

**UNIVERZITNÍ
CENTRUM
ENERGETICKY
EFEKTIVNÍCH BUDOV
ČVUT V PRAZE**

**Měření vlivu
pro-kognitivního
osvětlení
na výkonnost
studentů gymnázia,
porovnání
s kontrolní skupinou
studentů**

**Výzkumná zpráva –
stručná verze**

Ing. arch. Lenka Maierová, Ph.D.
Bc. Igor Kytka

červen 2020

Název	Měření vlivu pro-kognitivního osvětlení na výkonnost studentů gymnázia, porovnání s kontrolní skupinou studentů Výzkumná zpráva – stručná verze
Datum	červen 2020
Číslo projektu	8301881V000
Autoři	Ing. arch. Lenka Maierová, Ph.D. Bc. Igor Kytka
Kontaktní osoba	Ing. arch. Lenka Maierová, Ph.D. lenka.maierova@fsv.cvut.cz +420 732 232 090 České vysoké učení technické v Praze Univerzitní centrum energeticky efektivních budov Třínecká 1024 273 43 Buštěhrad www.uceeb.cz

Obsah:

1	MOTIVACE	1
2	CÍLE VÝZKUMU	1
3	DESIGN EXPERIMENTU	1
4	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	2
4.1	Kvalita podání barev a spektrum světla	2
4.2	Biologická účinnost	3
4.3	Subjektivní hodnocení světelného prostředí	3
4.4	Kognitivní výkonnost studentů – testy paměti a soustředění	4
4.5	Meziroční srovnání – klasifikace a absence	5
4.6	Zpětná vazba od učitelů	5
5	Závěr	6
	Literatura	7

1 MOTIVACE

Přirozené denní světlo a sluneční svit má na lidský organismus významný vliv. Pravidelné střídání světla a tmy na Zemi odjakživa a velmi spolehlivě informovalo živé organismy, zda je den či noc, a zda tedy mají být připraveni na aktivitu či odpočinek. Vysoké zastoupení modré a azurové složky ve spektru denního světla synchronizuje vnitřní biologické hodiny organismu [1, 2], čímž podporuje bdělost, schopnost koncentrace, učení se a umožňuje vysokou produktivitu. V podvečer pak naopak teplejší barevný tón a nízká intenzita světla večerního umožňuje vylučování hormonu melatoninu. Vysoká hladina nočního melatoninu v těle podporuje kvalitu spánku a lepší regeneraci organismu. Pokud však máme jasného denního světla nedostatek, je kontrast dne a noci nízký. Naše hodiny mohou běžet nepřesně a signály, které do těla vysílají, jsou nejasné, slabé, chaotické, může docházet k narušení tzv. cirkadiálního rytmu. V dnešní době, kdy 90 % svého času tráví lidé uvnitř budov, pouze s omezeným přístupem přirozeného světla, se může nedostatek jasného světla během dne projevit negativním vlivem na spánek, náladu, kognici, pracovní výkon či zdraví i psychický stav člověka [3, 4]. Vědecké studie také prokazují zvýšenou důležitost synchronizace vnitřních biologických hodin právě u dospívajících, jejichž organismus v tomto věku prochází řadou hormonálních změn [5].

Legislativní požadavky [6] stanoví, že na pracovištích a v učebnách vzdělávacích institucí musí být osvětlení prioritně zajištěno denním světlem. Ne vždy je však možné denní světlo zajistit po celou dobu využívání prostoru. Zejména v ranních hodinách a v zimních měsících není přirozené světlo dostupné, nebo naopak pokud sluneční záření svou vysokou intenzitou nadměrně ruší zrakovou či tepelnou pohodu v místnosti a je tedy nutno jej stínit, je třeba jej doplnit odpovídajícím světlem umělým. Běžné osvětlovací systémy však ne vždy dosahují dostatečné intenzity a spektrální kvality osvětlení. Aby umělé osvětlení účinně zastoupilo přirozené světlo, měly by v něm být vyváženě zastoupeny všechny vlnové délky v účinné oblasti viditelného spektra tak, aby docházelo k rovnoměrné stimulaci všech fotoreceptorů v oku. Pro podporu bdělosti a cirkadiální synchronizace je zejména nutné dostatečné zastoupení modré a azurové spektrální složky, které v těle řídí časování aktivit a regenerace. Světelné prostředí s těmito parametry lze označit jako pro-kognitivní, tj. podporující kognici.

