NEVIZUÁLNE SVETELNÉ PROSTREDIE V BUDOVÁCH

NON-VISUAL LIGHTING ENVIRONMENT IN BUILDINGS

Tomáš Josai^{*,1}

^{*}tomas.josai@stuba.sk

¹Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Abstrakt

Denné svetlo zohráva významnú úlohu pri dosahovaní úspor energie a vizuálneho pohodlia v budovách. Je v súlade s ľudskými cirkadiánnymi rytmiami a umožňuje najlepšie vizuálne podmienky v pracovnom prostredí a v obytných budovách. Vzhľadom na dynamiku života v súčasnej modernej spoločnosti ľudia trávajú v interiéroch stále viac času. V dôsledku toho sa vystavujeme čoraz menej času priamemu dennému svetlu. Táto skutočnosť zvyšuje dôležitosť vhodne navrhnutého vnútorného svetelného prostredia. Rôznorodosť geometrických vlastností priestoru, ale aj optických vlastností stavebných materiálov výrazne komplikuje zjednodušený pohľad na hodnotenie cirkadiálneho potenciálu v budovách. Tento fakt poukazuje na skutočnosť, že nielen kvantitu, ale aj kvalitu (t.j. spektrálne zloženie svetla) vnútorného svetelného prostredia je potrebné vhodne riešiť.

Klíčová slova

Nevizuálne efekty svetla, ekvivalentná melanopická osvetlenosť, cirkadiánný stimul, cirkadiálne svetlo

Abstract

Daylight plays an important role in achieving energy savings and visual comfort in buildings. It conforms to human circadian rhythms and provides the best visual conditions in the work environment and residential buildings. Due to the dynamics of life in today's modern society, people are spending more and more time indoors. As a result, we are exposed to less and less time directly in daylight. This is true depending on the appropriateness of the indoor lighting environment. The diversity of geometric properties of the space, but also the optical properties of building materials significantly complicate the simplified view of the evaluation of the circadian potential in buildings. This fact points to the fact that not only the quantity but also the quality (i.e., colour spectrum of light) of the indoor light environment needs to be properly addressed.

Key words

Non-visual light effects, equivalent melanopic illuminance, circadian stimulus, circadian light

1 ÚVOD

V súčasnej dobe sú nevizuálne efekty svetla na človeka čoraz viac rozoberanou témou. Rôznorodosť geometrických vlastností priestoru, ale aj optických vlastností stavebných materiálov výrazne komplikuje zjednodušený pohľad na hodnotenie cirkadiálneho potenciálu v budovách [1]. Podľa súčasných noriem a legislatívy v Slovenskej republike stále absentuje jednoznačný pohľad na implementovanie výskumov v oblasti melanopického svetla do právnych predpisov.

Svetlo vplýva nielen na vizuálne, ale aj nevizuálne reakcie ľudského tela, pomocou osobitnej nevizuálnej dráhy v mozgu prepojenou s vnútorne fotocitlivými gangliovými bunkami sietnice oka (Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells - ipRGC) [2]. Na rozdiel od maximálnej citlivosti vizuálneho systému pri 555 nm bolo stanovené, že nevizuálny systém má maximálnu citlivosť okolo 480 nm, v oblasti modrého a zeleného svetla [3], [4] – Obr. 1. Bolo zistené, že ak na človeka pôsobí vysoká úroveň osvetlenosti, najmä v oblasti modrého, zeleného ale aj širokospektrálneho svetla, tak spôsobuje zvýšené potlačenie melatonínu, ktorý indukuje cirkadiálne fázové posuny [5]. Ľudský denný cyklus je synchronizovaný s 24 hodinovým astronomickým cyklom, ktorý sa neustále resetuje, ak je človek vystavený dennému svetlu [6]. Je potrebné však podotknúť, že nevizuálne reakcie na svetlo nezávisia výlučne len od intenzity a spektrálneho zloženia svetla, ale aj od jeho časových charakteristík a dĺžky pôsobenia na ľudský organizmus [7]. Asynchronicita vnútorných ľudských hodín, môže viesť k mnohým zdravotným problémom, ako napr. poruchy spánku, cukrovka, kardiovaskulárne ochorenia, dokonca aj rakovina

[8]. Svetlo neovplyvňuje iba priamy fyziologický stav človeka, ale má vplyv aj psychologické aspekty, ako sú nálada, bdelosť, depresia a iné [9], [10].

