Slunce jako významný přírodní zdroj světla v budovách

doc. Ing. Richard KITTLER, DrSc,
doc. Ing. Stanislav DARULA, CSc.
SAV – Ústav stavebníctva a architektúry, Bratislava
Ing. Lenka JANEČKOVÁ
ČVUT v Praze – Fakulta stavební

Předpokladem hodnocení a využívání slunečního světla v budovách a simulování jeho celoročního průběhu je získání základních informací o změnách slunečního a oblohového světla a vlastnostech atmosféry. Světelný činitel zákalu je parametr, který charakterizuje zeslabení slunečního světla při přechodu atmosférou, umožňuje analyzovat sluneční situace a předurčuje úroveň vnější přímé osvětlenosti. V příspěvku jsou analyzovány a diskutovány výsledky měření denního osvětlení pořízené během jasných dní na CIE IDMP stanici v Bratislavě.

The Sun as a significant natural light source in buildings

Basic information about changes in sunlight and skylight and the properties of the atmosphere is needed for the evaluation and utilisation of sunlight in buildings and for the simulation of its yearly patterns. The luminous turbidity factor is a parameter characterising the attenuation of sunlight during its transmission through the atmosphere. It allows analysing sunny situations and predetermines exterior direct solar illuminance. The results of daylight measurements taken at the CIE IDMP station in Bratislava on clear days are analysed and discussed in the article.

Úvod

Již v pravěku se primitivní lidé ve své pravlasti, rovníkové Africe, podřizovali pravidelnému rytmu dne a noci, tzv. cirkadiálnímu rytmu života. Změny v postavení Slunce na obloze se stávaly nejen spolehlivým ukazatelem času, usnadňovaly orientaci v terénu, navigaci na moři, ale i využití sluneční energie a denního světla v budovách [1]. Při stěhování na nová území pak pozorovali časové a zeměpisné zvláštnosti celodenních a celoročních drah Slunce. V pokročilejším stadiu vývoje civilizace pak přišli na možnost využití geometrie ke konstruování slunečních hodin.

V období první sumerské civilizace se poznatky z geometrie slunečního stínu uchovávaly na hliněných klínopisných tabulkách. Podobné v „archivním skladu“ babylonského chrámu boha Mardoka v letech 258-253 př. n. l. je objevil kněz chrámu Bérósos (Bel-re ušumu). Po přestěhování na ostrov Kos se zaobíral astronomií a zde zkonstruoval sluneční hodiny [2] ve tvaru duté kamenné polokoule s kružnicemi rovnodennosti a slunovratu.

Poznatky o pohybu Slunce zpřesnil pro deskriptivní sestrojování drah v řezu oblohové hemisféry Vitruvius [1] pod názvem „analemma“. To již umožňovalo ve vybraných lokalitách definovat výšku slunce v libovolném čase dne a roku. V období římské říše ještě neuměli stanovit polohu lokality ve stupních zeměpisné šířky, odvozovala se podle měření gnomonu ve dnech rovnodennosti (tj. délky stínu vertikální tyčky s v poměru k její výšce g). Vitruvius určil s/g například pro Řím 8/9 a pro Atény 3/4. Po objevení rukopisných přepisů v klášterech Saint Gallen a Monte Cassino v letech 1414 a 1445, krátce po vynalezení knihtisku, byla tato kniha vydána vícekrát v Itálii v latině a v překladech v mnoha dalších zemích. S rozvojem astronomie a trigonometrie se podařilo v 16. století definovat sluneční souřadnice na základě sférické trigonometrie podle tří bodů na oblohové hemisféře, a to podle lokálního zenitu, směru osy zemské rotace a časového momentálního směru slunečního paprsku. Tím je v současnosti umožněno velmi přesné programování výšky a azimutu slunce pro počítačové aplikace [3].