2 CÍLE VÝZKUMU

Studie se zabývala posouzením rozdílu v působení na lidský organismus mezi běžným umělým osvětlením a osvětlením pomocí speciálních pro-kognitivních osvětlovacích panelů, realizovaným firmou Spectrasol, s.r.o.

Primárním cílem výzkumu bylo vyhodnocení vlivu osvětlení výukových prostor na aktuální zrakový komfort a kognitivní schopnosti studentů a učitelů a vyhodnocení dlouhodobého vlivu na studijní výsledky a absence studentů. Byla testována hypotéza, že studenti exponovaní pro-kognitivnímu světlu budou podávat lepší studijní výsledky a vykazovat lepší zdraví a spokojenost než kontrolní skupina studentů. Pro vyhodnocení vlivu dostupnosti denního světla byly všechny parametry byly zjišťovány v letním a v zimním období, tj. v období jeho dostatku a nedostatku. Předpokladem bylo, že v zimním období bude vliv kvality umělého osvětlení významnější. Subjektivní spokojenost a vizuální komfort byly zkoumány též na pedagogickém sboru. Sekundárním cílem výzkumu bylo prostřednictvím zjištěných informací poskytnout podklady pro budoucí edukaci studentů a učitelů o vlivu světla na člověka a důležitosti světelné hygieny, a poskytnutí prostoru pro další navazující výzkumy v této oblasti.

3 DESIGN EXPERIMENTU

Výzkum byl navržený a realizovaný Platformou pro zdravé osvětlování výzkumného centra UCEEB ČVUT v Praze. Do projektu byla zapojena dvě školská zařízení, Gymnázium na Pražačce (GNP) a další pražské gymnázium, svými parametry s GNP srovnatelné, jež se pro účely tohoto výzkumu stalo kontrolní

skupinou (KON). V celkem 13 učebnách a jednom kabinetě GNP provedla společnost Spectrasol, s.r.o. v létě 2018 pilotní instalaci české technologie pro-kognitivního LED osvětlení. Původní běžné zářivkové zdroje byly v GNP nahrazeny pro-kognitivními LED panely, které vyzařují světlo s rovnoměrným zastoupením všech vlnových délek v centrálním pásmu 450-650 nm, s maximální odchylkou +/- 15 %, tzv. světlo plnospektrální. Vzhledem k výhradně dennímu provozu v objektech byla zvolena teplota chromatičnosti cca 4 500 K. Došlo také zvýšení hladiny osvětlenosti v učebnách (cca 800 lx na srovnávací vodorovné rovině). V KON byly ponechány původní lineární zářivky, tj. stav odpovídající instalacím na většině českých středních škol. Aby nedošlo k placebo efektu, bylo studentům a zaměstnancům v obou zařízeních sděleno, že u nich proběhla výměna osvětlení.

Měření aktuálního stavu probíhalo v učebnách běžné velikosti (pro 30 studentů, cca 7 x 11 m) a v malých učebnách jazyků (pro 15 studentů, cca 4 x 7 m), se světloú výškou místností 4 m, okny orientovanými na jih a vybavenými interiérovými stíníci systémy (ve formě žaluzií v GNP a závěsů v KON). Do měření bylo zapojeno 50 studentů z GNP a 50 studentů z KON. Skupiny studentů byly zvoleny tak, aby byly věkově srovnatelné (16 až 17 let) a studenti nebyli ani v prvním ani v závěrečném ročníku studia. Studenti GNP byli dlouhodobě vystaveni vlivu pro-kognitivního osvětlení minimálně 40 % času stráveného ve škole. Testování bylo na obou školách prováděno vždy druhou vyučovací hodinu v průběhu stejného týdne ke konci zimního a letního pololetí, tedy v období, kdy jsou studenti z důvodu uzavírání známek vystaveni velké psychické zátěži. Po dobu měření byly v učebnách monitorovány světelné podmínky, na základě čehož byla následně určena biologická účinnost osvětlení. Pro hodnocení dlouhodobých efektů byl výzkum doplněn o meziroční srovnání studijních výsledků studentů GNP (n = 500) a krátkodobých absencí – pozdních příchoďů (n = 200). Dále bylo provedeno dotazníkové šetření mezi učiteli obou škol (n = 60).