2 METODIKY MERANIA NEVIZUÁLNEHO PÔSOBNIA SVETLA

Vzhľadom na to, že reakcie ľudského vizuálneho a nevizuálneho systému sa líšia, bolo potrebné navrhnuť spôsoby ako kvantifikovať nevizuálne efekty svetla. Viaceré metriky boli navrhnuté na základe potlačenia akčného spektra melatonínu [11]. V odbornej literatúre sú najčastejšie uvádzané ekvivalentné alfa-opické luxy a cirkadiánne stimuly.

Ekvivalentné alfa-opické luxy (alfa je uvažovaný fotopigment) fungujú na takom princípe, že dopadajúce žiarenie vnímané okom sa vynásobí krivkou odozvy daného fotopigmentu. Keďže v prípade nevizuálneho systému je stredobodom pozornosti sekrecia melatonínu, tak nevizuálny efekt svetla je vyjadrený ekvivalentným melanopickým luxom (EML) [12]. Takúto metódu odporúča používať aj Medzinárodná komisia pre osvetlenie (CIE) a rovnako aj certifikačný štandard budov WELL [13]. Vzťahy (1) a (2) pre výpočet fotopickkej a ekvivalentnej melanopickkej osvetlenosti sú nasledovné:

$$E_v = 683 \int P(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$E_m = 4557 \int P(\lambda) \cdot s_m(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

kde E_m je ekvivalentná melanopická osvetlenosť [lx], E_v fotopická osvetlenosť [lx], $V(\lambda)$ funkcia fotopickkej spektrálnej citlivosti ľudského oka s max. pri 555 nm [-], $s_m(\lambda)$ funkcia melanopickkej spektrálnej citlivosti ľudského oka s max. pri 490 nm [-] (podľa CIE), $P(\lambda)$ spektrálna ožiarenosť [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{nm}$] [14].

Obr. 1 Kvantifikácia svetla pomocou piatich fotoreceptorov [15].

Druhá metrika je navrhnutá na základe cirkadiánných stimulov (CS) alebo na základe cirkadiálneho svetla (CLA) [16]. Melanopická citlivosť je upravená podľa spektrálnej priepustnosti očných šošoviek pre modro-žltú farbu v dôsledku účasti iných fotoreceptorov. Je normalizovaná tak, aby osvetlenie 1000 lx pri CCT (náhradná teplota chromatickosti, ang. color temperature) 2856 K zodpovedala 1000 CLA. Cirkadiánný stimul predstavuje nočné potlačenie melatonínu vyjadrené ako pomer vypočítaný na základe CLA, kde CS rovný 0,3 zodpovedá približne 275 CLA a spôsobuje 30% supresiu melatonínu v noci [16], [17] – Obr. 2. Úroveň CS rovná alebo vyššia ako 0,3 bola pri niekoľkých uskutočnených štúdiách [18], [19] vyhlásená ako hranica na zníženie ospalosti, zvýšenie bdlosti a výkonnosti zamestnancov na pracovisku. Je potreba však podotknúť, že definícia CS nezohľadňuje časový vplyv pôsobenia svetla na zrenicu oka, ktorý pri priaznivom pôsobení, môže skresľovať celkový CS.

Obr. 2 Vplyv osvetlenia na potlačenie melatonínu [1].