Navzdory částečným poznatkům o slunečním spektru se až Newtonovi při pozorování duhy podařilo rozložit a opět složit bílé světlo na monochromatické složky. Citlivost lidského oka ve viditelném spektru elektromagnetického záření zjistil teprve v 19. století König [4], což následně objasnilo možnost měření přírodního světla subjektivními fotometry, tzn. jasem, světelným tokem a osvětleností. Průkopník fotometrie Bouguer [5] se pokusil definovat tok slunečního světla atmosférou a zjistil přibližné zeslabení (extinkci) slunečního světla při zenitním postavení slunce. Tehdy sluneční paprsky přecházely nejmenší hloubkou atmosféry při úplně jasné a průzračné obloze, tzn. tak se zavádí její optická tloušťka $m = 1$ s nejmenší extinkcí $a_v \approx 0{,}1$. Dále se zaobíral vlivem zvětšení optické hloubky atmosféry při libovolné výšce slunce a již v roce 1726 dospěl k přesné závislosti, která se shoduje s tabulkami Bemporada z roku 1904 a vzorcem Kastena a Younga z roku 1989 [6]. Na základě Bouguerových měření a matematické formulace podle Lamberta se dala vypočítat sluneční osvětlenost na zemském povrchu v poměru k extraterestriální světelné konstantě, který známe v exponenciálním tvaru

$$\frac{E_n}{E_{vo}} = \frac{E_{vs}}{E_v} = \exp(-a_v m T_v)\,, \qquad (1)$$

kde E_n je osvětlenost paralelními slunečními paprsky na rovině kolmé k paprskům, resp. $E_{v,s}$ je osvětlenost slunečními paprsky na horizontální rovině, obě na zemském povrchu;

E_{vo} – extraterestriální osvětlenost slunečními paprsky na rovině kolmo k paprskům, resp. E_v je extraterestriální osvětlenost na fiktivní horizontální rovině umístěné na vnější hranici atmosféry;

a_v – světelný extinkční koeficient, závislý na relativní optické tloušťce atmosféry m;

m – relativní optická hloubka atmosféry, závislá na momentální výšce slunce;

T_v – světelný činitel zákalu atmosféry, vyjadřující momentální znečištění atmosféry, stínění slunečního světla ve směru dopadajících paprsků a stínění oblaky [7].

Světelná solární konstanta

Navzdory poznatkům o rozkladu bílého světla na monochromatické složky zjistil citlivost lidského oka v celém

spektru až koncem 19. století König [4]. Ta je dnes normována průběhem relativních funkcí světelné účinnosti $V(\lambda)$. Současně se však již začátkem 18. století začala měřit intenzita světla, jas i osvětlenost subjektivními fotometry na základě porovnávání očima. Tehdy ještě nebylo známé skutečné spektrum slunečního záření nad zemskou atmosférou, tzn. extraterestriální sluneční konstanta, její spektrální složení a roční průběh. Podle měření na letadlech a družicích se teprve nedávno ustálil rozsah a podrobné rozložení slunečního spektra [8] a ustálila se hodnota solární konstanty (Solar Constant) E_{eo} = 1366,1 W·m^{-2}, což později umožnilo její korekce světelnou citlivostí lidského oka podle $V(\lambda)$ ve světelné oblasti spektra 380-780 nm. Tak se dospělo k průměrné hodnotě světelné solární konstanty *LSC* (Luminous Solar Constant) ve dnech průměrné vzdálenosti Země od Slunce 149,5 Mkm, tj. ve dnech 3.IV. a 15. X. [9]. Pro praktické účely se dosud používá hodnota E_{vo} = 133,8 klx = 133 800 lx [10]. Vlivem ročních změn ve vzdálenosti Země od Slunce v rozmezí 147 až 152 Mkm se v každém dni koriguje aktuální hodnota *LSC* v rozmezí ±3,3 % podle čísla dne v roku *J,* vzorcem (2) pro výpočet činitele excentricity ε. V technické praxi se doporučuje použití vztahu podle [11]

$$\varepsilon = 1 + 0{,}034 \cos\left[\frac{360^\circ}{365}\left(J - 2^\circ\right)\right]. \qquad (2)$$

Hodnoty *SC* a *LSC* představují zářivý tok a světelný tok, resp. ozářenost a osvětlenost plochy 1 m^2 při kolmém dopadu paprsků na vnější hranici atmosféry. Pro určitou lokalitu je specifičtější jejich horizontální ozářenost $E_e = SC\,\varepsilon \sin\gamma_s$ a osvětlenost $E_v = LSC\,\varepsilon \sin\gamma_s$, kde γ_s je výška Slunce.

