pro rozsah hodnot $-180^\circ - +180^\circ$ (namísto $0^\circ - 360^\circ$), přičemž nulová hodnota přísluší jihu. Norma [6] uvádí pro výpočet azimutu Slunce několik rovnocenných vztahů, z nichž využijeme následující:

$$A_{SN} = \cos^{-1} \left(\frac{\sin \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \tau - \cos \varphi \cdot \sin \delta}{\cos \gamma_s} \right) [^\circ] \quad (30)$$

kde φ je zeměpisná šířka $[^\circ]$,
 δ je deklinace Slunce $[^\circ]$,
 τ je hodinový úhel Slunce [hod],
 γ_s je výška Slunce nad horizontem $[^\circ]$.

Této rovnici vyhovují dvě různé hodnoty úhlu A_{SN} , lišící se znaménkem. Znaménko se stanoví podle τ . Pro hodnoty $\tau < 0$ (dopolední hodiny) se uvažuje záporná hodnota azimutu, pro $\tau > 0$ (odpolední hodiny) hodnota kladná. Z důvodu snazšího praktického využití následně přepočteme získané hodnoty na hodnoty v rozsahu $0^\circ - 360^\circ$ dle následujícího vztahu:

$$A_S = 180^\circ + A_{SN} [^\circ] \quad (31)$$

kde A_{SN} je hodnota azimutu spočtená dle vztahu č. 30, včetně respektování znaménka $[^\circ]$.

5.3.2 Azimut vertikální roviny

Azimutem vertikální roviny rozumíme azimut její normály. Jelikož v našem případě vertikální rovina reprezentuje stěnu budovy či objektu, přísluší se na tomto místě zmínit postupy pro určení její orientace. Orientace objektů se nejčastěji zjišťuje z map. Problémem tohoto odečtu je tzv. meridiánová konvergence – úhel mezi svislými souřadnicovými čarami mapové sítě a pravým severem. U některých map může být

meridiánová konvergence uvedena, ale ve většině případů se využívá souřadnicového systému jednotné trigonometrické sítě katastrální (S-JTSK): Přibližný výpočet meridiánové konvergence v této síti uvádí norma ČSN 73 4301 [15]:

$$C = \frac{24^{\circ}50' - \lambda}{1,34} [^{\circ}] \quad (32)$$

kde λ je zeměpisná délka [$^{\circ}$].

Vypočtený úhel C se nanese ve směru hodinových ručiček od svislých čar souřadnicového systému, čímž se určí pravý sever (tj. severní směr, od kterého se následně počítá azimut). Údaj o orientaci objektu si také lze vyžádat od příslušného střediska geodézie či kartografie.

5.4 Oblohová složka osvětlenosti vertikální roviny

Určení příspěvku oblohové složky osvětlenosti vertikální roviny je obtížné z několika důvodů. Na rozdíl od roviny horizontální je třeba respektovat azimut vertikální roviny a především určit rozložení jasů na obloze v závislosti na poloze Slunce. Se znalostí velikosti jasu elementu oblohy v absolutních jednotkách je třeba rozdělit oblohu na elementy tak, aby každý element mohl být chápán jako bodový, nikoliv plošný zdroj. Výsledná osvětlenost se spočte jako součet příspěvků od všech takto vytvořených elementů, tj. bodových zdrojů. Odvození osvětlenosti vychází ze dvou elementárních vztahů pro světelně – technické výpočty, uvedené například v knihách zabývajících se světelnou technikou všeobecně [11], [16], [17], a předpokladu oblohy jako jednotkové polokoule:

$$L_{\alpha} = \frac{I_{\alpha}}{S \cdot \cos \alpha} [cd \cdot m^{-2}] \quad (33)$$

kde L_{α} je jas zdroje,

I_{α} je svítivost zdroje ve směru osy svazku [cd],

S je vyzařující plocha [m^2],

α je úhel mezi normálou plochy S a osou svazku paprsků [$^{\circ}$].

$$E = \frac{I \cdot \cos \beta}{l^2} [lx] \quad (34)$$

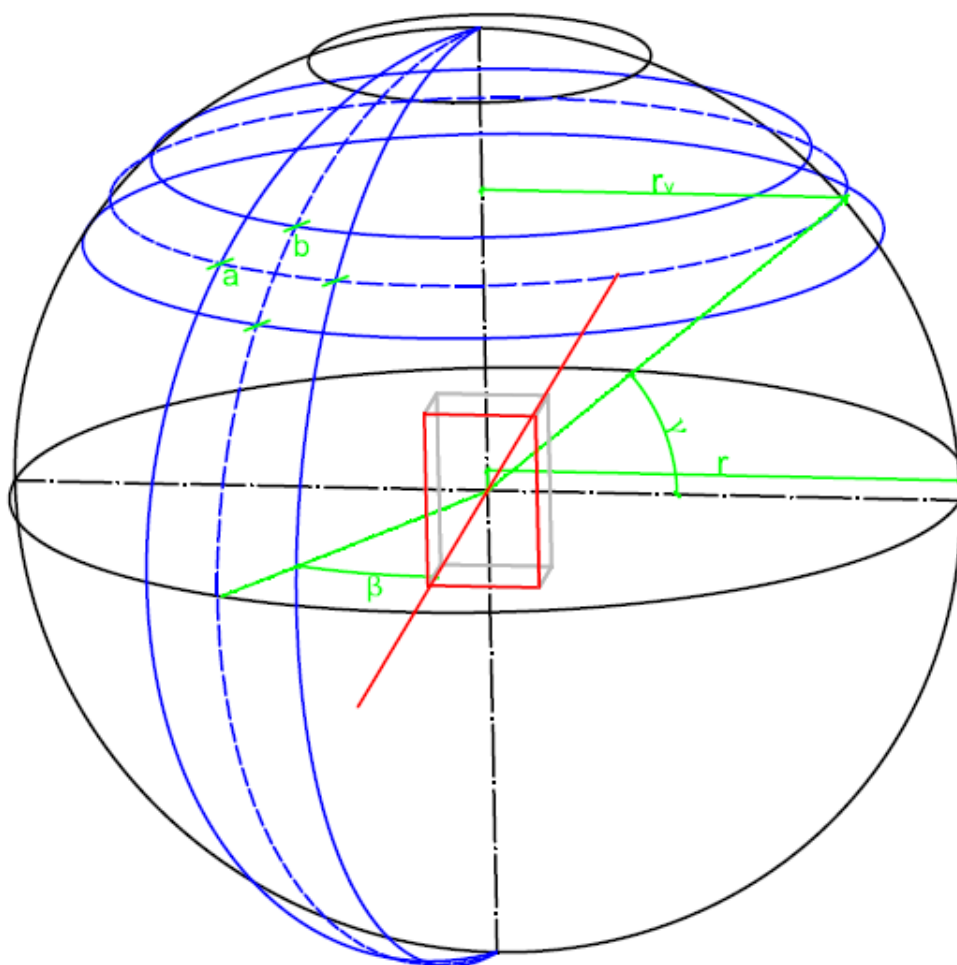
kde E je osvětlenost [lx],

I je svítivost zdroje ve směru pozorovatele [cd],

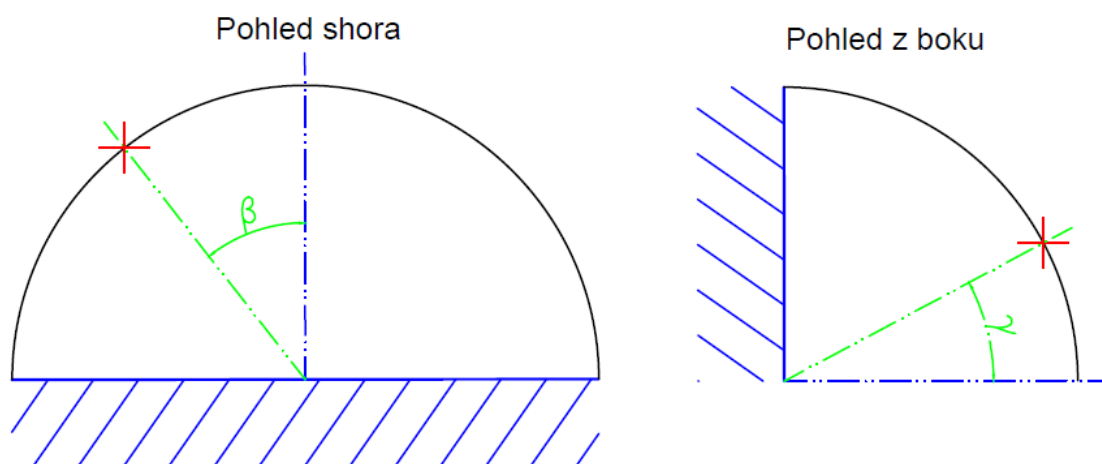
l je vzdálenost zdroje [m],

β je úhel mezi normálou plochy pozorovatele a paprskem [°].

V našem případě uvažujeme, že vertikální rovina rozdělí oblohu (polokoule) na poloviny, tudíž část oblohy, od které je třeba uvažovat příspěvky osvětlenosti, má tvar čtvrtiny jednotkové koule s kontrolním bodem umístěným ve středu této koule. Pro určení polohy elementu využijeme dva úhly – úhel β mezi normálou vertikální roviny (vstupní veličina) a azimutem oblohového elementu, a úhel γ vyjadřující výšku elementu nad obzorem. Tyto úhly jsou zobrazeny na následujícím obrázku:



Obrázek 12: Poloha a velikost elementu oblohy – celková situace



Obrázek 13: Poloha a velikost elementu oblohy – pohled shora a z boku

Jak vyplývá z obrázků čísel 12 a 13, velikosti úhlů β a γ budou ležet v rozsahu: $\beta \in (-90^\circ, 90^\circ)$, $\gamma \in (0^\circ, 90^\circ)$.

Jelikož dokážeme spočítat jas oblohového elementu a vhodným rozdělením oblohy i velikost elementu, spočteme svítivost elementu jako bodového zdroje dle použití vztahu č. 33.

$$L = \frac{I}{S \cdot \cos \alpha} \Rightarrow I = L \cdot S \cdot \cos \alpha \text{ [cd]} \quad (35)$$

Při uvažování oblohy jako části koule a poloze kontrolního bodu ve středu této koule je úhel mezi normálou elementů a uvažovaným směrem svítivosti zdroje nulový, tudíž vztah dostane tvar:

$$I = L \cdot S \cdot \cos 0 = L \cdot S = I_0 \text{ [cd]} \quad (36)$$

Výsledek dosadíme do vzorce č. 34, vzdálenost elementu je rovna poloměru koule (tj. jedné), zahrneme úhly odklonu paprsku od normály vertikální roviny (dle kosinového zákona):

$$E = \frac{L \cdot S \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma}{r^2} \text{ [lx]} \quad (37)$$

Plocha uvažované části oblohy se spočte jako čtvrtina povrchu koule:

$$S_0 = \frac{1}{4} \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 = \pi \cdot r^2 \text{ [m}^2\text{]} \quad (38)$$

V další úvaze již budeme uvažovat nutnost sečtení příspěvků jednotlivých elementů. Plochu každého elementu můžeme vyjádřit jako určitou část povrchu uvažované oblohy, příspěvek jednoho elementu tedy bude:

$$E_i = \frac{L_i \cdot x_i \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \cos \beta_i \cdot \cos \gamma_i}{r^2} [lx] \quad (39)$$

- kde L_i je jas oblohového elementu [$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$],
 i je pořadové číslo elementu [-],
 x_i je relativní velikost elementu [-],
 β_i je úhel mezi azimutem vertikální roviny a azimutem elementu [$^\circ$],
 γ_i je výška elementu nad obzorem [$^\circ$],
 r je „výška“ oblohy, a zároveň vzdálenost mezi elementem (bodovým zdrojem) a kontrolním bodem ve středu koule [m].