3 NEVIZUÁLNE SVETELNÉ PROSTREDIE BUDOV

Vzhľadom na dynamiku života v súčasnej modernej spoločnosti ľudia trávajú v interiéroch stále viac času. V dôsledku toho sa vystavujeme čoraz menej času priamemu dennému svetlu. Táto skutočnosť zvyšuje dôležitosť vhodne navrhnutého vnútorného svetelného prostredia, ktorého význam je obzvlášť dôležitý pre ľudí s rôznymi zdravotnými problémami [20]. Takéto skupiny ľudí sa vyznačujú odlišnou výškou a tiež smerom pohľadu pozorovateľa, najmä ak väčšinu času trávajú na lôžku. Ďalšou zraniteľnou skupinou ľudí je staršia populácia, ktorá kvôli zožltnutiu očnej šošovky dostáva menej modrého svetla [21]. Štúdia [22], ktorá sa venovala špecifikám takýchto prostredí ako v prípade geriatrického zariadenia dokázala, že prítomnosť vyšších dávok denného svetla znamenala vyšší cirkadiánný potenciál ako pri porovnateľných dávkach osvetlenia, ktoré bolo dosiahnuté umelým osvetlením. Tento fakt poukazuje na skutočnosť, že nielen kvantitu, ale aj kvalitu (t.j. spektrálne zloženie) vnútorného svetelného prostredia je potrebné vhodne riešiť. Zmenou farby steny a/ alebo zdroja svetla je možné dosiahnuť podstatne odlišné rohokové alfa-opické osvetlenie, vizuálny komfort a aj spotrebu elektrickej energie z osvetlenia. Povrchy s rovnakou vizuálne váženou odrazivosťou môžu v skutočnosti vyvolávať nevizuálne potenciály, napr. ak by miestnosť s modrými a miestnosť s červenými stenami mali rovnakú vizuálnu odrazivosť, tak v miestnosti s modrými stenami by bol výrazne vyšší melanopický potenciál ako v miestnosti s červenými stenami [23]. V prípade, ak by sa uvažovalo len s odrazeným komponentom denného svetla, tak dominantnú úlohu v miestnosti pre CS by zohrávali iba nepriehľadné povrchy. Samozrejme porovnateľný vplyv na zloženie svetla v miestnosti má aj spektrálna priepustnosť zasklenia. Najvyššie nevizuálne potenciály sú zaznamenané pri

kombináciách dvojskiel a stien sfarbených na modro. Naopak, pre bronzovo tónované zasklenia a steny natreté oranžovou farbou boli zaznamenané najvyššie nevizuálne potenciály [24].

Celkové cirkadiánne charakteristiky svetelného prostredia môžu byť tiež ovplyvnené pomerom okna k stene (ang. WWR- window to wall ratio), aplikáciou tieniaceho zariadenia a úpravou smeru pohľadu pozorovateľa [20], [25]. Uvedené skutočnosti poukazujú na to, že na výsledný cirkadiánny potenciál vplyva viacero faktorov, ako je napr. veľkosť miestnosti (výška, šírka a hĺbka), materiál stien (neprievitných povrchov vo všeobecnosti) a okna, orientácia pohľadu, pomer okna k stene.

4 VPLYV GEOMETRICKÝCH A OPTICKÝCH VLASTNOSTÍ MIESTNOSTI

Jedna z najnovších štúdií [26], ktorá hodnotila súčasne účinky viacerých geometrických a optických parametrov miestnosti ukázala, že okno ako stavebný prvok má zo všetkých stavebných konštrukcií najvýznamnejší vplyv na vizuálne a nevizuálne podmienky vnútorného prostredia budov. Táto štúdia bola vytvorená na základe parametrického simulačného modelu, kde sa sledovali tieto parametre: pomer okna k stene WWR a vizuálna priepustnosť zasklenia tv. Geometrický model miestnosti bol vytvorený pomocou programu Rhinoceros 6 [27], pričom samotná simulácia spektrálneho svetelného prostredia prebiehala v programe Alfa [28] – Obr. 3. Modelová miestnosť má funkciu kancelárie, ktorej sa počas simulácie menili pôdorysné rozmery, pričom výška miestnosti bola konštantná.

Obr. 3 Príklad geometrického modelu miestnosti so zadávanými parametrami a smermi pohľadov v meraných bodoch [26].

Modelovaná kancelária má jedno okno orientované na sever s pevnou výškou parapetu 0,85 m. Parameter WWR sa pri simulácii pohyboval v rozmedzí 20 - 40 %, pôdorysné rozmery miestnosti a , b sa pohybovali v rozmedzí 3 až 8 m. Priestor kancelárie bol po hĺbke rozdelený rovnomerne do 3 zón. Vyhodnocovanie výsledkov prebiehalo na rasti bodov vo vzájomnej vzdialenosti 0,5 m a 0,25 m od steny na horizontálnej porovnávacej rovine vo výške 1,2 m od podlahy. Pre každý porovnávací bod boli simulované 4 smery pohľadu v azimute 0° , 90° , 180° a 270° , pričom azimut 0° zodpovedá pohľadu orientovanému k oknu. Vonkajšie spektrálne svetelné podmienky boli generované pomocou softvéru Libradtran [29], ktorý je implementovaný v programe Alfa. Pre simuláciu bol použitý typ rovnomerne zamračenej oblohy s konštantným jasom s úrovňami osvetlenosti pre 21. december (lokalita Ľubľana) od 8:00 do 12:00 [26] – Obr. 4.