Hodnocení slunečního světla po průchodu atmosférou

Podle historického vzorce (1), který přibližně platil pro celý spektrální rozsah slunečního záření, se zpřesňovaly jeho jednotlivé parametry. Hodnoty extinkce a_v a optické tloušťky atmosféry m se mění podle momentální výšky slunce v aktuálním čase a místě měření nebo posuzování budovy [12].

Víme, že světlo procházející atmosférou může být zeslabeno různými plyny, aerosoly, vodní párou, smogem nebo zastiňujícími oblaky. Pro praxi je tento vliv vyjádřen relativním činitelem světelného zákalu atmosféry ve směru slunečních paprsků T_v. Zákal atmosféry je podle normy dán absolutně čistou a suchou atmosférou, přičemž platí T_v = 1. Každé zvýšení proto znamená počet takových čistých filtrů, které v daném čase stojí v cestě slunečním paprskům, než dopadnou na zemský povrch. Pro určení hodnoty T_v je problém měřit kolmou přímou sluneční osvětlenost E_n trekovacím fotometrem, jehož senzor je stíněn válcovým nástavcem od oblohového světla a jenž časově sleduje polohu slunce. Jednodušší je měřit horizontální globální osvětlenost $E_{v,g}$ (od slunce a oblohy) nezastíněným senzorem fotometru, a současně zaznamenávat difúzní horizontální osvětlenost $E_{v,d}$. Z těchto hodnot lze popsat horizontální sluneční složku [13], kterou způsobují jen sluneční paralelní paprsky $E_{v,s} = E_{v,g} - E_{v,d}$. Na základě těchto dat můžeme určit momentální relativní činitel světelného zákalu T_v úpravou vztahu (1)

$$\mathrm{Tv} = \frac{\ln(LSC\varepsilon) - \ln E_n}{a_v m} = \frac{\ln E_v - \ln E_{v,s}}{a_v m} \qquad (3)$$

nebo pro lokality s vyšší nadmořskou výškou v možno tento vztah zpřesnit podle [14] následovně

$$T_v = \frac{\ln(LSC\varepsilon \sin\gamma_s) - \ln\left(E_{v,s} - E_{v,d}\right)}{a_v m}\,(1 - 0{,}1\,v)\,, \qquad (4)$$

kde v je nadmořská výška místa [km].

Zákal atmosféry je jedním z nejdůležitějších činitelů ovlivňujících dynamiku přechodu slunečních paprsků atmosférou. To znamená, že jeho hodnota se mění od úplně čisté a suché zimní atmosféry v jasném dni v rozsahu T_v od 2 do 4 až po atmosféru úplně zamračenou, kdy se světelný činitel zákalu zvyšuje na úroveň 40-72, což znamená vyloučení paralelních paprsků. Měřením během zamračeného dne získáme jen $E_{v,g} = E_{v,d}$ a $E_{v,s} = 0$. Současně to znamená stav zastínění slunce takovým počtem vrstev filtrů, které výrazně rozptylují paprsky a částečně snižují intenzitu difúzního světla oblohy. Zákal současně ovlivňuje rozptylové indikatrice slunečního světla v různých směrech oblohy, a tím ovlivňuje rozložení jasu na hemisféře oblohy [12]. Tato problematika však patří již do charakteristiky oblohy jako sekundárního přírodního světelného zdroje.

Vyhodnocení světelného činitele zákalu

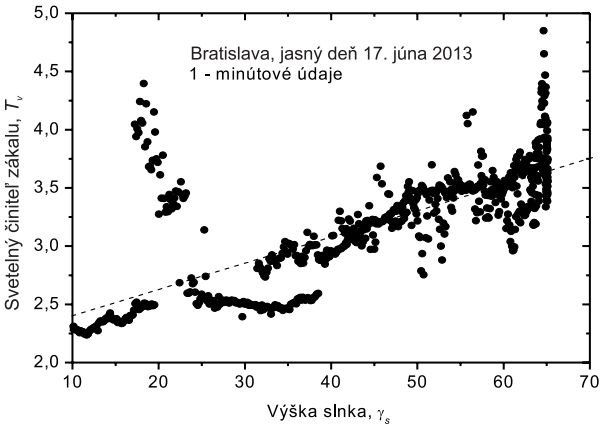
Charakteristiky slunečního světla, zejména světelného činitele zákalu, lze zkoumat nejlépe během jasného bezoblačného dne. Interiéry budov jsou osvětlovány nejen v takové dny, ale i když na obloze plavou oblaky a slunce svítí. Během jasného letního dne s osvětleností 20-120 klx byly komparativní metodou kalibrovány dva luxmetry s datalogery podle referenčního úředně kalibrovaného luxmetru. Pro první luxmetr s označením č. 14 byla kalibrační konstanta k = 0,8725, pro druhý s označením č. 15 konstanta k = 0,9971. Pro sledování změn světelného činitele zákalu T_v byly dobré podmínky. Venkovní osvětlení se měřilo na plošině stanice CIE IDMP na střeše Ústavu stavebnictví a architektury SAV. Senzory obou luxmetrů byly upevněny na stativy a srovnány do horizontální roviny (*obr. 1*).