Vykrácením vztahu č. 39 dostáváme vztah:

$$E_i = L_i \cdot x_i \cdot \pi \cdot \cos \beta_i \cdot \cos \gamma_i [lx] \quad (40)$$

Celkovou oblohovou část osvětlenosti získáme sečtením všech elementů:

$$E_{vdV} = \sum_{i=1}^n E_i = \pi \cdot \sum_{i=1}^n L_i \cdot x_i \cdot \cos \beta_i \cdot \cos \gamma_i [lx] \quad (41)$$

Následně je třeba určit rozdělení oblohy na elementy, a z toho vyplývající výpočet relativní velikosti elementu. Pro potřeby výpočtu je dostatečně přesné rozdělit oblohu na elementy po stupních (výsledná osvětlenost se oproti použití kroku $0,1^\circ$ liší o desetiny luxu) – tj. 180 dílů horizontálně a 90 dílů vertikálně. Tímto rozdělením dostaneme 16 200 elementů s rozdílnou velikostí.

Vztahy pro velikost jednotlivých elementů odvodíme z obrázku číslo 18, na němž je schematický náčrt oblohového elementu. Oblohu uvažujeme jako jednotkovou polokouli. Zvolený počet elementů umožňuje při výpočtu plochy elementu zanedbat zaoblení a plochu počítat jako plochu obdélníku o stranách a a b :

$$S_i = a_i \cdot b_i [m^2] \quad (42)$$

V případě kdy $\gamma = 0$, je délka strany a závislá pouze na počtu dílů, na které je obloha rozdělena horizontálně (v našem případě 180) a vypočte se jako část obvodu poloviny jednotkové kružnice:

$$a = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r = \frac{\pi \cdot r}{180} \xrightarrow{r=1} a = \frac{\pi}{180} [m] \quad (43)$$

V ostatních případech je třeba korigovat poloměr r na výšku elementu γ tak, aby byl vždy dělen obvod ve výšce elementu. Korigovaný poloměr r_v spočteme:

$$r_v = r \cdot \sin(90^\circ - \gamma) = r \cdot \cos \gamma [m] \quad (44)$$

Dosazením vztahu č. 44 do vztahu č. 43 dostáváme:

$$a_i = \frac{\pi \cdot r_v}{180} = \frac{\pi \cdot r \cdot \cos \gamma_i}{180} \xrightarrow{r=1} a_i = \frac{\pi}{180} \cdot \cos \gamma_i [m] \quad (45)$$

Výpočet strany b je značně jednodušší, závisí pouze na počtu dílů, na které je obloha rozdělena vertikálně (v našem případě 90), a vypočte se jako část obvodu čtvrtiny jednotkové kružnice:

$$b_i = b = \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r = \frac{\pi \cdot r}{2} = \frac{\pi \cdot r}{90} \xrightarrow{r=1} b = \frac{\pi}{180} [m] \quad (46)$$

Odvozené délky stran dosadíme do vzorce č. 42:

$$S_i = a_i \cdot b = \frac{\pi}{180} \cdot \cos \gamma_i \cdot \frac{\pi}{180} = \left(\frac{\pi}{180}\right)^2 \cdot \cos \gamma_i [m^2] \quad (47)$$

Relativní velikost uvažovaného elementu je poměrem plochy elementu k ploše uvažované oblohy:

$$x_i = \frac{S_i}{S_o} = \frac{\left(\frac{\pi}{180}\right)^2 \cdot \cos \gamma_i}{\pi \cdot r^2} \xrightarrow{r=1} x_i = \frac{\pi}{180^2} \cdot \cos \gamma_i [-] \quad (48)$$

Pokud sečteme všechny relativní velikosti elementů, dostáváme plochu celé uvažované oblohy (respektive plochu jí velmi blízkou, určitá chyba vznikne aproximací při výpočtu plochy elementu):

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1 \quad (49)$$

Posledním krokem je dosazení relativní velikosti elementu (rovnice č. 48) do vztahu č. 41:

$$E_{vdv} = \left(\frac{\pi}{180}\right)^2 \cdot \sum_{i=1}^n L_i \cdot \cos \beta_i \cdot \cos^2 \gamma_i [lx] \quad (50)$$

Pro kontrolu odvodíme vztah pro osvětlenost i ze vztahu:

$$dE_N = L \cdot d\Omega \text{ [lx]} \quad (51)$$

Prostorový úhel na povrchu jednotkové koule lze vyjádřit vztahem užitým profesorem Habelem v knize Osvětlování [17]:

$$d\Omega = \sin Z \cdot d\gamma \cdot d\beta = \cos \gamma \cdot d\gamma \cdot d\beta \text{ [sr]} \quad (52)$$

V případě použití stejného rozdělení oblohy na elementy (velikosti elementů dle vztahů č. 45 a 46), upravíme vztah č. 52 do podoby:

$$d\Omega_i = \cos \gamma_i \cdot a_i \cdot b = \left(\frac{\pi}{180}\right)^2 \cdot \cos^2 \gamma_i \text{ [sr]} \quad (53)$$

Odvozený vztah dosadíme do vzorce č. 51, upraveného pro jeden element, vynásobíme cosinem úhlu β (dle kosinového zákona), který určuje odklon od normály v horizontálním směru:

$$E_i = L_i \cdot \Omega_i = \left(\frac{\pi}{180}\right)^2 \cdot L_i \cdot \cos \beta_i \cdot \cos^2 \gamma_i \text{ [lx]} \quad (54)$$

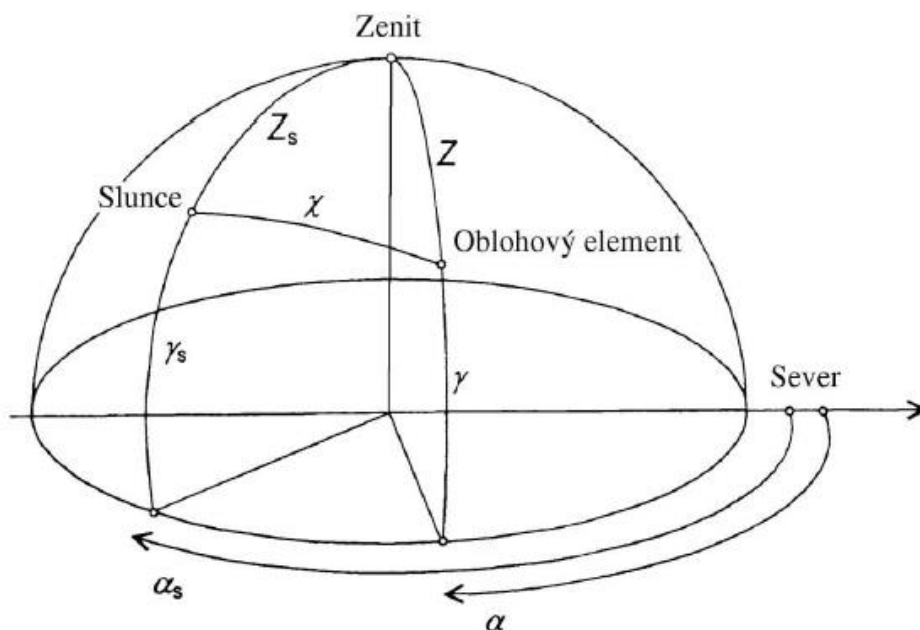
Nakonec příspěvek jednotlivých elementů sečteme. Dostáváme stejný výsledek jako v předchozím odvození (rovnice č. 50):

$$E_{vdv} = \left(\frac{\pi}{180}\right)^2 \cdot \sum_{i=1}^n L_i \cdot \cos \beta_i \cdot \cos^2 \gamma_i \text{ [lx]} \quad (55)$$

Samotné provedení výpočtu osvětlenosti ručně je prakticky neproveditelné, tudíž musí být provedeno pomocí výpočetní techniky. Realizace výpočtu je, jako většina dalších, provedena pomocí funkce vytvořené v programu Microsoft Excel 2013 v přiloženém souboru „Daylight_and_Illuminance.xlsx“.

5.4.1 Jas oblohového elementu

Jas oblohového elementu spočteme pomocí vztahů pro výpočet relativního rozložení jasů na obloze, uvedeného ve standardu CIE [14], vycházející z následujícího obrázku [5], [14]:



Obrázek 14: Výpočet rozložení jasů na obloze – poloha Slunce a elementu oblohy

Koncepce výpočtu vychází z následujícího vztahu, popisujícího relativní jas elementu oblohy k jasů v zenitu:

$$\frac{L_a}{L_{vz}} = \frac{f(\chi) \cdot \varphi(Z)}{f(Z_s) \cdot \varphi(0)} [-] \quad (56)$$

Přičemž pro výpočet jasů oblohového elementu v absolutních jednotkách upravíme vztah do podoby:

$$L_a = L_{vz} \cdot \frac{f(\chi) \cdot \varphi(Z)}{f(Z_s) \cdot \varphi(0)} [cd \cdot m^{-2}] \quad (57)$$

kde L_a je jas oblohového elementu [cd/m^2],

L_{vz} je jas zenitu oblohy [cd/m^2],

$f(\chi)$ je relativní indikatrix rozptylu pro element oblohy [-],

$f(Z_s)$ je relativní indikatrix rozptylu pro zenitní úhel Slunce [-],

$\varphi(Z)$ je gradační funkce pro element oblohy [-],

$\varphi(0)$ je gradační funkce pro zenit [-].

5.4.1.1 Zenitní úhel, úhlová vzdálenost Slunce a elementu

Zenitní úhel Slunce a elementu se vypočte z jejich výšky nad obzorem:

$$Z = (90 - \gamma) \cdot \frac{\pi}{180} \text{ [rad]} \quad (58)$$

$$Z_S = (90 - \gamma_S) \cdot \frac{\pi}{180} \text{ [rad]} \quad (59)$$

kde γ je výška elementu oblohy na obzorem [°],

γ_S je výška Slunce nad obzorem [°].

Úhlová vzdálenost Slunce a elementu oblohy se spočte dle standardu CIE [14]:

$$\chi = \cos^{-1}(\cos Z_S \cdot \cos Z + \sin Z_S \cdot \sin Z \cdot \cos(|\alpha - \alpha_S|)) \text{ [rad]} \quad (60)$$

kde Z je zenitní úhel elementu oblohy [rad],

Z_S je zenitní úhel Slunce [rad],

$|\alpha - \alpha_S|$ je velikost úhlu mezi azimutem elementu a azimutem Sluncem [rad].

5.4.1.2 Indikatrix rozptylu pro element oblohy

Funkce slouží k určení relativního jasu oblohového elementu v závislosti na jeho úhlové vzdálenosti od Slunce:

$$f(\chi) = 1 + c \cdot \left(\exp(d \cdot \chi) - \exp\left(d \cdot \frac{\pi}{2}\right) \right) + e \cdot \cos^2 \chi \text{ [-]} \quad (61)$$

kde χ je úhlová vzdálenost elementu oblohy a Slunce [rad],

c, d, e jsou parametry typů obloh dle tabulky č. 1 [-].

5.4.1.3 Indikatrix rozptylu pro zenitní úhel Slunce

Funkce slouží k určení relativního jasu zenitu oblohy ze zadaného zenitního úhlu Slunce:

$$f(Z_S) = 1 + c \cdot \left(\exp(d \cdot Z_S) - \exp\left(d \cdot \frac{\pi}{2}\right) \right) + e \cdot \cos^2 Z_S \text{ [-]} \quad (62)$$

kde Z_S je zenitní úhel Slunce [rad],

c, d, e jsou parametry typové oblohy dle tabulky č. 1 [-].

5.4.1.4 Gradační funkce

Gradační funkce rozptýleného světla se vztahuje k relativnímu jasů elementu a jeho zenitního úhlu, funkce platí za předpokladu $0 \leq Z \leq \pi/2$:

$$\varphi(Z) = 1 + a \cdot \exp\left(\frac{b}{\cos Z}\right) [-] \quad (63)$$

kde Z je zenitní úhel elementu oblohy [rad],

a, b jsou parametry typové oblohy dle tabulky č. 1 [-].

Dosažením $Z = 0$, dostáváme gradační funkci zenitu oblohy:

$$\varphi(0) = 1 + a \cdot \exp(b) [-] \quad (64)$$

kde a, b jsou parametry typové oblohy dle tabulky č. 1 [-].