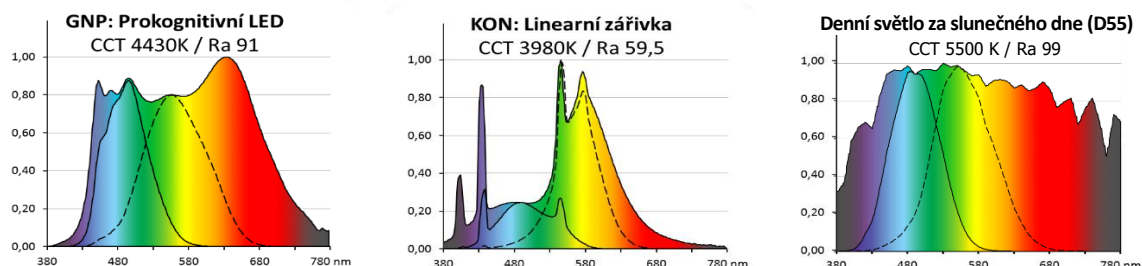
Podrobné vyhodnocení dat bylo prováděno ve spolupráci s Vysokou školou ekonomickou v Praze, Katedrou statistiky a pravděpodobnosti. Pro analýzu výsledků byla použita zejména deskriptivní charakterizace a případné porovnávání pozorování v jednotlivých parametrech, nikoliv složitější regresní modely. Statistická významnost byla zjišťována neparametrickými Wilcoxonovými testy párovými (rozdíly v čase u stejných studentů) a dvouvýběrovými (ve stejném čase mezi různými studenty). Pro porovnání mezi skupinami byly intervaly spolehlivosti zpracovány s Bonferroniho korekcí na více srovnávání (4 dvojice). Kromě průměru (mediánu) byla sledována také variabilita (kolísavost, kolísání, volatilita).

4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Pro vyhodnocení vlivu prostředí na uživatele je třeba posoudit hlediska fyzikální (kvalitu a kvantitu světla, jeho rozložení v prostoru, kvalitu vzduchu a další parametry prostředí), objektivní výkonové parametry (aktuální kognitivní výkonnost, studijní výsledky) a subjektivní hodnocení uživatelů, studentů i zaměstnanců.

4.1 Kvalita podání barev a spektrum světla

Norma na osvětlení prostor pro dlouhodobý pobyt osob požaduje, aby byl index podání barev minimálně na hodnotě Ra 80. Původní zdroj osvětlení v GNP a současně i zdroje světla v KON dosahují indexu Ra 60, což sice neodpovídá požadavku normy, ale jedná se o stav běžný v učebnách českých škol. **Nový osvětlovací systém v GNP dosahuje Ra 91**, změřená spektrální složení viz obrázek 1.

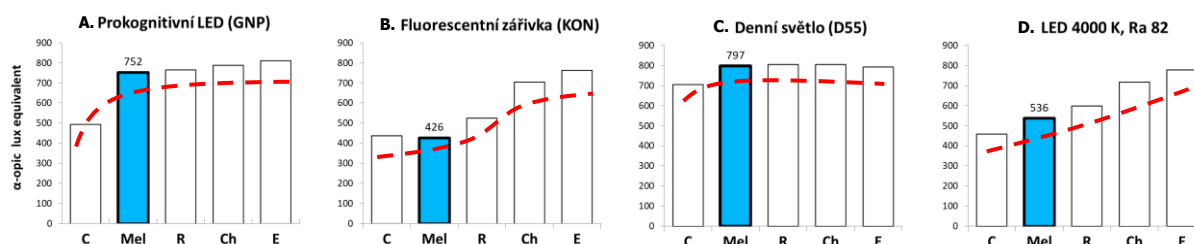


Obrázek 1 - Spektrální složení světla v učebnách, měřeno na horizontální rovině lavice v průběhu testování; plná křivka = melanopická osvětlenost dle CIE, čárkovaná křivka = fotopická křivka – vidění

Kvalitní podání barev u nově instalovaného systému je umožněno velkou rovnoměrností barevného spektra světla. **Odchylka** v zastoupení **vlnových délek 450–650 nm dosahuje** u zdrojů v GNP **maximálně $\pm 13,5 \%$** , což je blízké vlastnostem denního světla. Pro srovnání: osvětlení instalované v KON má v daném intervalu odchylku vlnových délek $\pm 65 \%$.