Obr. 1. Luxmetry se senzory měřící horizontální globální a difúzní osvětlenost

Luxmetrem č. 14 se měřila globální osvětlenost $E_{v,g}$, tzn. společný účinek přímého slunečního a oblohového osvětlení. Senzor luxmetru č. 15 byl zastíněn terčíkem, který byl plynule posouván, aby zastínil jen přesný kruhový tvar disku Slunce. Tímto luxmetrem se zaznamenávala pouze oblohová difúzní osvětlenost $E_{v,d}$. Snímání dat v obou přístrojích probíhalo v intervalu 2 s, poté byla data uložena do počítače a připravena k vyhodnocování. Ze souboru byly vybrány okamžité údaje

naměřené v intervalu 1 minuty, testy však prokázaly, že trval přibližně jen 55 s, a proto musel být zjištěn skutečný čas a podle něj vypočítána výška slunce.

Po zjištění skutečných hodnot globální horizontální osvětlenosti $E_{v,g}$ a difúzní horizontální osvětlenosti $E_{v,d}$ bylo možné vyjádřit činitel světelného zákalu atmosféry ve směru slunečních paprsků T_v pro konkrétní čas měřený dne 17. června 2013 dle vztahu (5) bez započítání nadmořské výšky.



Obr. 2. Změny světelného činitele zákalu [15]

Výsledky výpočtu činitele T_v v závislosti na výšce slunce γ_s jsou znázorněny na *obr. 2*. Hodnoty T_v se pohybují mezi 2,3-4,5, což odpovídá městskému prostředí, avšak v podmínkách ideálně čisté atmosféry by se neměly s jeho výškou měnit. V reálných podmínkách je činitel T_v ovlivňován i momentálními vlastnostmi atmosféry, které se výrazně projevují v hodnotách světleného extinkčního koeficientu a_v, jenž ve skutečnosti charakterizuje pohltivé vlastnosti atmosféry, kde má nemalý význam také vlhkost. Vzorky, dokumentující stav reálné oblohy na počátku měření kolem oběda i odpoledne, jsou patrné z *obr. 3*. Byly pořízeny fotoaparátem Nikon D80 s kruhovým fisheye objektivem Sigma 4,5 mm F2.8 EX DC. Je zřejmé, že dopoledne byl bezoblačný den s homogenním rozložením oblohových jasů symetrickým kolem slunečního meridiánu. Před obědem se začala vyvíjet kupovitá oblačnost (*obr. 3b*), vyznačující se místním nahromaděním oblaků. Kolem poledních hodin je proto možné při vyšší výšce slunce pozorovat zvyšování činitele T_v právě vlivem zvyšující se vlhkosti v atmosféře a difúzní složky denního osvětlení. Ten den bylo extrémní horko, oblačnost s typickými kupovitými oblaky se během poledne dále nerozvíjela, naopak se rozplynula a

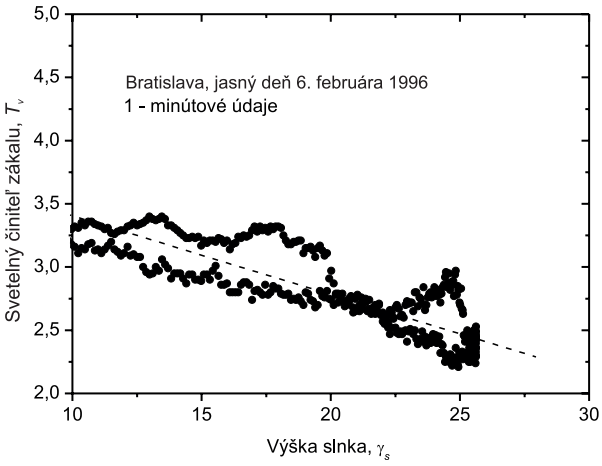
a)

b)

c)