5.4.1.5 Jas zenitu oblohy

Pro určení příspěvku oblohové složky osvětlenosti je třeba znát nejen relativní rozložení jasů, ale je třeba určit jas oblohového elementu v absolutních hodnotách. Tento výpočet již není obsažen ve standardu CIE [14], ale zabývá se jím docent Darula ve své habilitační práci [2]. Pro výpočet absolutních hodnot jasů uvádí následující postup platný pro výšku Slunce nad horizontem do 75° :

1) Pro oblohy typu 1 – 6:

$$L_{vz} = k_{vd} \cdot \left(\frac{B \cdot (\sin \gamma_s)^C}{(\cos \gamma_s)^D} + E \cdot \sin \gamma_s \right) [kcd/m^2] \quad (65)$$

kde γ_s je výška Slunce nad obzorem [$^\circ$],

k_{vd} je koeficient světelné difúznosti atmosféry [-],

B, C, D, E jsou parametry oblohy dle tabulky č. 3 [-].

Tyto typy obloh jsou považovány za úplně zamračené, bez vlivu přímého slunečního světla na rozložení jasů oblohy.

2) Pro oblohy 7 – 15:

$$L_{vz} = (A1 \cdot T_v + A2) \cdot \sin \gamma_s + \frac{0,7 \cdot (T_v + 1) \cdot (\sin \gamma_s)^C}{(\cos \gamma_s)^D} + 0,04 \cdot T_v \text{ [kcd/m}^2\text{]} \quad (66)$$

kde γ_s je výška Slunce nad obzorem [°],

T_v je světelný činitel zákalu atmosféry [-],

$A1, A2, C, D$ jsou parametry oblohy dle tabulky č. 3 [-].

Při výpočtu jas elementu oblohy je jas zenitu oblohy převeden na kandely na m² (tj. vynásoben tisícem) tak, aby výsledný jas elementu vyšel v základních fotometrických jednotkách a nemusel být pro další výpočty znovu převáděn.

6. Zpracování a zobrazení dat

Výpočty polohy Slunce na obloze, osvětleností horizontální a vertikální roviny a atmosférických podmínek patří mezi složité a obtížně realizovatelné pouze pomocí kalkulačky. Z tohoto důvodu je vhodné provádět je za pomoci výpočetní techniky, v konkrétním prostředí. Pro výpočty bylo zvoleno prostředí programu Microsoft Excel 2013, umožňující nejen samotné výpočty pomocí zadání vzorců a využití integrovaných funkcí, ale i tvorbu nových funkcí pomocí maker v programovacím jazyce Visual Basic. Vytvoření těchto funkcí výrazně urychlí výpočty a prostředí Excelu, konkrétně možnosti tvorby grafů, umožní další zobrazení a prezentaci vypočtených dat.

V následující části práce je uvedena dokumentace vytvořených funkcí, a poté zobrazeny příklady vypočtených dat a průběhů.

6.1 Dokumentace vytvořených funkcí

Všechny zde uvedené funkce jsou připraveny k použití v přiloženém souboru „Daylight and illuminance.xlsx“. Podmínkou jejich spuštění je povolit spuštění maker při otevření programu. V následující dokumentaci jsou vysvětleny vstupní parametry, včetně jejich rozměrů, poté následuje popis samotných funkcí, pro přehlednost rozdělený do několika kategorií. Popis vstupů a výstupu včetně jejich rozměrů je navíc uveden u každé funkce přímo ve zdrojovém kódu formou komentáře.

6.1.1 Vstupní parametry

V následující tabulce je seznam všech použitých vstupních parametrů, které se později vyskytují jednotlivě či ve skupinách u jednotlivých funkcí.

<i>Název parametru</i>	<i>Význam a popis parametru</i>	<i>Jednotka</i>
DD	Pořadové číslo dne v měsíci	-
MM	Pořadové číslo měsíce v roce	-
Local_time	Místní čas	hod
Latitude	Zeměpisná šířka	°
Longitude	Zeměpisná délka	°
Longitude_of_Time_Zone	Zeměpisná délka příslušného časového pásma	°
CIE_Type_of_Sky	Pořadové číslo typu standardizované oblohy CIE	-
Azimuth_of_Wall	Úhel (azimut) mezi severem a normálou vertikální roviny	°
Element_Height	Výška elementu oblohy nad obzorem	°
Element_Azimuth	Úhel (azimut) mezi severem a elementem oblohy	°

Tabulka 4: Význam a rozměr vstupních parametrů funkcí

6.1.2 Funkce pro výpočet polohy Slunce

V následující tabulce je uveden seznam, popis a jednotka výstupu funkcí vytvořených pro výpočet polohy Slunce na obloze a výpočty s tím související.

Název funkce	Význam a popis výstupu funkce	Jednotka
DayNumber	Pořadové číslo dne v roce	-
Excentricity	Korekční činitel excentricity	-
Declination	Deklinace Slunce (dle normy ČSN [12])	°
EqOfTime	Časová rovnice (dle normy ČSN [12])	hod
TrueSolarTime	Pravý sluneční čas	hod
SunHeight	Výška Slunce nad obzorem	°
AzimuthOfSun	Úhel (azimut) mezi severem a polohou Slunce	°
SunriseAzimuth	Úhel mezi severem a místem východu Slunce (tj. azimut východu Slunce)	°
SunsetAzimuth	Úhel mezi severem a místem východu Slunce (tj. azimut západu Slunce)	°

Tabulka 5: Funkce pro výpočet polohy Slunce

6.1.3 Funkce pro zjištění parametrů oblohy

V následující tabulce je uveden seznam, popis a jednotka výstupu funkcí vytvořených pro zjištění parametrů jednotlivých standardizovaných obloh CIE.

Název funkce	Význam a popis výstupu funkce	Jednotka
GetTv	Světelný činitel zákalu oblohy	-
GetKvd	Koeficient světelné difúznosti oblohy	-
GetRelA	Parametr <i>a</i> pro výpočet relativního rozložení jasů (dle tabulky číslo 1)	-
GetRelB	Parametr <i>b</i> pro výpočet relativního rozložení jasů (dle tabulky číslo 1)	-
GetRelC	Parametr <i>c</i> pro výpočet relativního rozložení jasů (dle tabulky číslo 1)	-
GetRelD	Parametr <i>d</i> pro výpočet relativního rozložení jasů (dle tabulky číslo 1)	-
GetRelE	Parametr <i>e</i> pro výpočet relativního rozložení jasů (dle tabulky číslo 1)	-
GetAbsA1	Parametr <i>A1</i> pro výpočet jasů v absolutních jednotkách (dle tabulky číslo 3)	-
GetAbsA2	Parametr <i>A2</i> pro výpočet jasů v absolutních jednotkách (dle tabulky číslo 3)	-
GetAbsB	Parametr <i>B</i> pro výpočet jasů v absolutních jednotkách (dle tabulky číslo 3)	-
GetAbsC	Parametr <i>C</i> pro výpočet jasů v absolutních jednotkách (dle tabulky číslo 3)	-
GetAbsD	Parametr <i>D</i> pro výpočet jasů v absolutních jednotkách (dle tabulky číslo 3)	-
GetAbsE	Parametr <i>E</i> pro výpočet jasů v absolutních jednotkách (dle tabulky číslo 3)	-

Tabulka 6: Funkce pro zjištění parametrů oblohy

6.1.4 Funkce pro výpočet horizontální osvětlenosti

V následující tabulce je uveden seznam, popis a jednotka výstupu funkcí vytvořených pro výpočet horizontální osvětlenosti a výpočty s tím spojené.

Název funkce	Význam a popis výstupu funkce	Jednotka
SolarLuminousConstant	Sluneční světelná konstanta přepočtená na horizontální rovinu	lx
RelativeAirMass	Relativní vzduchová tloušťka atmosféry	-
LuminousExtinctionCoefficient	Světelný extinkční činitel atmosféry	-
DirectHorizontalIlluminance	Přímá složka horizontální osvětlenosti	lx
DiffuseHorizontalIlluminance	Oblohová složka horizontální osvětlenosti	lx
HorizontalIlluminance	Horizontální osvětlenost	lx

Tabulka 7: Funkce pro výpočet horizontální osvětlenosti

6.1.5 Funkce pro výpočet relativního rozložení jasů

V následující tabulce je uveden seznam, popis a jednotka výstupu funkcí vytvořených pro výpočet relativního rozložení jasů, tj. poměru jasu elementu oblohy k jasu zenitu, dle normy ISO [14].

Název funkce	Význam a popis výstupu funkce	Jednotka
SunZenithAngle	Zenitní úhel Slunce	rad
ElementZenithAngle	Zenitní úhel elementu	rad
SunElementAngleDistance	Úhlová vzdálenost Slunce a elementu oblohy	rad
IndicatrixElement	Relativní indikatrix rozptylu pro element oblohy	-
IndicatrixSunZenith	Relativní indikatrix rozptylu pro zenitní úhel Slunce	-
GradationFunction	Gradační funkce pro element oblohy	-
GradationZero	Gradační funkce pro Zenit	-
RelativeLuminance	Relativní jas elementu oblohy	-

Tabulka 8: Funkce pro výpočet relativního rozložení jasů

6.1.6 Funkce pro výpočet osvětlenosti vertikální roviny

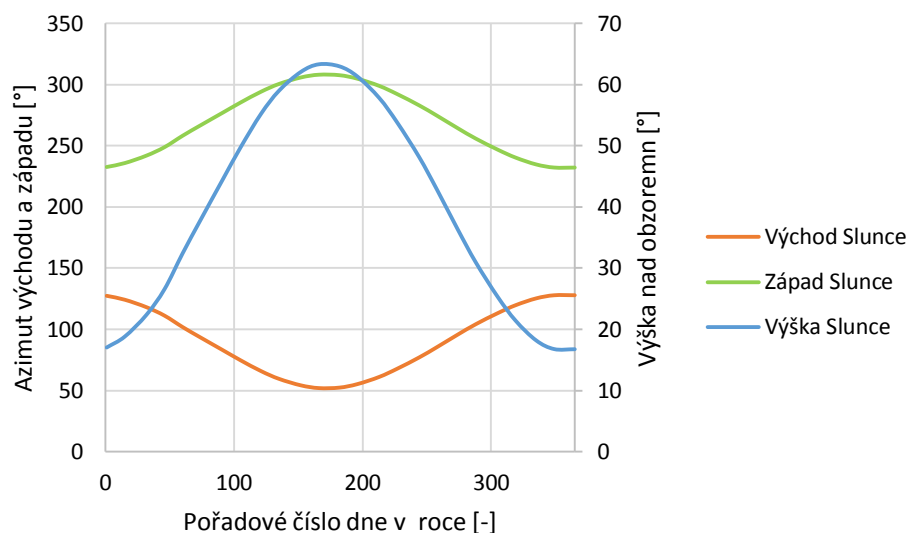
V následující tabulce je uveden seznam, popis a jednotka výstupu funkcí vytvořených pro výpočet osvětlenosti vertikální roviny a výpočty s tím spojené.