Obr. 4 Normalizovaná spektrálna ožiarenosť rovnomerne zamračenej oblohy s konštantným jasom [26].

Na stenách, strope a podlahe interiéru boli použité materiály s difúzne odrážajúcimi matnými povrchmi. Pre ideálny sivý povrch sa odrazivosť sa menila v rozsahu od 0,1 po 0,9, pričom vizuálna a melanopická odrazivosť boli rovnaké. Pre farebné odtiene povrchov sa odrazivosť menila v rozsahu od 0,25 po 0,75, pričom vizuálna a melanopická odrazivosť bola rôzna – Obr. 6. Analogický prístup bol použitý aj pri výbere vlastností pre priehľadné materiály zasklenia. Jedno zasklenie bolo z teoretického materiálu s jednotnou spektrálnou priepustnosťou v rozsahu od 0,1 po 0,9, pričom vizuálna a melanopická priepustnosť boli rovnaké – Obr. 5. Ďalšie zasklenia predstavovali výber zo 7 typických súčasných komerčných systémov zasklení s hodnotami priepustností od 0,302 po 0,82, pričom vizuálna a melanopická priepustnosť bola rôzna. Okrem toho bol ešte posudzovaný prípad bez použitia zasklenia, kde sa uvažovalo s $\tau_v = 1,0$. Jednotlivé kombinácie materiálov sa neposudzovali pre všetky možné kombinácie pôdorysných rozmerov [26].

Simulované spektrálne žiarenie v modelovej kancelárii bolo v predmetnej štúdií [26] vyhodnocované pomocou 3 rôznych metodológií: vážená vizuálna osvetlenie E_v (metodika fotopického luxu podľa CIE, funkcia $V(\lambda)$), vážená melanopická osvetlenie E_m (metodika odvodená pomocou ekvivalentného melanopického luxu podľa [12] a odporúčaní CIE, funkcia $sm(\lambda)$, minimálna hodnota 150 melanopických lx (EML) najmenej 4 hodiny počas dňa podľa WELL Building Standard) a metodika cirkadiálneho svetla CLA (spektrálna ožiarenosť podľa [16][17][18], minimálna hodnota CS = 0,3).

Obr. 5 Hodnoty vizuálnej a melanopickej priepustnosti zasklení [26].

Obr. 6 Hodnoty vizuálnej a melanopickéj odrazivosti vnútorných povrchov [26].

5 HODNOTENIE POMOCOU METÓDY UŽITOČNÉHO DENNÉHO SVETLA (UDI)

Na dosiahnutie vnútornej vizuálnej pohody je potrebné „dostatočné“ množstvo svetla t.z., že príliš vysoké alebo príliš malé množstvo svetla môže spôsobiť vizuálnu nepohodu. Z toho dôvodu bola zavedená interpretácia ročnej úrovne osvetlenia [30] na základe reálnych údajov o počasí. Výpočet horizontálnej osvetlenia denného svetla v každom meranom bode počas určitého časového obdobia poskytuje UDI (užitočné denné svetlo, ang. Useful Daylight Illuminance) percentuálny podiel obsadeného času, keď úroveň osvetlenia spadá do jedného z vopred definovaných rozsahov osvetlenia:

- úroveň osvetlenia nižšia ako adekvátne množstvo denného svetla, ktorá naznačuje, že denné svetlo nemôže byť jediným zdrojom osvetlenia v miestnosti a pre splnenie kritérií bez vizuálneho nepohodlia je potrebné umelé osvetlenie,
- požadovaná úroveň osvetlenia - adekvátne (užitočná) úroveň,
- úroveň osvetlenia vyššia ako je primerané množstvo denného svetla, v ktorej nadmerné zásobovanie denným svetlom pravdepodobne spôsobí vizuálnu nepohodu.

Úroveň osvetlenia považovaná za „užitočnú“ nemá určené žiadne konkrétne hranice, ale je skôr definovaná na základe konkrétnej vizuálnej požiadavky a postoja, preferencií a správania sa pozorovateľov. Vo všeobecnosti sa za minimálnu hranicu považuje rozsah od 100 do 300 lx, v závislosti od minimálnych hygienických požiadaviek jednotlivých krajín na denné osvetlenie. UDI v rozsahu od 300 - 3000 lx, t.j. požadovaný rozsah na denné osvetlenie, je limitované maximálnou hornou hranicou 3000 lx, ktorú definuje neprimerané oslnenie zraku pre kancelárske priestory [14].