Obr. 3. Vývoj jasových vzorků obloh počasí jasného dne (17. 6. 2013)
a – 11:11 h; *b* – 13:59 h; *c* – 16:59 h

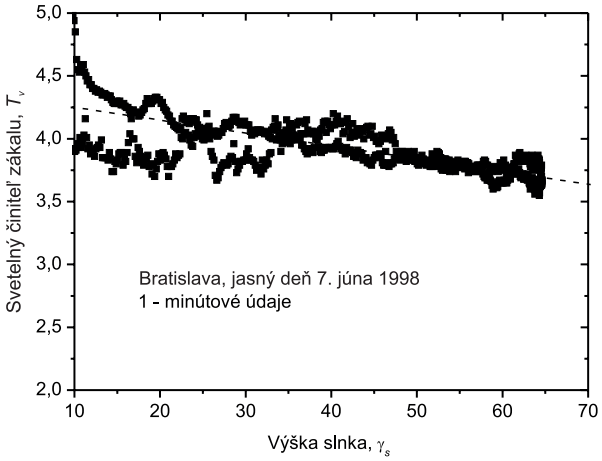
k pozdnímu odpoledni a večeru byl opět jasný den jako dopoledne (*obr. 3c*). Nad střední Evropou se přesouval na východ vzduch vyššího tlaku a na naše území proudil velmi teplý, původem saharský vzduch, ve kterém se vytvářely intenzívní bouřky za extrémní denní teploty. V Bratislavě bouřky nebyly, zato venkovní teplota vystoupila na 36 °C.



Obr. 4. Denní průběh světelného činitele zákalu 6. února 1996 [15]

Abychom vliv slunce na změny a dynamiku denního osvětlení nehodnotili jen na základě jednoho měření, byly náhodně vybrány z databáze stanice CIE IDMP v Bratislavě další dva jasné dny staršího data, jeden ze zimního a druhý z letního období. Všechny vybrané dny mají podobný průběh globální a difúzní horizontální osvětlenosti. Denní průběh činitele T_v, vypočtený z dat naměřených během jasného zimního dne (6. února 1996), je dokumentován na *obr. 4*. Evidentní rozevření křivek naznačuje, že i když bylo celý den jasno, v dopoledním a odpoledním čase byly výrazně odlišné atmosférické podmínky. Podle záznamů Slovenského hydrometeorologického ústavu v Bratislavě [15] byla pro den 6. února 1996 povětrnostní situace klasifikována typem Ap4, putující anticyklóna, kterou charakterizují jádra vysokého tlaku pronikající z grónské oblasti přes Karpaty na Balkán s krátkou dobou trvání. Toho dne se vyskytovala kolem oběda oblačnost závojového typu Ci s pokrytím 2/10, která mohla ovlivnit trend zákalů atmosféry.

Podobný klesající trend jednominutových hodnot činitele T_v v závislosti na výšce slunce se projevil i u dat naměřených během jasného letního dne 7. června 1998 (*obr. 5*). Rozevření je patrné jen na začátku a na konci dne, avšak kolem oběda byly podmínky atmosféry stabilní, bez výraznějších změn. V obou dnech se vyšší zákal atmosféry vyskytoval při nižší výšce slunce, tj. dopoledne a odpoledne, což souvisí s povětrnostní situací. Ve zmíněný den byla cirkulace vzdušných hmot odlišná v porovnání s 6. únorem 1996. Situace pro tento den je klasifikována jako Sa, jižní anticyklonální situace s mohutným hřebenem vysokého tlaku vzduchu, sahajícím ze severní Afriky přes střední Evropu k severu. V ten den proudil suchý saharský vzduch na naše území z jihu až jihovýchodu.



