



הועדה הישראלית להנדסת המאור - CIE ישראל



מידע מדעי בנוגע ללדים והשפעות פוטוביולוגיות של אור על בני אדם

הקדמה

במסמך זה אנו מבקשים להציג עובדות פיסיקליות בנוגע ללדים, מסקנות של מחקרים המבוססים על מדידת השפעות פוטוביולוגיות של אור בנבדקים אנושיים ומודלים חישוביים שפותחו על בסיס מדידות אלו. המסמך משקף את דעת חברי הוועדה הישראלית למאור - CIE ישראל.

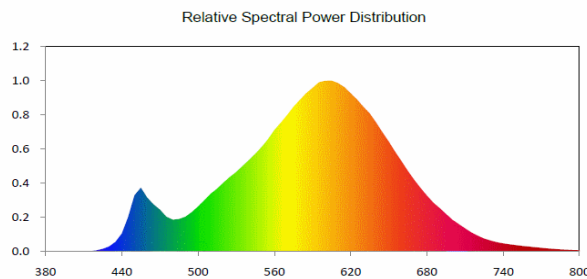
עובדות פיסיקליות על לדים לבנים

הלדים הכחולים מיוצרים מחצי מוליך מסוג InGaN כאשר השיא הספקטרי שלהם מצוי סביב אורך גל של 455nm. החוקר היפני שוגיי נקאמורה זכה בפרס הנובל לפיסיקה לשנת 2014 על תרומתו לפיתוח שיטה לייצור מסחרי של p-type GaN שפתחה את הדרך לייצור המוני של הלדים הלבנים.

הלדים הלבנים מבוססים על לדים הפולטים אור כחול. אור זה עובר דרך שכבה של חומר פוספוריים הממירים את חלקו לאורכי גל ארוכים יותר תקלטים בעין בקולטני הראיה של הצבעים הירוקים והאדומים. התוצאה הסופית המתקבלת היא אור לבן המורכב משלושת צבעי היסוד.

הרכבים שונים של חומרים פוספוריים מאפשרים לייצר לדים בעלי גוון אור שונה ואיכות מסירת צבע שונה. ככל שיותר אור כחול מותמר בשכבה הפוספורית לאור אדום, גוון האור המתקבל הוא חם יותר. עם זאת, אין הדבר אומר כי לד בגוון אור חם הוא איכותי יותר שכן גוון אור אינו מדד איכות אלא פרמטר פיסיקלי. איכותו של לד נמדדת בעיקר בפרמטרים של נצילות אורית, איכות מסירת צבע וקצב דעיכת תפוקת האור שלו.

חשוב להבין כי ללדים בעלי גוון אור שונה יש הרכב ספקטרי שונה לחלוטין ולכן הנחה לפיה: "לדים פולטים כמות גדולה של אור כחול" פשוט אינה נכונה עובדתית. לדוגמא, לד בגוון אור חם של 2700K תכולה נמוכה ביותר של "אור כחול" שכן רוב האור שנפלט מלד זה עובר התמרה בשכבה הפוספורית שלו כפי שניתן לראות בתמונה מס' 1.



תמונה מס' 1 – התפלגות הספק ספקטרי של לד בגוון אור 2700K



הועדה הישראלית להנדסת המאור - CIE ישראל



נתון נוסף שיש לציין הוא כי בניגוד למקורות אור אחרים, לדים אינם פולטים קרינה אולטרא-סגולית וקרינה אינפרא-אדומה.

נכון לסוף שנת 2015 משווקים מסחרית לדים בעלי נצילות של 180lm/W ובמעבדות כבר הגיעו לנצילות של 300lm/W. אין כיום אף טכנולוגיה ידועה אשר מתקרבת לנצילות אלו ולפוטנציאל החיסכון האנרגטי וההפחתה בפליטת מזהמים.

דיכוי ייצור מלטונין בבני אדם בעת חשיפה לאור בלילה

הורמון המלטונין מיוצר בבלוטת האצטרובל שבמוח, בעיקר בשעות הלילה, ונמצא כגורם המשפיע על תהליכים ביולוגיים שונים בהם מקצבי הערות והשינה, לחץ הדם וחום הגוף.