Název funkce	Význam a popis výstupu funkce	Jednotka
VerticalSolarLuminousConstant	Sluneční světelná konstanta přepočtená na vertikální rovinu	lx
MeridianConvergence	Meridiánová konvergence pro katastrální mapy systému S-JTSK	°
AzimuthDifference	Úhel mezi azimutem Slunce a azimutem normály vertikální roviny	°
AbsoluteLuminance	Jas elementu oblohy v absolutních jednotkách	cd·m ⁻²
DirectVerticalIlluminance	Přímá složka osvětlenosti vertikální roviny	lx
DiffuseVerticalIlluminance	Oblohová složka osvětlenosti vertikální roviny	lx
VerticalIlluminance	Osvětlenost vertikální roviny	lx

Tabulka 9: Funkce pro výpočet osvětlenosti vertikální roviny

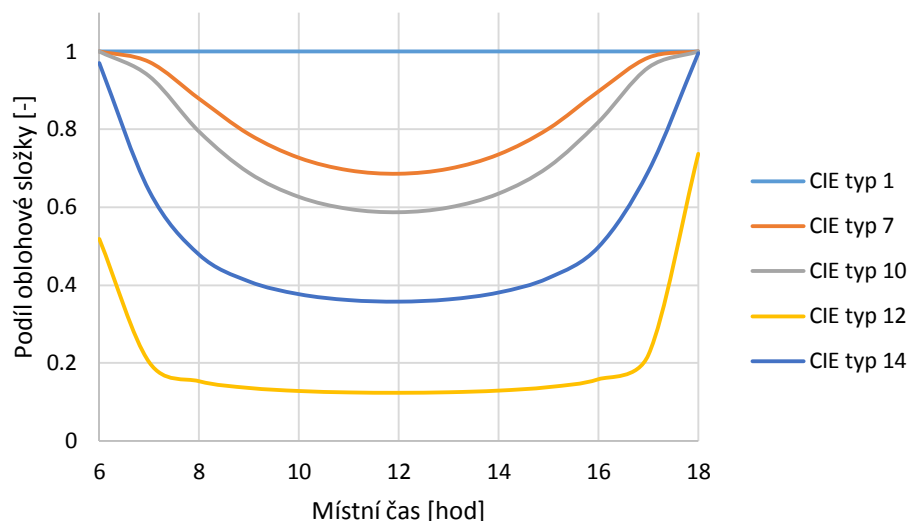
6.2 Příklady vypočtených průběhů

V následující části práce jsou ukázány možnosti využití vytvořených funkcí skrze vypočtení údajů a vytvoření grafů průběhů různých veličin. Všechny výpočty jsou provedeny pro zeměpisnou polohu 50° s. š., 14° v. d., délku časového pásma 15° v. d. a jsou provedeny v příloženém souboru „ukazky.xlsx“.



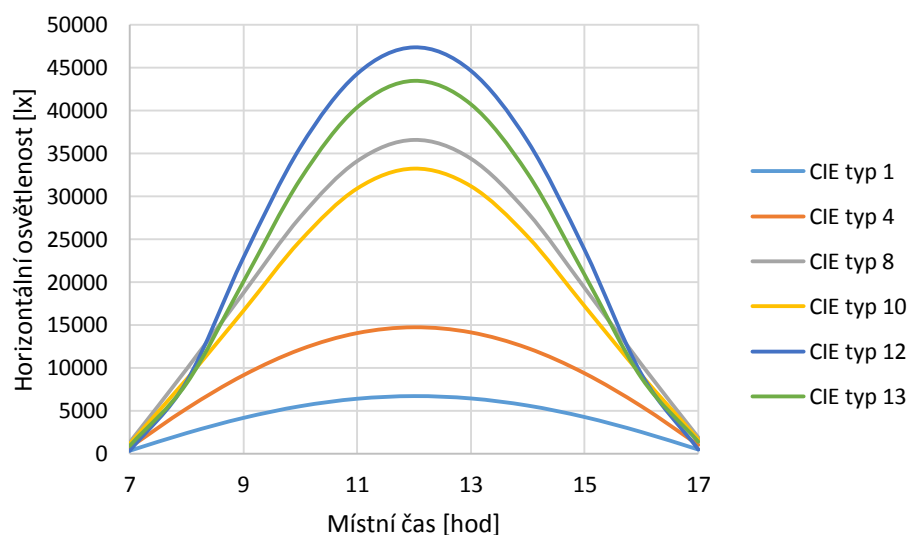
Obrázek 15: Poloha Slunce v průběhu roku

Obrázek číslo 15 ukazuje změnu polohy Slunce na obloze v průběhu roku. Výška Slunce nad obzorem je uvažována ve 12 hodin místního času, krok 15 dnů. Z obrázků je vidět prodlužování dne a dosažení větších výšek Slunce v letních měsících. Následkem této skutečnosti je dosahování nejvyšších hladin osvětlenosti právě v letních měsících.



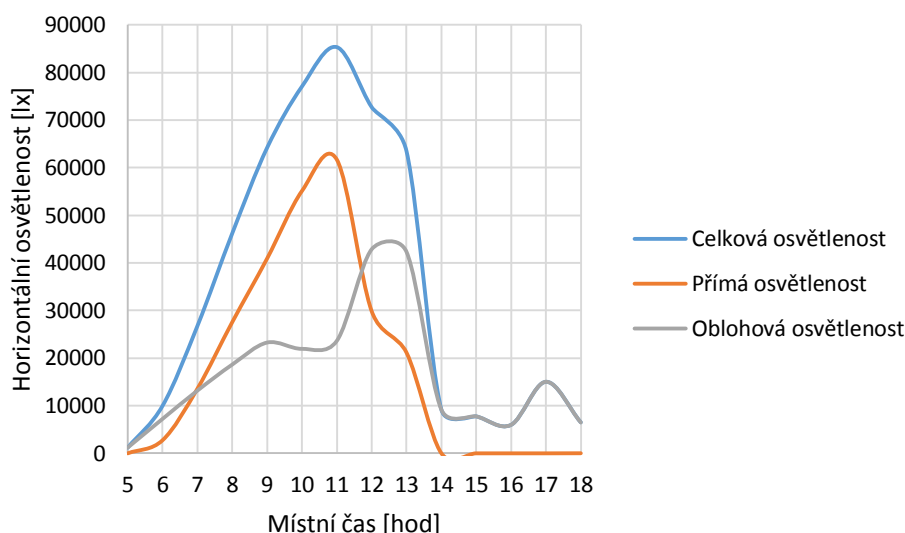
Obrázek 16: Podíl oblohové složky horizontální osvětlenosti různých CIE obloh

Na obrázku číslo 16 je zobrazen podíl nepřímé složky horizontální osvětlenosti v průběhu 6. dubna pro různé typy CIE obloh, krok 1 hodina. Průběhy přehledně zobrazují závislost nepřímé složky osvětlenosti na oblačnosti – od úplně zatažené oblohy číslo 1, která je bez vlivu přímého slunečního záření, až po nejjasnější oblohu číslo 12, kde oblohová osvětlenost netvoří po většinu dne ani 20% celkové horizontální osvětlenosti.



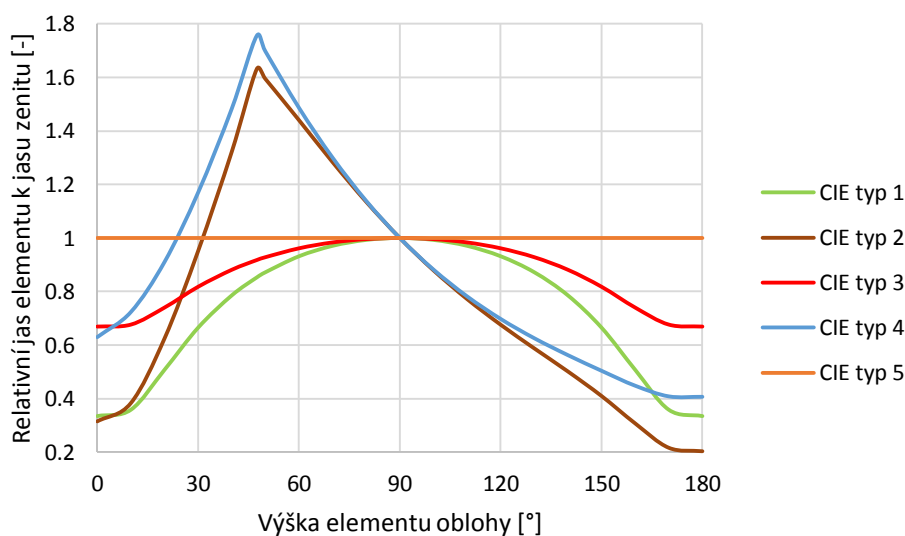
Obrázek 17: Celková horizontální osvětlenost - různé typy obloh

Obrázek 17 zobrazuje hodnoty horizontální osvětlenosti pro různé typy CIE obloh 18. října, s krokem 1 hodina. Na obrázku je vidět velký rozdíl hodnot osvětlenosti v závislosti na atmosférických podmínkách. Zároveň však lze odhadnout přibližné hodnoty osvětlenosti (aspoň řádově) pouze dle rozdělení obloh na zatažené, částečně oblačné a jasné.



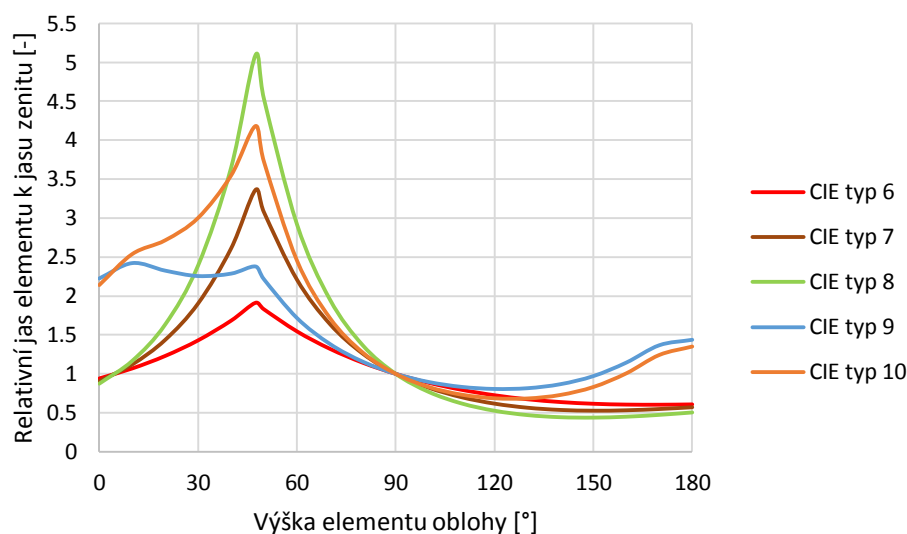
Obrázek 18: Horizontální osvětlenost v průběhu dne - podíly složek, změny obloh

Obrázek 18 simuluje průběh horizontální osvětlenosti (včetně jejích složek) v průběhu dne 23. dubna s krokem 1 hodina. Zpočátku jasný den (oblohy 13 a 11) se postupně zatahoval (oblohy 8 a 7), až došlo k úplnému zatažení oblohy a dešti (obloha 1), po dešti se stupeň oblačnosti mírně snížil (oblohy 6 a 10).



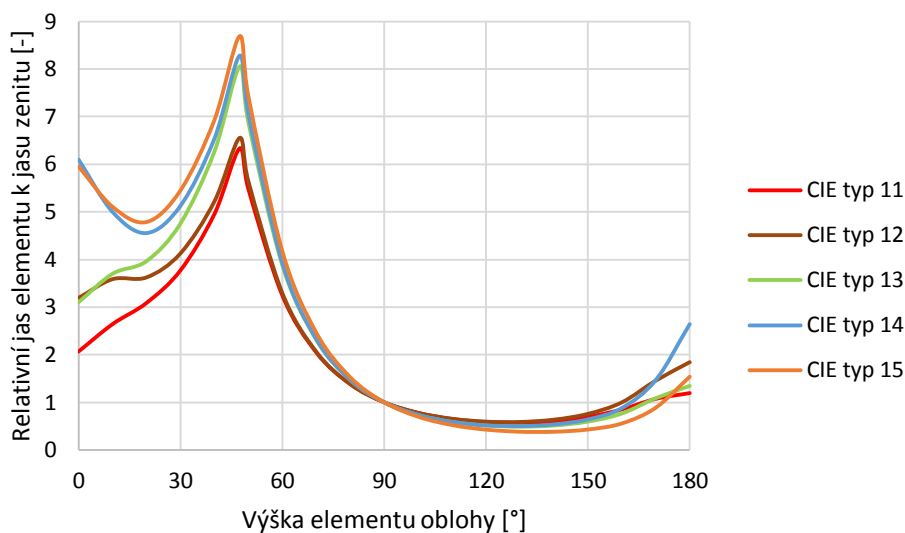
Obrázek 19: Relativní rozložení jasů - zatažené oblohy

Obrázek 19 zobrazuje relativní jasy elementů oblohy v závislosti na jejich elevačním úhlu pro zatažené oblohy typů 1 – 5. Vypočtený stav je platný pro 12. července, 15 hodin místního času a z toho vyplývající výšku Slunce $47,4^\circ$ nad obzorem. Zároveň je uvažován shodný azimut Slunce a elementu oblohy, tj. 244° . Krok výpočtu je 10° a navíc hodnota odpovídající aktuální výšce Slunce. Z vypočtených průběhů lze pozorovat rovnoměrnost rozložení jasů u oblohy typu 1 a 3, mírné zjasnění směrem ke Slunci u obloh typu 2 a 4 a konstantní jas oblohy typu 5.