Obr. 5. Ranní a odpolední průběh světelného činitele zákalu 7. června 1998 [15]

Porovnání tří jasných dnů v různém ročním období s odlehlým datem naznačují, že i během jasného dne se může vyskytnout malá oblačnost v horních a středních patrech atmosféry, která se nemusí výrazněji projevit v denních sekvencích globální venkovní osvětlenosti. Při detailnějším studiu slunečního světla jako zdroje přímého osvětlení je třeba zohlednit také vliv denního zákalu atmosféry, neboť poskytuje informaci o propustnosti světla atmosférou a jeho hodnota je stabilní v krátkých časových intervalech.

Závěr

V současnosti se výzkum v oblasti návrhu a posuzování denního osvětlení budov soustřeďuje na zjišťování skutečných světelných podmínek, aby se dala definovat kritéria a pravidla pro projektování a energetické bilance budov. Je možné sledovat dva přístupy, jeden na národní úrovni, druhý se širšími souvislostmi na mezinárodní úrovni. Při prvním přístupu se často definování světelných podmínek redukuje na referenční situace, např. rovnoměrně zamračenou oblohu, ve druhém případě je snaha využívat světelné podmínky v různých lokalitách obecněji. To vyžaduje zkoumat vlastnosti světleného klimatu, jako celoroční dostupnost osvětlení během jasných, zamračených a oblačných dnů a vlivy, které jsou v dané lokalitě rozhodující. Mezi parametry, které osvětlení ovlivňují, patří světlený činitel zákalu atmosféry. Studie prokazuje, že může nabývat dvou tendencí, stoupající a klesající, přičemž je patrný rozdíl mezi dopoledním a odpoledním průběhem v závislosti na vlastnostech atmosféry.

Při celoročních simulacích a hodnocení přímého slunečního osvětlení může činitel světelného zákalu poskytnout poměrně dobré informace o změnách vnějších světelných podmínek během slunečních dní.

Článek vznikl za podpory projektů VEGA 2/0029/11, APVV-0177-10 a programu LLP - Erasmus 2012-2013.

Literatura

[1] Vitruvius, M. P.: De architectura libri decem. MS 13 pred Kr., tiskem vyšlo 1487. (Vitruvius, deset knih o architektuře – překlad A. Otoupalika. Praha, Svoboda 1979).
[2] Kittler, R. – Darula, S.: Historická dôležitosť solárnej geometrie pre orientáciu v čase, priestore a architektúre. Architektúra urbanizmus, **42**, 2008, č. 3-4, s. 159-165.
[3] Kittler, R. – Darula, S.: Determination of time and sun position system. Solar Energy, **93**, 2013, pp.72-79.
[4] König, A.: Über den Helligkeitswert der Spektralfarben bei verschiedener absoluter Intensität. 1891.
[5] Bouguer, P.: Comparaison de la force du soleil, de la lune et des plusieurs chandelles. Histoire de l´Acad. Roy. des Science, Paris 1726.
[6] Kasten, F. – Young, A. T.: Revised optical air mass tables and approximation formula. Applied Optics, **28**, 1989, No. 22, pp. 4735-4738.
[7] Tregenza, P. – Wilson, M.: Daylighting. Architecture and lighting design. London, Routledge 2011.
[8] Gueymard, CH.: The sun´s total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. Solar Energy, **76**, 2004, No. 4. pp. 423-453.
[9] Kittler, R. – Mikler, J.: Základy využívania slnečného žiarenia. Bratislava, Veda 1986, s. 24-27.
[10] Darula, S. – Kittler, R. – Gueymard, CH.: Reference luminous solar constant and solar luminance for illuminance calculations. Solar Energy, **79**, 2005, pp. 559-565.
[11] Illuminating Engineering Society of North America: Lighting Handbook. 9th Edition, New York, IESNA 2000.
[12] Kittler, R. – Kocifaj, M. – Darula, S.: Daylight science and daylighting technology. New York, Springer 2012, pp. 56.
[13] Darula, S. – Mohelníková J.: Syntetický průběh venkovní osvět-lenosti. Stavební obzor, **8**, 2009, č. 7, s. 204-209. ISSN 1210-4027
[14] Kittler, R.: A universal calculation method for simple predetermination of natural radiation on building surfaces and solar collectors. Building and Environment, **16**, 1981, No. 3, pp. 177-182.
[15] www.shmu.sk/sk/?page=98 Typy povětrnostních situací