החל משנות השמונים של המאה העשרים נחקר הקשר שבין חשיפה לאור בשעות הלילה לדיכוי ייצור הורמון המלטונין בבני אדם [1]. היות שהמחקר הראשוני בוצע בחשיפת נבדקים לאור מונו-כרומטי בעל אורך גל יחיד, הוא לא נתן מידע הניתן ליישום עבור תאורה טבעית או מלאכותית של אור לבן.

בשנת 2000 התפרסם מחקר [2] בו נמדד דיכוי ייצור המלטונין בחשיפה לאור לבן (למחקר זה יש קרוב ל 600 ציטוטים בפרסומים מדעיים). במחקר נמצא כי חשיפה לתאורה בלילה למשך 6.5 שעות בעוצמה של עד 80 לוקס במישור העין (כל ערכי ההארה במסמך מתייחסים למישור זה) לא גרמה לדיכוי משמעותי בייצור המלטונין: "minimal suppression below 80 lux". עם זאת, נמצא כי מעל לרמה זו יש קפיצת מדרגה חדה, כאשר ברמת הארה ממוצעת של 120 לוקס, שהינה עוצמת תאורה ביתית טיפוסית, דיכוי ייצור המלטונין יגיע לכדי 50% ממקסימום הדיכוי שנצפה בעוצמת תאורה של 200 לוקס.

מחקר נוסף מאותה שנה [3] בדק האם אור החודר דרך עפעפיים סגורים יגרום לדיכוי ייצור המלטונין. על הנבדקים במחקר הורכבו מסכות מוארות בעוצמת אור של 1700 לוקס בין השעות 00:00-02:00 והם נתבקשו לעצום את עיניהם כבמצב שינה. התוצאות החד משמעיות היו כי לא נצפתה כל ירידה ברמת המלטונין של נבדקים אלו: "no evidence of melatonin suppression".

המסקנות ממחקרים אלו מלמדות כי בעוצמות הארה נמוכות היכולות להיגרם מחדירת אור חיצוני לבתים (לוקסים בודדים לכל היותר) אין חשש לירידה משמעותית ברמות המלטונין ובוודאי שלא בעת שינה. יתרה מזאת, גם כאשר בני אדם חשופים ישירות לתאורת חוץ, רמות התאורה הממוצעות במישור העין הינן מסדר גודל של 10 לוקס ונמוכות בהרבה מהסף המדוד שגרם לדיכוי ייצור מלטונין.



הועדה הישראלית להנדסת המאור - CIE ישראל



רגישות ספקטרלית בדיכוי ייצור מלטונין (Action Spectrum)

בשנת 2001 שני צוותי מחקר נפרדים פרסמו תוצאות מחקרים [5][4] בהם נמדדה הרגישות הספקטרלית של מנגנון דיכוי ייצור המלטונין (Action Spectrum) והסתבר כי היא שונה מהותית מהרגישות הספקטרלית של מערכת הראיה (CIE photopic luminosity function). שני צוותי המחקר מצאו כי הרגישות המכסימלית של מנגנון דיכוי ייצור המלטונין הינו בקרבת אורך גל של 460nm (אור כחול) אך הוא אפקטיבי עד לאורכי גל של 550nm. תוצאות אלו הביאו אותם לידי הבנה כי למנגנון זה אחראים קולטני אור שונים שאינם חלק ממנגנון הראיה המכילה קולטנים הרגישים לאור חלש (קנים/Rods) וקולטנים הרגישים לצבעים (מדוכים/Cones). שנה מאוחר יותר אכן זוהו קולטני אור ייחודיים אלו ברשתית (ipRGC) ע"י שני צוותי מחקר נפרדים [7][6].

בהינתן מודלים מדודים המגדירים את הרגישות הספקטרלית של מנגנון דיכוי ייצור המלטונין ניתן לחשב את השפעתו הפוטוביולוגית (Biological Dose) של מקור אור ממש כפי שמחשבים את שטף האור שלו בלומנים.