Obrázek 20: Relativní rozložení jasů - částečně oblačné oblohy

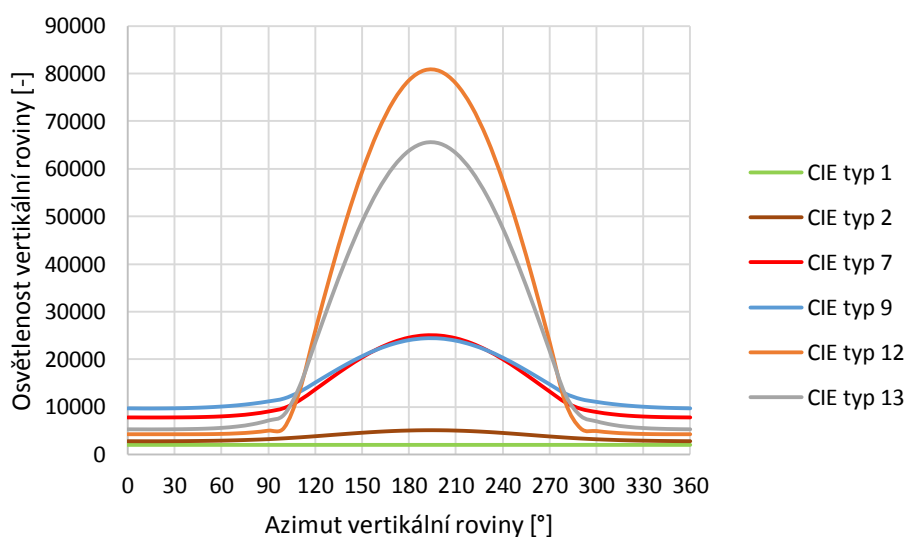
Obrázek 20 zobrazuje rozložení jasů ve stejné situaci jako obrázek 19, ale pro oblohy částečně oblačné, typů 6 – 10. U částečně oblačných obloh dochází ve většině případů k silnější gradaci jasů směrem ke Slunci, než u obloh zatažených. Gradace zde lze rozdělit na typy bez gradace (u obloh typu 6, 7, a 8) a s nerovnoměrnou gradací (typy 9 a 10).



Obrázek 21: Relativní rozložení jasů - jasné oblohy

Obrázek 21 zobrazuje rozložení jasů ve stejné situaci jako obrázek 20 a 21, ale pro oblohy jasné, typů 11 – 15. U těchto typů obloh dochází k výraznému zesílení jasu oblohy směrem k Slunci.

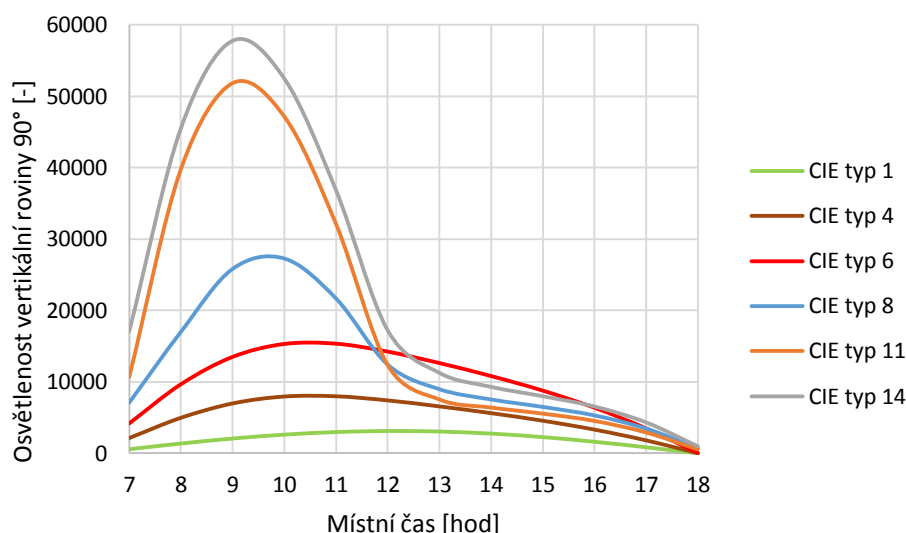
Příklady relativního rozložení jasů na obloze jsou zde ukázány pouze pro jednu konkrétní situaci – tj. výšku Slunce a azimut elementu. Pro podrobnější zkoumání je třeba namodelovat více situací, především s rozdílnou výškou Slunce nad obzorem a případně s azimutem elementů různým od azimutu Slunce.



Obrázek 22: Osvětlenost různě natočené vertikální roviny

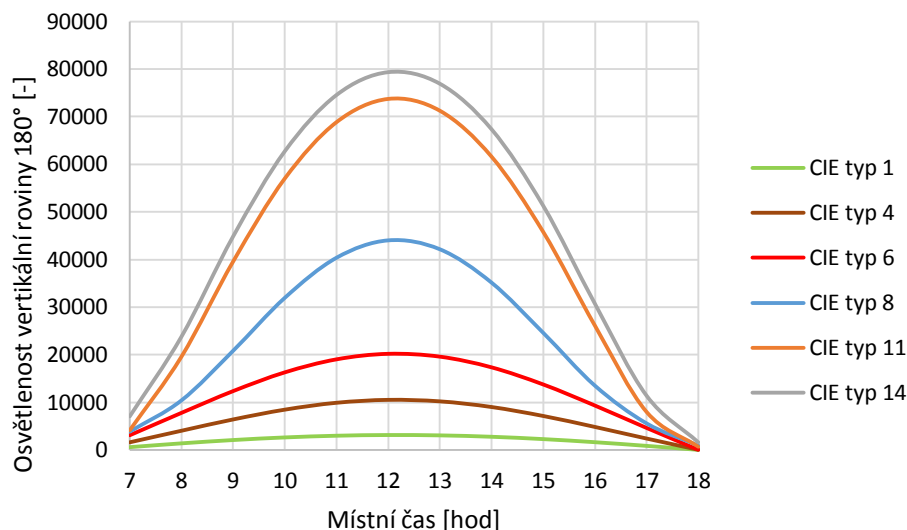
Obrázek 22 zobrazuje osvětlenost vertikální roviny v závislosti na jejím azimutu. Výpočet je proveden pro 8. únor, 13 hodin místního času (tj. výška Slunce 23,3°,

azimut Slunce 194°), krok výpočtu 10° . Z obrázku je patrný velký vliv přímé složky osvětlenosti (u jasných obloh je rovina natočená ve směru Slunce několikanásobně více osvětlena). V reálné situaci, vzhledem k nižší výšce Slunce nad obzorem v zimních měsících, by se navíc uplatnil vliv zastínění stěny jinými objekty (obzvlášť v městské zástavbě), toto zkoumání však přesahuje rozsah této práce.



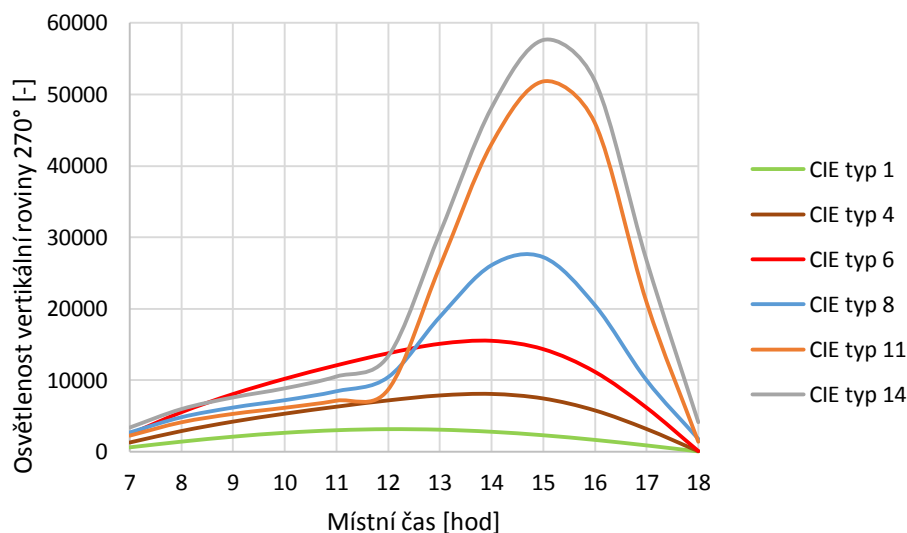
Obrázek 23: Osvětlenost vertikální roviny - orientace na východ

Obrázek 23 zobrazuje osvětlenosti vertikální roviny v průběhu dne 27. září, v případě orientace roviny na východ (tj. azimut roviny 90°), krok výpočtu 1 hodina. Z průběhů je vidět, že u obloh s rovnoměrným rozložením jasu (např. typ 1) nehraje orientace roviny roli, k maximálnímu osvětlení dochází okolo dvanácté hodiny místního času. U obloh s gradací jasu směrem k pozici Slunce je jasně patrná závislost na aktuální pozici Slunce, maxima pro východní směr nastávají mezi devátou a desátou hodinou dopolední. U jasných obloh se velmi výrazně projeví přímá složka osvětlenosti. Na druhou stranu, v odpoledních hodinách, kdy je Slunce již mezi jihem a západem, je dosaženo vyšší osvětlenosti v některých případech částečně oblačných obloh (zde např. typ 6), a celkově je osvětlenost roviny u všech typů obloh srovnatelná.



Obrázek 24: Osvětlenost vertikální roviny - orientace na jih

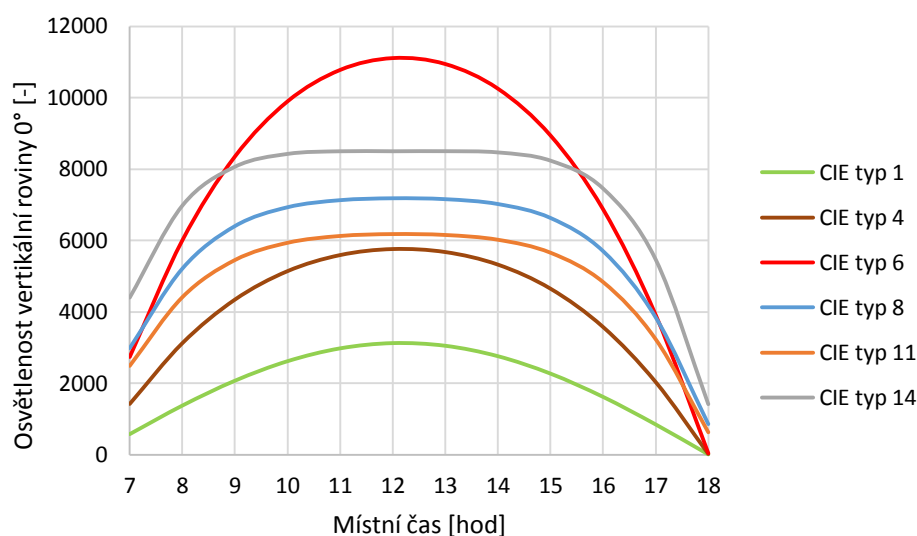
Obrázek 24 zobrazuje situaci shodnou s obrázkem 23 s jediným rozdílem, orientace vertikální roviny je nyní směrem na jih (tj. azimut 180°). Při této orientaci dosahuje osvětlenost maxima okolo dvanácté hodiny. U jasných a částečně oblačných obloh se zároveň předpokládá dosažení nejvyšší absolutní osvětlenosti celkově, jelikož vzhledem k nejvyšší poloze Slunce dochází k nejmenšímu zeslabení přímé složky osvětlenosti.