Obr. 7 Vyhodnotenie efektívnej cirkadiánnej expozície [26].

Na Obr. 7 je znázornený význam WWR, priepustnosti zasklenia τ_v a odrazivosti stien ρ_v pri určovaní úrovni osvetlenosti pomocou UDI a smeru pohľadu pozorovateľa. Celkovo možno skonštatovať, že v danom modelovom priestore sa vyskytujú prípady s veľmi nízkou nevizuálnou expozíciou a zároveň vysokými hodnotami UDI a prípady s vysokou nevizuálnou expozíciou a zároveň nízkymi hodnotami UDI. Táto asynchrónnosť vizuálnych a nevizuálnych charakteristík vnútorného prostredia je ovplyvnená samotnými optickými vlastnosťami zasklenia a vnútorných povrchov stien, stropu a podlahy. Významnú úlohu pritom zohrávajú jednotlivé farebné odtiene povrchov. Napr. modrá a červená farba môžu mať približne rovnakú vizuálnu odrazivosť $\rho_{v,v} = 0,5$, ale ich vzájomná melanopicky vážená odrazivosť je výrazne rozdielna $\rho_{v,mel} = 0,684$ pre modrú farbu a $\rho_{v,mel} = 0,404$ pre červenú farbu. Rovnaký princíp funguje aj pre rôzne sfarbené zasklenia. Zasklenia sfarbené do odtieňov bronzovej farby budú mať nižšiu melanopicky váženú priepustnosť ako zasklenia sfarbené do zelena [31]. Tento vplyv zasklenia sa zvyšuje s narastajúcim pomerom okna k stenám WWR, keď sa môže stať, že pri úzkych miestnostiach s hodnotami WWR > 40 % odrazivosť stien bude zohrávať len minimálnu úlohu.

Zo zvyšujúcou úrovňou osvetlenosti sa tento vplyv čiastočne eliminuje, čo dokazujú hodnoty namerané v 1. tretine hĺbky miestnosti, kde prakticky skoro všetky smery pohľadu spĺňajú požiadavky na denné osvetlenie (okrem prípadov s veľmi nízkymi hodnotami priepustnosti zasklenia $\tau_v < 0,3$). V druhej a tretej tretine miestnosti zohrávajú výraznú úlohu optické vlastnosti netransparentných povrchov a dokonca v tretej tretine vyhovujú prakticky len pohľady smerom k oknu.

6 ZÁVER

Prirodzená dvojakosť optických vlastností bežných stavebných materiálov môže predstavovať značnú prekážku pre dizajnérov pri hodnotení vizuálnych aj nevizuálnych svetelných charakteristík vnútorného prostredia. Hore rozoberaná štúdia [26] naznačuje nesúčinnosť vizuálnych a nevizuálnych charakteristík vnútorného svetelného prostredia. Materiály s rovnakými vizuálne váženými odrazivosťami alebo priepustnosťami môžu produkovať

výrazne odlišné vizuálne a nevizuálne výsledky, čo už naznačili rôzni vedci [26], [32], [33]. Podľa môjho názoru by mal nastať posun v stavebných predpisoch a normách k špecifikácii melanopicky vážených vlastností, najmä v prípade zasklení a povrchov vo vnútornom prostredí. V prípade plytkých miestností mala venovať zvýšená pozornosť návrhu stavebno-fyzikálnych vlastností okien a v prípade hlbokých miestností by sa mal návrh zameriavať skôr na optické vlastnosti povrchov stien. Na záver je potrebné zdôrazniť, že vplyv všetkých zvažovaných parametrov závisí od uhla pohľadu a hĺbky, čo znamená, že rozhodnutia o návrhu by sa v prvom rade mali riadiť využitím priestoru a geometrie miestnosti.

Podakovanie

Tento príspevok podporili výskumné projekty APVV-18-0174 a VEGA 1/0042/21.