4.2 Biologická účinnost

V zimním období, kdy je dominantně využíváno umělé osvětlení, prokázalo měření spektrální charakteristiky, že přes srovnatelnou hladinu osvětlenosti $E_v = 800 \text{ lx}$ (měřeno na horizontální rovině lavice studenta) dosahuje při hodnocení v modelu CIE S026:E2018 [7] osvětlení GNP ve výšce oka sedícího studenta hodnotu melanopsinem váženého ozáření (melanopické osvětlenosti) na vertikální rovině $s_{mel}(\lambda)$ v GNP 405 melanopických luxů, v KON pouze 245 melanopických luxů. **Ve srovnání s biologickou účinností denního světla během slunečného dne (etalon D55) dosahuje tedy při stejné horizontální osvětlenosti pro-kognitivní osvětlení v GNP 94 % účinnosti přirozeného světla**, zatímco KON jen 53 % a na trhu běžně dostupné LED zdroje (4000K, $R_a > 80$) se standardně pohybují do 70 %, viz modrý sloupec v obrázku 2, který vyjadřuje citlivost melanopsinových receptorů, dominantních pro nevizuální vnímání světla, např. synchronizaci cirkadiánních rytmů. **Vyrovnané spektrální složení světla s vysokým obsahem modré a azurové spektrální složky u pro-kognitivního zdroje je klíčový parametr pro dosažení zamýšleného pozitivního vlivu na kognitivní výkon a vytrvalost** a zejména v ranních hodinách pro dobrou **synchronizaci cirkadiánního systému**.



Obrázek 2 – Relativní α -opické účinnosti zdrojů světla na jednotlivé fotoreceptory v oku (zleva doprava cyanopická, melanopická, rhodopická, chloropická, erythropická osvětlenost) v testovaném gymnáziu (A), kontrolním gymnáziu (B), denního světla za slunečného dne (C) a příklad běžného LED zdroje (D).

4.3 Subjektivní hodnocení světelného prostředí

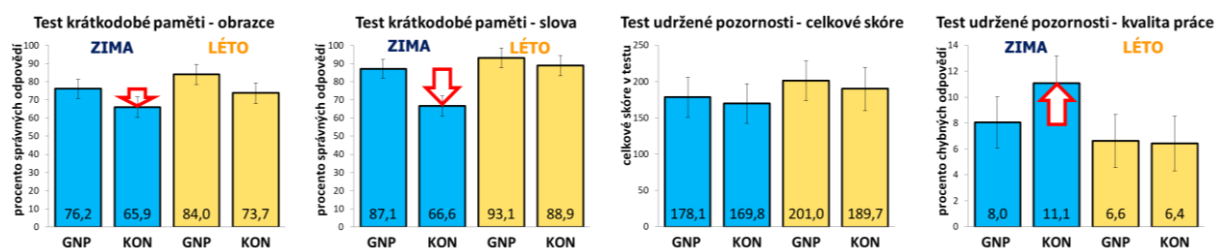
Subjektivní hodnocení prostředí bylo šetřeno za pomoci dotazníků, v nichž měli studenti a pedagogové na úseče mezi dvěma póly vyznačit aktuální hodnocení svého psychického a fyzického stavu a hodnocení místnosti, ve které se právě nacházeli. Malé učebny byly z analýzy na základě získaných výsledků vyjmuty. Horší kvalita vzduchu způsobená menším objemem místnosti a tmavší výmalba stěn způsobily méně komfortní prostředí a potenciálně zkreslovaly výsledky subjektivního hodnocení, jež bylo