Obrázek 25: Osvětlenost vertikální roviny - orientace na západ

Obrázek 25 zobrazuje stejnou situaci jako obrázky 24 a 25 pro rovinu orientovanou na západ (tj. azimut 270°). Situace je obdobná jako pro stěnu orientovanou

na východ (viz obrázek 23) s rozdílem, že k maximálnímu osvětlení dochází v odpoledních hodinách, konkrétně kolem patnácté hodiny odpolední.



Obrázek 26: Osvětlenost vertikální roviny - orientace na sever

Obrázek 26 zobrazuje stejnou situaci jako předchozí obrázky, tentokrát pro rovinu orientovanou na sever. Pro severní orientaci je typický malý vliv přímé složky osvětlenosti (znatelný je pouze v letních měsících, v ranních a poté ve večerních hodinách) a celkově nejmenší absolutní hodnoty osvětlenosti. Za povšimnutí stojí skutečnost, že (vzhledem k vysokému podílu oblohové složky) nemusí být dosaženo maxima osvětlenosti při jasné obloze (tak jako tomu bylo v předchozích případech).

Tímto bylo ukázáno využití vytvořených funkcí v praxi, pro zjišťování a vyhodnocování parametrů denního osvětlení. Všechny výpočty jsou provedeny jako příklady, vytvořené funkce mají umožnit další a podrobnější zkoumání denního osvětlení a jeho využití. Pro zpřesnění údajů lze v budoucích výpočtech použít konkrétní vstupní data – zeměpisnou polohu a přesné azimuty vertikálních rovin (reprezentující stěny budov) a vypočíst údaje pro delší časové období s menším krokem.

7. Závěr

V následující části práce je vyhodnocena míra splnění cílů práce a následně jsou uvedeny návrhy dalšího možného využití získaných poznatků ke zkoumání užití denního světla při osvětlování budov.

7.1 Vyhodnocení cílů práce

Prvního cíle práce – určení osvětlenosti horizontální nezacloněné roviny bylo dosaženo pomocí zkoumání několika různých zdrojů, především habilitační práce docenta Daruly [2] a normy ČSN 73 0581 [6] s přihlédnutím k několika dalším normám. Byl porovnán postup jednotlivých výpočtů a graficky znázorněn průběh některých složitějších veličin.

Práce dále směřovala k druhému, hlavnímu cíli. Vyjádření osvětlenosti vertikální roviny se ukázalo jako složitý problém, s nutností řešit postupně problematiku vyjádření přímé složky osvětlenosti (spojenou se zjišťováním a výpočtem azimutů) i složky nepřímé (spojené s rozložením jasů na obloze a návrhu, odvození a ověření postupu výpočtu). Zpracování problematiky rozložení jasů na jednotlivých oblohách a především vytvoření výpočtového algoritmu pro osvětlenost vertikální roviny považuji za největší a klíčový úspěch této práce.

Všechny předchozí úvahy by však byly bez využití softwaru k výpočtům a zobrazení jen velmi těžko realizovatelné pro různorodé vstupní hodnoty a velké množství výpočtů. Z tohoto důvodu nelze hodnotit vytvoření nových funkcí do programu Microsoft Excel (konkrétně v příloženém souboru „Daylight_and_illuminance.xlsx“) jinak, než jako další úspěch této práce.

Souhrnně tedy považuji práci za úspěšnou, s tím, že největším přínosem je její využitelnost pro další zkoumání v oblasti využití denního světla pro osvětlování venkovních i vnitřních prostor, hodnocení oslunění místností i projektování celých budov, vzhledem k jejich plánovanému využití.

7.2 Náměty možného pokračování práce

Tato práce, vzhledem k svému rozsahu, nemůže obsáhnout celou problematiku využití denního světla. Je však základní prací, ze které mohou vycházet práce další. Náměty dalších prací, opírající se o výsledky této práce (hlavně výpočtu osvětlenosti vertikální nezacloněné roviny) jsou stručně uvedeny v následujícím textu.

Přímé pokračování této práce spatřuji ve zpracování dat osvětlenosti vertikálních rovin (simulující stěny budov) a způsobu jejich využití v místnostech. Využitím zde rozumějme osvětlenost bodu v místnosti, v závislosti na jeho poloze oproti okennímu otvoru. Tuto osvětlenost bych doporučoval řešit buď skrze osvětlenost vertikální roviny, respektive vypočtením její části dle polohy kontrolního bodu nebo skrze modelování jasu okenního otvoru a následný výpočet osvětlenosti z tohoto jasu.

V souvislosti s využitím světla v budovách by se vyjma osvětlenosti měla řešit i problematika oslunění, oslnění, stínění a v neposlední řadě i vliv přímého záření na ohřev místnosti. Na základě těchto údajů lze následně vytvořit doporučení ohledně umístění jednotlivých místností v budově a samotnou orientaci budovy. Jelikož zastínění závisí na okolní zástavbě, v úvahu by mohl připadat výpočet hodnot typických např. pro hustě zastavěné centrum, sídliště, satelity s rodinnými domy, vesnice apod.

Za poslední důležitou součást pokračování práce považuji realizaci měření pro potvrzení vypočtených hodnot (minimálně orientační) a s ním spojené úkony, např. realizace automatického rozpoznání typu oblohy porovnáním fotografie objektivem „rybí oko“ s jasovými mapami obloh pro danou situaci. Problémem tohoto měření je však nutnost měřit např. v 15 minutových intervalech ideálně po dobu několika let, aby byl naměřen dostatečný počet případů pro zpracování, a s tím spojené vysoké finanční náklady.

Literatura

- [1] EMILIO, M., J. R. KUHN, R. I. BUSH a I. F. SCHOLL. MEASURING THE SOLAR RADIUS FROM SPACE DURING THE 2003 AND 2006 MERCURY TRANSITS. *The Astrophysical Journal* [online]. 2012, č. 750 [cit. 2013-11-07]. DOI: 10.1088/0004-637X/750/2/135. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/0004-637X/750/2/135/fulltext/>
- [2] DARULA, Stanislav. *ZDROJE DENNÉHO OSVETLENIA*. Bratislava, 2012. Habilitační práce. Slovenská technická univerzita, Stavebná fakulta.
- [3] GUEYMARD, Christian. The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. *Solar Energy* [online]. 2004, Volume 76, Issue 4 [cit. 2013-11-08]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X03003967>
- [4] CIE 2006 "physiologically-relevant" LMS functions. In: <http://www.cvrl.org/> [online]. 2006 [cit. 2013-11-08]. Dostupné z: http://www.cvrl.org/database/data/lum/linCIE2008v2e_1.htm
- [5] ZÁLEŠÁK, Jan. *Možnosti stanovení exteriérové osvětlenosti při standardizovaných podmínkách obloh dle CIE*. Praha, 2013. Práce z předmětu Vybrané statě ze stavební světelné techniky - D24SST. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.
- [6] ČSN 73 0581. *Oslunění budov a venkovních prostor - Metoda stanovení hodnot*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [7] DARULA, Stanislav a Richard KITTLER. Parameterisation of the Four Half-Day Daylight Situations. In: *Sustainable Growth and Applications in Renewable Energy Sources* [online]. InTech, 2011 [cit. 2013-11-12]. ISBN 978-953-307-408-5. DOI: 10.5772/28071. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/sustainable-growth-and-applications-in-renewable-energy-sources/parameterisation-of-the-four-half-day-daylight-situations>
- [8] KAŇKA, Jan. Deklinace Slunce v průběhu desetiletí. *Světlo: časopis pro světelnou techniku a osvětlování* [online]. 2012, č. 1 [cit. 2013-11-11]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Svetlo/2012/01/Svetlo_01_2012_output/web/Svetlo_01_2012_opf_files/WebSearch/page0050.html
- [9] PELECH, Marcel a Jan KAŇKA. Výpočtové modely dráhy Slunce v kontextu nové evropské normy. In: *Sborník odborného semináře Kurz osvětlovací techniky XXX*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - technická univerzita Ostrava, 2013, s. 335-337. ISBN 978-80-248-3174-9.

- [10] NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, U. S. Department of Energy. *MIDC SPA Calculator: Compute the solar position from universal time and location using NREL's Solar Position Algorithm (SPA)* [online]. 2003 [cit. 2014-03-06]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/midc/solpos/spa.html>
- [11] SKOKANSKÝ, Karel, Tomáš NOVÁK, Marek BÁLSKÝ, Zdeněk BLÁHA, Zbyněk CARBOL, Daniel DIVIŠ, Blahoslav SOCHA, Jaroslav ŠNOBL, Jan ŠUMPICH a Petr ZÁVADA. *Světelná technika* [online]. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011 [cit. 2013-11-12]. ISBN 978-80-01-04941-9. Dostupné z: http://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-6-Svetelna.pdf
- [12] ANTÓN, M., A. SERRANO, M.L. CANCELLO a J.A. GARCÍA. Influence of the relative optical air mass on ultraviolet erythral irradiance. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* [online]. 2009, roč. 71, 17-18 [cit. 2013-11-12]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682609002399#>
- [13] NAVVAB, M., M. KARAYEL, E. NE'EMAN a S. SELKOWITZ. Analysis of atmospheric turbidity for daylight calculations. *Energy and Buildings* [online]. 1984, roč. 6, č. 3 [cit. 2013-11-12]. Dostupné z: <http://eetd.lbl.gov/sites/all/files/publications/17727.pdf>
- [14] ISO 15469:2004 (CIE S 011/E:2003). *Spatial distribution of daylight - CIE standard general sky*. Vienna: CIE Central Bureau, 2003.
- [15] ČSN 73 4301. *Obytné budovy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004.
- [16] HABEL Jiří, Dvořáček Karel, Dvořáček Vladimír, Žák Petr, Světlo a osvětlování. 1. Praha : FCC Public, 2013. 624 s. ISBN 978-80-86534-21-3
- [17] HABEL, Jiří. *Osvětlování*. Vyd. 2. Praha: ČVUT, 1998, 328 s. ISBN 80-010-1770-2.