Použité zdroje

- [1] 1 FIGUEIRO, M.G. et al. The impact of daytime light exposures on sleep and mood in office workers. 2017.
- [2] 2 BERSON, D.M. et al. Phototransduction by Retinal Ganglion Cells That Set the Circadian Clock. 2002.
- [3] 3 BRAINARD, G.C. et al. Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. 2001.
- [4] 4 WAHNSCHAFTE, A. et al. Out of the Lab and into the Bathroom: Evening Short-Term Exposure to Conventional Light Suppresses Melatonin and Increases Alertness Perception. 2013.
- [5] 5 WESTLAND, S. et al. A review of the effects of colour and light on non-image function in humans Coloration Technology. 2017.
- [6] 6 TERMAN, B.M. - TERMAN, J.S. Light Therapy for Seasonal and Nonseasonal Depression: Efficacy, Protocol, Safety, and Side Effects. 2005.
- [7] 7 ZAZZINI, P. et al. Experimental analysis of the performance of light shelves in different geometrical configurations through the scale model approach. 2020.
- [8] 8 ROBINSON, D. Residential Magnetic Fields, Light-at-Night, and Nocturnal Urinary 6-Sulfatoxymelatonin Concentration in Women. 2019.
- [9] 9 BROWN, M.J. - JACOBS, D.E. Residential Light and Risk for Depression and Falls: Results from the LARES Study of Eight European Cities. 2011.
- [10] 10 THAPAN, K. et al. An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. 2001.
- [11] 11 BAILES, H.J. et al. Human melanopsin forms a pigment maximally sensitive to blue light. 2013.
- [12] 12 LUCAS, R.J. et al. Measuring and using light in the melanopsin age. 2014.
- [13] xx13 CIE S 026/E:2018 CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light 2018.
- [14] 14 SALAMATI, M. et al. Daylight performance analysis of TiO₂@W-VO₂ thermochromic smart glazing in office buildings. 2020.
- [15] 15 SCHLANGEN, L. Human Centric Lighting needs new quantities for light intensity. 2016.
- [16] 16 REA M., FIGUEIRO M., BIERMAN A., HAMMER R. Modelling the spectral sensitivity of the human circadian system. 2015.
- [17] 17 REA, M.S. et al. A model of phototransduction by the human circadian system. 2005.
- [18] 18 CHEN, X. et al. Glazing type (colour and transmittance), daylighting, and human performances at a workspace. 2019.
- [19] 19 EMDE, C. et al. The Libradtran software package for radiative transfer calculations. 2016.
- [20] 20 ACOSTA I. - LESLIE R. Analysis of circadian stimulus allowed by daylighting in hospital rooms. 2015.
- [21] 21 MELLERIO, J. - STREET, N.C. Yellowing of the human lens: nuclear and cortical contributions. 1987.
- [22] 22 KONIS, K. Field evaluation of the circadian stimulus potential of daylit and non-daylit spaces in dementia care facilities. 2018.
- [23] 23 INANICI, M. et al. Spectral daylighting simulations: computing circadian light. 2015.
- [24] 24 POTOČNIK, J. - KOŠIR, M. In-situ Determined Circadian and Visual Daylighting Potential of an Office. 2019.
- [25] 25 POTOČNIK, J. - KOŠIR, M. Influence of commercial glazing and wall colours on the resulting non-visual daylight conditions of an office. 2020.
- [26] 26 POTOČNIK, J. - KOŠIR, M. Influence of geometrical and optical building parameters on the circadian daylighting of an office. 2021.
- [27] 27 Rhino 6 [WWW document], URL, <https://www.rhino3d.com/6>, 2019.

- [28] 28 LLC Sollemma, Alfa - adaptive lighting for alertness [WWW document], URL, <https://www.sollemma.com/Alfa.html>, 2020. accessed 10.30.20.
- [29] 29 DIJK D. - LOCKLEY S. Functional Genomics of Sleep and Circadian Rhythm. 2013.
- [30] 30 MARDALJEVIC, J. et al. Daylighting metrics: is there a relation between useful daylight illuminance and daylight glare probability? 2012.
- [31] 31 HARTMAN, P. et al. Variation in internal space surface colors and its possible effect on human biological responses in daylight conditions. 2015.
- [32] 32 BELLIA, L. et al. Lighting in indoor environments: Visual and non-visual effects of light sources with different spectral power distributions. 2011.
- [33] 33 CAI, W. et al. The impact of room surface reflectance on corneal illuminance and rule-of-thumb equations for circadian lighting design. 2018.