primárně zaměřeno na osvětlení. **Pro-kognitivní osvětlení** učeben GNP bylo studenty v zimním období **subjektivně hodnoceno jako příjemnější** v porovnání s osvětlením v KON. Přestože byla osvětlenost povrchů v učebnách GNP a KON srovnatelná, skupina KON prostor častěji hodnotila jako přesevětlený. Při subjektivním hodnocení zrakové ostrosti u studentů nebyl zjištěn významný rozdíl mezi GNP a KON. Naopak v testu zrakové ostrosti (čtení postupně se zmenšujícího textu) se jako významný faktor projevil věk účastníků – zatímco ve věkově homogenní skupině studentů nebyly ve výsledku testu zjištěny rozdíly, **zraková ostrost** a s tím spojená čitelnost textu **se snižovala u pedagogických pracovníků, a to v závislosti na jejich věku**. Jako pohodlně čitelné hodnotilo nejmenší variantu textu 60 % všech studentů, avšak pouze 30 % pedagogů. Hodnocení přirozeného podání barev se významně lišilo mezi skupinami, pokud bylo jako faktor zahrnuto pohlaví hodnotitele. Zejména ženy hodnotily běžné osvětlení v zimním období jako méně přirozené. Tato vyšší citlivost na kvalitní podání barev je v souladu vyšší schopnosti rozlišovat barvy, s prokázanou právě u žen.

4.4 Kognitivní výkonnost studentů – testy paměti a soustředění

Objektivní výkonnost studentů byla testována pomocí dvou typů kognitivních testů. Test udržení pozornosti sledoval rychlost rozhodování a schopnost soustředění při řešení časově omezené, na pozornost náročné úlohy. Úkolem studentů bylo v časově omezených etapách opakovaně vyhledávat ze znakové řady ty znaky, které měly předem dané vlastnosti. Druhý test hodnotil kvalitu krátkodobé paměti. Studenti byli v rámci testu vyzváni k zapamatování si abstraktních grafických obrazců a konkrétních pojmů – slov. Posléze byli vyzváni odpovědět na otázky týkající se těchto informací.

Významným poznatkem se výzkumu se stal **vliv faktoru ročního období**. U kontrolní skupiny byly napříč všemi testovanými úlohami **zjištěny významně horší výsledky v zimním období**. V tu dobu je přirozené denní světlo dostupné v nižší intenzitě a po omezený čas, který navíc studenti tráví uvnitř, v učebnách. Tuto dobu se významně uplatňuje vliv umělého osvětlení, který je patrný na výsledcích studentů z GNP, vystavených vlivu pro-kognitivního osvětlení. V této skupině k zimnímu poklesu téměř nedošlo, viz obrázek 3.



Obrázek 3 - Porovnání výsledků kognitivních testů u sledovaných subjektů v učebnách GNP a KON. Šipka označuje významný rozdíl – snížení výkonnosti v zimním období, které nastává v běžném osvětlení, ale neobjevilo se v pro-kognitivním osvětlení.

Testy krátkodobé paměti

Testy paměti sledovali schopnost zapamatování a vybavení si jednoduchých pojmů a abstraktních znaků. V zimním období, kdy je vliv umělého osvětlení dominantní, poklesl výkon studentů v běžném osvětlení oproti jejich výkonnosti v létě a současně i oproti studentům z GNP, kteří dosáhli v zimním období v testu krátkodobé paměti významně lepší výsledky než studenti na kontrolním gymnáziu (KON). Konkrétně, v zimním období dosáhli studenti GNP v agregovaném testu paměti průměrně 80 % správných odpovědí, zatímco studenti KON jen na 65 %. V letním období byl výsledek obou skupin srovnatelný, průměrně 87 % správných odpovědí v GNP a 81 % v KON. Tato aplikovaná studie tak v každodenní praxi potvrdila laboratorně ověřený fakt, že v zimním období organismus pociťuje nedostatek denního světla. **Pro-kognitivní osvětlení však úspěšně působí jako prevence proti tomuto nedostatku a výkon studentů vystavených tomuto typu osvětlení se blíží výkonu v letních měsících.**

Testy schopnosti soustředění

V testu schopnosti soustředění byly samostatně vyhodnocovány rychlost práce (procento zpracovaných znaků) a kvalita práce (procento chyb). Celkový výsledek testu byl vyhodnocen dle validované metodiky. Výsledné skóre se mezi skupinami významně neliší, pokud je sledována kvalita práce (procento chyb v testu), nastává obdobná situace jako v testu paměti. Zatímco v letním testování je v obou skupinách srovnatelné, během zimního testování dosahují **studenti GNP výrazně menší počet chyb a větší počet dobře rozpoznávaných znaků než studenti KON**. Výsledky testů pozornosti tedy opět hovoří **pro pozitivní vliv pro-kognitivního osvětlení**, které je schopno nahradit denní světlo v době jeho nedostatku.