Příloha 1 – Spektrální složení slunečního záření

λ [nm]	$E_e(\lambda)$ [W·m ² ·nm ⁻¹]	λ [nm]	$E_e(\lambda)$ [W·m ² ·nm ⁻¹]	λ [nm]	$E_e(\lambda)$ [W·m ² ·nm ⁻¹]
325	7.840E-01	444	2.034E+00	638	1.633E+00
325.5	9.411E-01	445	1.991E+00	639	1.611E+00
326	1.052E+00	446	1.894E+00	640	1.591E+00
326.5	9.968E-01	447	2.042E+00	641	1.587E+00
327	1.009E+00	448	2.077E+00	642	1.576E+00
327.5	9.959E-01	449	2.077E+00	643	1.597E+00
328	9.529E-01	450	2.131E+00	644	1.588E+00
328.5	9.132E-01	451	2.208E+00	645	1.593E+00
329	1.024E+00	452	2.125E+00	646	1.569E+00
329.5	1.139E+00	453	1.996E+00	647	1.577E+00
330	1.162E+00	454	2.079E+00	648	1.591E+00
330.5	9.725E-01	455	2.091E+00	649	1.560E+00
331	1.005E+00	456	2.138E+00	650	1.529E+00
331.5	9.815E-01	457	2.172E+00	651	1.586E+00
332	1.006E+00	458	2.100E+00	652	1.568E+00
332.5	9.721E-01	459	2.086E+00	653	1.566E+00
333	9.790E-01	460	2.092E+00	654	1.543E+00
333.5	9.164E-01	461	2.138E+00	655	1.509E+00
334	9.417E-01	462	2.150E+00	656	1.321E+00
334.5	1.040E+00	463	2.136E+00	657	1.356E+00
335	9.537E-01	464	2.095E+00	658	1.509E+00
335.5	1.072E+00	465	2.063E+00	659	1.513E+00
336	7.396E-01	466	2.079E+00	660	1.517E+00
336.5	9.049E-01	467	2.043E+00	661	1.527E+00
337	7.526E-01	468	2.066E+00	662	1.537E+00
337.5	9.392E-01	469	2.076E+00	663	1.504E+00
338	8.864E-01	470	2.010E+00	664	1.512E+00
338.5	9.904E-01	471	2.006E+00	665	1.506E+00
339	9.808E-01	472	2.114E+00	666	1.504E+00
339.5	9.380E-01	473	2.087E+00	667	1.499E+00
340	1.133E+00	474	2.094E+00	668	1.496E+00
340.5	1.016E+00	475	2.116E+00	669	1.517E+00
341	9.640E-01	476	2.058E+00	670	1.509E+00
341.5	8.880E-01	477	2.067E+00	671	1.507E+00
342	1.060E+00	478	2.121E+00	672	1.493E+00
342.5	9.903E-01	479	2.103E+00	673	1.514E+00

Příloha 1 – Spektrální složení slunečního záření

343	1.084E+00	480	2.102E+00	674	1.507E+00
343.5	1.017E+00	481	2.135E+00	675	1.492E+00
344	7.664E-01	482	2.140E+00	676	1.501E+00
344.5	7.515E-01	483	2.108E+00	677	1.485E+00
345	9.981E-01	484	2.062E+00	678	1.488E+00
345.5	1.018E+00	485	1.962E+00	679	1.463E+00
346	8.640E-01	486	1.712E+00	680	1.474E+00
346.5	9.766E-01	487	1.791E+00	681	1.464E+00
347	1.044E+00	488	1.965E+00	682	1.462E+00
347.5	8.414E-01	489	1.973E+00	683	1.459E+00
348	9.597E-01	490	2.072E+00	684	1.452E+00
348.5	9.591E-01	491	2.033E+00	685	1.463E+00
349	8.876E-01	492	1.919E+00	686	1.456E+00
349.5	8.760E-01	493	1.981E+00	687	1.474E+00
350	1.081E+00	494	2.000E+00	688	1.457E+00
350.5	1.138E+00	495	2.016E+00	689	1.454E+00
351	1.014E+00	496	2.028E+00	690	1.444E+00
351.5	9.808E-01	497	2.059E+00	691	1.433E+00
352	1.053E+00	498	1.962E+00	692	1.420E+00
352.5	8.210E-01	499	1.988E+00	693	1.422E+00
353	1.032E+00	500	1.932E+00	694	1.426E+00
353.5	1.102E+00	501	1.899E+00	695	1.426E+00
354	1.143E+00	502	1.878E+00	696	1.438E+00
354.5	1.158E+00	503	1.961E+00	697	1.432E+00
355	1.152E+00	504	1.933E+00	698	1.412E+00
355.5	1.038E+00	505	1.983E+00	699	1.431E+00
356	1.084E+00	506	2.048E+00	700	1.413E+00
356.5	9.246E-01	507	1.948E+00	701	1.410E+00
357	7.635E-01	508	1.881E+00	702	1.402E+00
357.5	9.338E-01	509	1.929E+00	703	1.408E+00
358	7.391E-01	510	1.915E+00	704	1.422E+00
358.5	6.309E-01	511	1.962E+00	705	1.424E+00
359	8.815E-01	512	1.981E+00	706	1.410E+00
359.5	1.122E+00	513	1.874E+00	707	1.407E+00
360	1.188E+00	514	1.859E+00	708	1.410E+00
360.5	9.484E-01	515	1.840E+00	709	1.396E+00
361	8.627E-01	516	1.836E+00	710	1.403E+00
361.5	9.897E-01	517	1.630E+00	711	1.396E+00
362	8.526E-01	518	1.714E+00	712	1.385E+00
362.5	1.176E+00	519	1.798E+00	713	1.377E+00

Příloha 1 – Spektrální složení slunečního záření

363	1.053E+00	520	1.864E+00	714	1.382E+00
363.5	9.672E-01	521	1.882E+00	715	1.356E+00
364	1.180E+00	522	1.885E+00	716	1.363E+00
364.5	1.007E+00	523	1.852E+00	717	1.382E+00
365	1.024E+00	524	1.921E+00	718	1.360E+00
365.5	1.283E+00	525	1.948E+00	719	1.335E+00
366	1.356E+00	526	1.862E+00	720	1.361E+00
366.5	1.271E+00	527	1.758E+00	721	1.346E+00
367	1.236E+00	528	1.862E+00	722	1.345E+00
367.5	1.281E+00	529	1.965E+00	723	1.357E+00
368	1.119E+00	530	1.938E+00	724	1.346E+00
368.5	1.127E+00	531	1.968E+00	725	1.337E+00
369	1.215E+00	532	1.901E+00	726	1.339E+00
369.5	1.293E+00	533	1.845E+00	727	1.348E+00
370	1.376E+00	534	1.898E+00	728	1.324E+00
370.5	1.066E+00	535	1.937E+00	729	1.297E+00
371	1.137E+00	536	1.953E+00	730	1.329E+00
371.5	1.421E+00	537	1.874E+00	731	1.319E+00
372	9.422E-01	538	1.906E+00	732	1.322E+00
372.5	1.128E+00	539	1.890E+00	733	1.318E+00
373	1.145E+00	540	1.813E+00	734	1.332E+00
373.5	7.436E-01	541	1.831E+00	735	1.313E+00
374	1.079E+00	542	1.891E+00	736	1.307E+00
374.5	8.919E-01	543	1.866E+00	737	1.317E+00
375	8.660E-01	544	1.903E+00	738	1.295E+00
375.5	1.292E+00	545	1.896E+00	739	1.273E+00
376	1.070E+00	546	1.909E+00	740	1.292E+00
376.5	1.108E+00	547	1.904E+00	741	1.271E+00
377	1.171E+00	548	1.879E+00	742	1.265E+00
377.5	1.368E+00	549	1.883E+00	743	1.295E+00
378	1.482E+00	550	1.905E+00	744	1.287E+00
378.5	1.400E+00	551	1.881E+00	745	1.284E+00
379	1.155E+00	552	1.894E+00	746	1.290E+00
379.5	1.055E+00	553	1.861E+00	747	1.292E+00
380	1.096E+00	554	1.906E+00	748	1.289E+00
380.5	1.325E+00	555	1.911E+00	749	1.274E+00
381	1.325E+00	556	1.887E+00	750	1.273E+00
381.5	1.048E+00	557	1.830E+00	751	1.260E+00
382	9.288E-01	558	1.819E+00	752	1.265E+00
382.5	7.899E-01	559	1.788E+00	753	1.271E+00

Příloha 1 – Spektrální složení slunečního záření

383	7.300E-01	560	1.812E+00	754	1.274E+00
383.5	7.020E-01	561	1.838E+00	755	1.267E+00
384	7.734E-01	562	1.828E+00	756	1.266E+00
384.5	1.136E+00	563	1.882E+00	757	1.268E+00
385	1.125E+00	564	1.834E+00	758	1.253E+00
385.5	1.046E+00	565	1.821E+00	759	1.249E+00
386	8.946E-01	566	1.797E+00	760	1.249E+00
386.5	1.173E+00	567	1.835E+00	761	1.245E+00
387	9.740E-01	568	1.829E+00	762	1.223E+00
387.5	1.093E+00	569	1.807E+00	763	1.246E+00
388	1.008E+00	570	1.803E+00	764	1.239E+00
388.5	9.949E-01	571	1.786E+00	765	1.226E+00
389	1.073E+00	572	1.843E+00	766	1.176E+00
389.5	1.298E+00	573	1.865E+00	767	1.216E+00
390	1.301E+00	574	1.862E+00	768	1.221E+00
390.5	1.196E+00	575	1.832E+00	769	1.209E+00
391	1.406E+00	576	1.815E+00	770	1.209E+00
391.5	1.433E+00	577	1.833E+00	771	1.201E+00
392	1.206E+00	578	1.800E+00	772	1.198E+00
392.5	1.078E+00	579	1.798E+00	773	1.205E+00
393	5.989E-01	580	1.818E+00	774	1.198E+00
393.5	4.347E-01	581	1.817E+00	775	1.188E+00
394	8.837E-01	582	1.842E+00	776	1.202E+00
394.5	1.122E+00	583	1.839E+00	777	1.186E+00
395	1.368E+00	584	1.850E+00	778	1.179E+00
395.5	1.389E+00	585	1.802E+00	779	1.180E+00
396	1.203E+00	586	1.765E+00	780	1.173E+00
396.5	7.019E-01	587	1.810E+00	781	1.174E+00
397	5.261E-01	588	1.793E+00	782	1.181E+00
397.5	1.069E+00	589	1.646E+00	783	1.160E+00
398	1.497E+00	590	1.716E+00	784	1.165E+00
398.5	1.546E+00	591	1.782E+00	785	1.158E+00
399	1.670E+00	592	1.780E+00	786	1.172E+00
399.5	1.663E+00	593	1.784E+00	787	1.167E+00
400	1.727E+00	594	1.781E+00	788	1.161E+00
401	1.769E+00	595	1.752E+00	789	1.167E+00
402	1.861E+00	596	1.779E+00	790	1.165E+00
403	1.763E+00	597	1.767E+00	791	1.149E+00
404	1.733E+00	598	1.751E+00	792	1.138E+00
405	1.730E+00	599	1.746E+00	793	1.123E+00

Příloha 1 – Spektrální složení slunečního záření

406	1.697E+00	600	1.737E+00	794	1.110E+00
407	1.665E+00	601	1.715E+00	795	1.136E+00
408	1.729E+00	602	1.702E+00	796	1.140E+00
409	1.847E+00	603	1.727E+00	797	1.139E+00
410	1.610E+00	604	1.754E+00	798	1.138E+00
411	1.740E+00	605	1.743E+00	799	1.139E+00
412	1.863E+00	606	1.732E+00	800	1.129E+00
413	1.816E+00	607	1.745E+00	801	1.132E+00
414	1.834E+00	608	1.722E+00	802	1.127E+00
415	1.834E+00	609	1.722E+00	803	1.122E+00
416	1.861E+00	610	1.706E+00	804	1.120E+00
417	1.813E+00	611	1.713E+00	805	1.106E+00
418	1.777E+00	612	1.706E+00	806	1.121E+00
419	1.797E+00	613	1.683E+00	807	1.112E+00
420	1.787E+00	614	1.657E+00	808	1.110E+00
421	1.866E+00	615	1.690E+00	809	1.101E+00
422	1.771E+00	616	1.632E+00	810	1.104E+00
423	1.727E+00	617	1.627E+00	811	1.115E+00
424	1.825E+00	618	1.688E+00	812	1.116E+00
425	1.818E+00	619	1.670E+00	813	1.118E+00
426	1.765E+00	620	1.681E+00	814	1.111E+00
427	1.730E+00	621	1.686E+00	815	1.105E+00
428	1.684E+00	622	1.670E+00	816	1.103E+00
429	1.590E+00	623	1.648E+00	817	1.099E+00
430	1.389E+00	624	1.617E+00	818	1.077E+00
431	1.377E+00	625	1.613E+00	819	1.071E+00
432	1.773E+00	626	1.638E+00	820	1.064E+00
433	1.780E+00	627	1.665E+00	821	1.063E+00
434	1.652E+00	628	1.663E+00	822	1.065E+00
435	1.725E+00	629	1.663E+00	823	1.076E+00
436	1.938E+00	630	1.628E+00	824	1.073E+00
437	1.906E+00	631	1.629E+00	825	1.070E+00
438	1.732E+00	632	1.604E+00	826	1.078E+00
439	1.795E+00	633	1.638E+00	827	1.076E+00
440	1.848E+00	634	1.611E+00	828	1.070E+00
441	1.910E+00	635	1.631E+00	829	1.063E+00
442	2.046E+00	636	1.603E+00	830	1.060E+00
443	1.995E+00	637	1.625E+00		