4.5 Meziroční srovnání – klasifikace a absence

V meziročním statistickém srovnání byl analyzován datový soubor ze dvou konsekutivních let v rámci jednoho gymnázia (GNP). První školní rok (2017/18) byl brán jako referenční. V létě 2018 došlo k výměně osvětlení v cca polovině učeben. Data z následujícího školního roku byla brána jako data po intervenci. Byla zpracována data všech studentů gymnázia.

Klasifikace

Z výsledků analýzy dat více než 500 studentů v průběhu dvou školních let vyplynulo, že se **po instalaci pro-kognitivního osvětlení objevilo** v porovnání zimních pololetí statisticky **významné meziroční zlepšení celkového prospěchu studentů**, viz. obrázek 4. Statisticky významné zlepšení průměru bylo zaznamenáno u matematiky, dějepisu, občanské nauce, fyziky a německého/francouzského jazyka. V předmětech český jazyk a anglický jazyk nedošlo k významné změně.

V letním pololetí byla meziroční změna méně výrazná, nicméně statisticky významné zlepšení průměru známek bylo zaznamenáno v předmětu s vyšším zapojením logických funkcí (matematika).

Pololetí	n	Průměrný prospěch	
		průměr	SD
ZS_2017/2018	515	2,35	0,651
LS_2017/2018	515	2,33	0,650
ZS_2018/2019	510	2,22	0,604
LS_2018/2019	517	2,30	0,638

Obrázek 4 - Průměrný prospěch studentů GNP. Hvězdička označuje statisticky významný rozdíl

Celkové absence a pozdní příchody

Porovnání počtu zaznamenaných **pozdních příchodů** před a po instalaci nového osvětlení **prokázalo u studentů GNP meziroční snížení** v letním období. V zimním období nebyl rozdíl významný. Tento jev lze interpretovat jako důsledek lepší schopnosti koncentrace ráno po probuzení. Lze předpokládat, že se jedná o dlouhodobý efekt kvalitnějšího světla během dne, a jeho větší dostupnosti v předchozích měsících. Toto pozorování lze tedy považovat za další indikátor pozitivního vlivu instalovaného osvětlovacího systému.

4.6 Zpětná vazba od učitelů

Učitelé přispěli do výzkumu svou zpětnou vazbou, z níž vyplynulo, že **pozitivně hodnotí osvětlení v GNP** v aspektech jako je čitelnost textu na tabuli a přítomnost odrazů/odlesků světla, které by mohly působit rušivě. **Pedagogové, kteří mají vyšší objem výuky v učebnách s pro-kognitivním osvětlením, mají tendenci hodnotit osvětlení jako celkově příjemnější**. Významně vyšší spokojenost se změnou osvětlení

také vykazují učitelé, kteří nosí brýle. Pro-kognitivní osvětlení tak nabízí vyšší zrakový komfort, který ocení zejména lidé se zhoršeným zrakem.

5 ZÁVĚR

Řada výzkumů prokázala, že přirozené denní světlo má pozitivní vliv na aktuální bdělost, pracovní výkon, náladu, schopnost soustředit se, učit se novým věcem a v dlouhodobém horizontu také na kvalitu spánku a celkové zdraví studentů [8]. V učebnách Gymnázia Na Pražačce bylo v létě 2018 instalováno nové **plnospektrální, pro-kognitivní osvětlení** s vyváženým zastoupením všech vlnových délek ve spektru v rozsahu **450-650 nm a s důrazem zejména v biologicky aktivizující oblasti modré a azurové části spektra**, obdobně jako je tomu u denního světla. Vzhledem k těmto vlastnostem se svou **relativní melanopickou účinností blíží dennímu světlu** a je schopno vytvořit kvalitní světelné prostředí v místech, kde je přirozeného světla nedostatek. I přes významné navýšení udržované osvětlenosti a kvality světla se po instalaci nového osvětlovacího systému spotřeba elektrické energie na osvětlení v objektu snížila meziročně o 15 %.