Příloha 2 – Poměrná světelná účinnost monochromatického záření

λ [nm]	$V(\lambda)$ [-]	λ [nm]	$V(\lambda)$ [-]	λ [nm]	$V(\lambda)$ [-]
390	4.1462E-04	537	9.2693E-01	684	1.3581E-02
391	5.0283E-04	538	9.3667E-01	685	1.2616E-02
392	6.0850E-04	539	9.4595E-01	686	1.1707E-02
393	7.3444E-04	540	9.5447E-01	687	1.0856E-02
394	8.8374E-04	541	9.6198E-01	688	1.0065E-02
395	1.0597E-03	542	9.6844E-01	689	9.3334E-03
396	1.2655E-03	543	9.7383E-01	690	8.6613E-03
397	1.5048E-03	544	9.7815E-01	691	8.0461E-03
398	1.7805E-03	545	9.8141E-01	692	7.4811E-03
399	2.0956E-03	546	9.8367E-01	693	6.9600E-03
400	2.4522E-03	547	9.8521E-01	694	6.4771E-03
401	2.8522E-03	548	9.8638E-01	695	6.0277E-03
402	3.2991E-03	549	9.8754E-01	696	5.6082E-03
403	3.7975E-03	550	9.8902E-01	697	5.2167E-03
404	4.3528E-03	551	9.9108E-01	698	4.8518E-03
405	4.9717E-03	552	9.9349E-01	699	4.5120E-03
406	5.6610E-03	553	9.9592E-01	700	4.1959E-03
407	6.4216E-03	554	9.9802E-01	701	3.9021E-03
408	7.2503E-03	555	9.9946E-01	702	3.6284E-03
409	8.1402E-03	556	9.9999E-01	703	3.3730E-03
410	9.0799E-03	557	9.9976E-01	704	3.1343E-03
411	1.0056E-02	558	9.9898E-01	705	2.9109E-03
412	1.1065E-02	559	9.9791E-01	706	2.7015E-03
413	1.2105E-02	560	9.9677E-01	707	2.5058E-03
414	1.3180E-02	561	9.9574E-01	708	2.3232E-03
415	1.4294E-02	562	9.9471E-01	709	2.1533E-03
416	1.5450E-02	563	9.9355E-01	710	1.9956E-03
417	1.6641E-02	564	9.9212E-01	711	1.8493E-03
418	1.7853E-02	565	9.9026E-01	712	1.7140E-03
419	1.9070E-02	566	9.8786E-01	713	1.5889E-03
420	2.0274E-02	567	9.8493E-01	714	1.4735E-03
421	2.1448E-02	568	9.8150E-01	715	1.3670E-03
422	2.2600E-02	569	9.7760E-01	716	1.2690E-03
423	2.3748E-02	570	9.7326E-01	717	1.1784E-03
424	2.4913E-02	571	9.6848E-01	718	1.0946E-03

Příloha 2 – Poměrná světelná účinnost monochromatického záření

425	2.6121E-02	572	9.6314E-01	719	1.0169E-03
426	2.7399E-02	573	9.5711E-01	720	9.4473E-04
427	2.8750E-02	574	9.5025E-01	721	8.7752E-04
428	3.0169E-02	575	9.4246E-01	722	8.1504E-04
429	3.1651E-02	576	9.3369E-01	723	7.5708E-04
430	3.3190E-02	577	9.2429E-01	724	7.0338E-04
431	3.4779E-02	578	9.1467E-01	725	6.5371E-04
432	3.6415E-02	579	9.0523E-01	726	6.0781E-04
433	3.8096E-02	580	8.9636E-01	727	5.6534E-04
434	3.9818E-02	581	8.8831E-01	728	5.2601E-04
435	4.1579E-02	582	8.8085E-01	729	4.8951E-04
436	4.3371E-02	583	8.7365E-01	730	4.5560E-04
437	4.5172E-02	584	8.6638E-01	731	4.2406E-04
438	4.6954E-02	585	8.5872E-01	732	3.9469E-04
439	4.8687E-02	586	8.5043E-01	733	3.6732E-04
440	5.0337E-02	587	8.4151E-01	734	3.4179E-04
441	5.1876E-02	588	8.3201E-01	735	3.1797E-04
442	5.3322E-02	589	8.2202E-01	736	2.9574E-04
443	5.4706E-02	590	8.1159E-01	737	2.7506E-04
444	5.6063E-02	591	8.0079E-01	738	2.5586E-04
445	5.7434E-02	592	7.8965E-01	739	2.3811E-04
446	5.8851E-02	593	7.7821E-01	740	2.2175E-04
447	6.0308E-02	594	7.6647E-01	741	2.0667E-04
448	6.1786E-02	595	7.5448E-01	742	1.9275E-04
449	6.3266E-02	596	7.4225E-01	743	1.7983E-04
450	6.4724E-02	597	7.2982E-01	744	1.6780E-04
451	6.6148E-02	598	7.1725E-01	745	1.5656E-04
452	6.7573E-02	599	7.0458E-01	746	1.4602E-04
453	6.9049E-02	600	6.9186E-01	747	1.3615E-04
454	7.0633E-02	601	6.7910E-01	748	1.2695E-04
455	7.2383E-02	602	6.6629E-01	749	1.1837E-04
456	7.4360E-02	603	6.5336E-01	750	1.1039E-04
457	7.6594E-02	604	6.4028E-01	751	1.0299E-04
458	7.9114E-02	605	6.2701E-01	752	9.6118E-05
459	8.1954E-02	606	6.1352E-01	753	8.9733E-05
460	8.5148E-02	607	5.9985E-01	754	8.3797E-05
461	8.8727E-02	608	5.8607E-01	755	7.8274E-05
462	9.2660E-02	609	5.7223E-01	756	7.3133E-05
463	9.6897E-02	610	5.5838E-01	757	6.8341E-05
464	1.0138E-01	611	5.4455E-01	758	6.3870E-05

Příloha 2 – Poměrná světelná účinnost monochromatického záření

465	1.0601E-01	612	5.3077E-01	759	5.9694E-05
466	1.1074E-01	613	5.1701E-01	760	5.5789E-05
467	1.1551E-01	614	5.0329E-01	761	5.2135E-05
468	1.2031E-01	615	4.8960E-01	762	4.8722E-05
469	1.2512E-01	616	4.7594E-01	763	4.5539E-05
470	1.2990E-01	617	4.6240E-01	764	4.2574E-05
471	1.3463E-01	618	4.4902E-01	765	3.9819E-05
472	1.3933E-01	619	4.3586E-01	766	3.7259E-05
473	1.4402E-01	620	4.2299E-01	767	3.4875E-05
474	1.4874E-01	621	4.1042E-01	768	3.2648E-05
475	1.5351E-01	622	3.9804E-01	769	3.0561E-05
476	1.5836E-01	623	3.8573E-01	770	2.8602E-05
477	1.6332E-01	624	3.7339E-01	771	2.6758E-05
478	1.6838E-01	625	3.6092E-01	772	2.5029E-05
479	1.7354E-01	626	3.4829E-01	773	2.3414E-05
480	1.7881E-01	627	3.3557E-01	774	2.1909E-05
481	1.8418E-01	628	3.2290E-01	775	2.0513E-05
482	1.8966E-01	629	3.1037E-01	776	1.9219E-05
483	1.9521E-01	630	2.9809E-01	777	1.8018E-05
484	2.0083E-01	631	2.8612E-01	778	1.6899E-05
485	2.0648E-01	632	2.7448E-01	779	1.5853E-05
486	2.1218E-01	633	2.6320E-01	780	1.4872E-05
487	2.1803E-01	634	2.5226E-01	781	1.3951E-05
488	2.2416E-01	635	2.4169E-01	782	1.3085E-05
489	2.3073E-01	636	2.3148E-01	783	1.2273E-05
490	2.3792E-01	637	2.2164E-01	784	1.1512E-05
491	2.4587E-01	638	2.1216E-01	785	1.0800E-05
492	2.5460E-01	639	2.0305E-01	786	1.0134E-05
493	2.6408E-01	640	1.9431E-01	787	9.5099E-06
494	2.7425E-01	641	1.8592E-01	788	8.9256E-06
495	2.8507E-01	642	1.7783E-01	789	8.3779E-06
496	2.9648E-01	643	1.6997E-01	790	7.8639E-06
497	3.0850E-01	644	1.6228E-01	791	7.3815E-06
498	3.2114E-01	645	1.5474E-01	792	6.9291E-06
499	3.3442E-01	646	1.4731E-01	793	6.5051E-06
500	3.4835E-01	647	1.4002E-01	794	6.1082E-06
501	3.6296E-01	648	1.3290E-01	795	5.7369E-06
502	3.7823E-01	649	1.2599E-01	796	5.3898E-06
503	3.9414E-01	650	1.1931E-01	797	5.0653E-06
504	4.1066E-01	651	1.1288E-01	798	4.7617E-06

Příloha 2 – Poměrná světelná účinnost monochromatického záření

505	4.2776E-01	652	1.0671E-01	799	4.4776E-06
506	4.4540E-01	653	1.0081E-01	800	4.2116E-06
507	4.6354E-01	654	9.5167E-02	801	3.9625E-06
508	4.8214E-01	655	8.9796E-02	802	3.7287E-06
509	5.0114E-01	656	8.4690E-02	803	3.5089E-06
510	5.2050E-01	657	7.9840E-02	804	3.3019E-06
511	5.4014E-01	658	7.5234E-02	805	3.1066E-06
512	5.6002E-01	659	7.0861E-02	806	2.9221E-06
513	5.8010E-01	660	6.6710E-02	807	2.7482E-06
514	6.0032E-01	661	6.2774E-02	808	2.5846E-06
515	6.2063E-01	662	5.9042E-02	809	2.4309E-06
516	6.4094E-01	663	5.5507E-02	810	2.2868E-06
517	6.6108E-01	664	5.2161E-02	811	2.1519E-06
518	6.8081E-01	665	4.8997E-02	812	2.0257E-06
519	6.9990E-01	666	4.6006E-02	813	1.9075E-06
520	7.1809E-01	667	4.3179E-02	814	1.7968E-06
521	7.3516E-01	668	4.0508E-02	815	1.6932E-06
522	7.5118E-01	669	3.7984E-02	816	1.5960E-06
523	7.6631E-01	670	3.5600E-02	817	1.5049E-06
524	7.8074E-01	671	3.3349E-02	818	1.4193E-06
525	7.9465E-01	672	3.1223E-02	819	1.3386E-06
526	8.0821E-01	673	2.9218E-02	820	1.2626E-06
527	8.2138E-01	674	2.7326E-02	821	1.1908E-06
528	8.3407E-01	675	2.5542E-02	822	1.1230E-06
529	8.4617E-01	676	2.3861E-02	823	1.0592E-06
530	8.5758E-01	677	2.2279E-02	824	9.9895E-07
531	8.6824E-01	678	2.0790E-02	825	9.4225E-07
532	8.7831E-01	679	1.9392E-02	826	8.8888E-07
533	8.8799E-01	680	1.8079E-02	827	8.3867E-07
534	8.9752E-01	681	1.6848E-02	828	7.9145E-07
535	9.0714E-01	682	1.5692E-02	829	7.4708E-07
536	9.1700E-01	683	1.4605E-02	830	7.0539E-07

Příloha 3 – Obsah přiloženého CD

Přiložené CD obsahuje tyto soubory:

<i>Soubor</i>	<i>Popis</i>
Bachelors_thesis.pdf	Bakalářská práce v elektronické formě
Daylight_and_illuminance.xlsx	Excel s vytvořenými funkcemi
porovnani.xlsx	Porovnání výpočtů doc. Daruly s výpočty dle ČSN
ukazky.xlsx	Ukázky použití vytvořených funkcí
Evmanipulate.nb	Hodnota přepočtené sluneční světelné konstanty
e.nb	Korekční činitel excentricity v průběhu roku
declination.nb	Porovnání deklinace Slunce dle různých norem
Tvmanipulate.nb	Zeslabení slunečního světla v atmosféře