Vliv pro-kognitivního osvětlení na studenty a učitele gymnázia byl sledován po celý rok od instalace. Výzkumný tým podrobně vyhodnocoval řadu faktorů: subjektivní hodnocení v dotazníku, objektivní výsledky testů kognitivní výkonnosti a vytrvalosti, studijní prospěch, absence a pozdní příchody studentů, chronobiologická data studentů a učitelů, monitoroval světelné prostředí, stav ovzduší ve třídách a řadu dalších parametrů. Pro objektivní vyhodnocení vlivu osvětlení byla data studentů Gymnázia Na Pražačce, kde bylo testované osvětlení instalováno, porovnána s kontrolní skupinou studentů z jiného gymnázia. Podle dostupných statistik byly před začátkem testování studijní výsledky studentů z obou gymnázií srovnatelné.

Výsledky výzkumu jednoznačně prokázaly pozitivní vliv pro-kognitivního osvětlení. U studentů kontrolní skupiny, kteří se učili ve **standardním osvětlení, došlo** v zimních měsících, tj. v době nedostatku přirozeného denního světla, **k významnému propadu ve většině sledovaných parametrů**. Nedostatek denního světla způsobil snížení kognitivního výkonu a vytrvalosti a došlo i ke zhoršení subjektivního hodnocení kvality světleného prostředí. Tento **negativní jev nebyl zaznamenán u studentů experimentálního Gymnázia Na Pražačce (GNP), kde nedostatek denního světla** efektivně **nahradilo umělé pro-kognitivní osvětlení**. V porovnání se stavem před instalací došlo u těchto studentů také **ke statisticky významnému zlepšení v dosažených studijních výsledcích a snížení počtu pozdních příchodů**. To lze interpretovat jako důsledek stabilizace rytmu biologických hodin v organismu, ke které došlo díky lepší každodenní stimulaci systémem kvalitním jasným světlem.

Učitelé v učebnách s pro-kognitivním osvětlením ocenili zejména zvýšení zrakového komfortu. Dle jejich hodnocení byl v novém osvětlení text na tabuli lépe čitelný, zaznamenali také méně rušivých odlesků apod. Vyšší osvětlenost a kvalitní spektrum významně podpořilo zrakový komfort zejména u osob s horší kvalitou zraku, ať už vlivem věku, či zrakových vad. Podle zpětné vazby také učitelé, kteří ve svých kabinetech či učebnách neměli pro-kognitivní osvětlení instalované, přesouvali dle možností své činnosti do místností s tímto osvětlením.

Tato studie prokázala, že v místech a časech nedostatku denního světla **je vhodným přístupem instalace pro-kognitivního osvětlení**, které je v současné době nejbližší dostupnou náhradou přirozeného denního světla. Tento systém zmírňuje negativní důsledky, které ovlivňují studenty v zimních měsících roku, pokud jsou izolováni od přirozených synchronizátorů cirkadiálního rytmu – v tomto případě vysoké intenzity denního světla.

LITERATURA

- [1] Brainard GC, et al. *Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor*. J Neurosci. 2001 Aug 15; 21(16): 6405–12.
- [2] Hattar S., et al. *Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projection, and intrinsic photosensitivity*, Science. 2002 Feb 8; 295 (5557): 1065–70.
- [3] Lok, R., Smolders, K. C. H. J., Beersma, D. G. M. & de Kort, Y. A. W., *Light, alertness, and alerting effects of white light: a literature overview*. 1 Dec 2018, In : Journal of Biological Rhythms. 33, 6, p. 589–601, 13 p.
- [4] Fernandez D. C., et al. *Light Affects Mood and Learning through Distinct Retina-Brain Pathways*. Cell. Volume 175, Issue 1, 20 September 2018, Pages 71-84. e18.
- [5] Roennberg T., Daan, S. Mewow, M. *The art of entrainment*, J Biol Rhythms. 2003 Jun; 18(3): 183–94.
- [6] ČSN EN 17 037: *Denní osvětlení budov*. 2019.
- [7] CIE, *System for metrology of optical radiation for ipRGC-influenced responses to light*, International standard CIE s 026/E:2018
- [8] Heschong Mahone Group. *Daylight in schools. An investigation into the relationship between daylight and human performance*. Detailed report. Fair Oaks, CA.