מבחינה מתמטית סוכמים את מכפלות הערכים של פיזור ההספק הספקטרי של מקור האור $E_{\lambda}(\text{lamp})$ - Spectral Power בערכים של B_{λ} - Action Spectrum האנושי שניהם כפונקציות של אורך הגל בתחום האפקטיבי $380\text{nm} < \lambda < 600\text{nm}$:

$$\text{Biological Dose (lamp)} = \sum E_{\lambda}(\text{lamp}) * B_{\lambda} * \Delta\lambda$$

חשוב להדגיש כי לא ניתן להעריך את ההשפעה הביולוגית של מקור אור רק על בסיס הפיזור הספקטרי שלו ויתרה מזאת, העוצמה היחסית של "השיא הכחול" אינה מעידה כשלעצמה על ההשפעה הביולוגית של מקור האור.

בניגוד לרושם המוטעה כאילו לנורת הליבון הישנה אין רכיבים של "אור כחול", יש להבהיר כי כל מקור אור המזוהה בעין האנושית כ"אור לבן", חייב להכיל רכיבים של "אור כחול" בתחום אורכי הגל 380-600nm, גם אם הוא בעל אור "לבן חם" כנורת הליבון.



הועדה הישראלית להנדסת המאור - CIE ישראל



השוואת ההשפעה הביולוגית של מקורות אור שונים

פרופ' Wout van Bommel (יו"ר לשעבר של הועדה הבינלאומית למאור CIE) ערך השוואה [8] בין ההשפעה הפוטוביולוגית על דיכוי ייצור המלטונין הנגרמת ממקורות אור שונים וזאת ביחס להשפעתה של נורת ליבון בעלת אותה עוצמת הארה:

- נורת הלוגן (הייתה בשימוש נפוץ לתאורה דקורטיבית)
- נורת לד בגוון אור חם של 2700K
- נורת לד בגוון אור קר של 4000K
- נורת PL בגוון אור חם של 2700K
- נורת PL בגוון אור קר של 4000K

מודל החישוב מניח כי מקורות האור השונים הינם בעלי תפוקת אור זהה בלומנים ומשתמש בפיזור הספקטרלי הייחודי של כל מקור אור ובפונקציית הרגישות הספקטראלית של דיכוי ייצור המלטונין (Action Spectrum) כפי שהוגדרו בנפרד ע"י החוקר Brainard, G.C. וע"י החוקר Rea, M.S. ואחרים. מבחינה מתמטית:

$$\text{Relative Biological Dose (lamp)} = \sum 100 * \{E_{\lambda}(\text{lamp}) * B_{\lambda}\} / \{E_{\lambda}(\text{GLS}) * B_{\lambda}\} [\%]$$

כאשר $E_{\lambda}(\text{lamp})$ הינו פיזור ההספק הספקטרלי של הנורה הנבדקת, $E_{\lambda}(\text{GLS})$ הינו פיזור ההספק הספקטרלי של נורת ליבון (בעלת אותו שטף אור) ואילו B_{λ} הינו פונקציית Action Spectrum האנושי.

התוצאות המתקבלות מראות כי הן לנורת לד והן לנורת PL בעלות גוון אור של 2700K השפעה כמעט זהה לזו של נורת ליבון בדיכוי ייצור המלטונין.

כמו כן נמצא כי הן לנורת לד והן לנורת PL שלהן גוון אור של 4000K וכן לנורת הלוגן השפעה דומה בדיכוי ייצור המלטונין.

המסקנות הן כי לנורות לד השפעה פוטוביולוגית דומה לזו של נורות PL בעלות אותו גוון אור וכי לנורת לד בעלת גוון אור חם יש את אותה השפעה פוטוביולוגית כפי שיש לנורת הליבון הישנה.

ההשפעה הביולוגית של תאורה ביתית בשעות הלילה

במאמר [9] המציג תוצאות של מודל השפעה פוטוביולוגית בעל רגישות ספקטראלית שפותח בהתבסס על מדידות של דיכוי ייצור מלטונין בהשפעת אור שבוצעו במחקרים שונים ומוצגת בו טבלה (Table 2) המציגה ערכים מחושבים של אחוזי דיכוי ייצור הורמון המלטונין בחשיפה לאור יום (גוון אור של 6500K העשיר "באור כחול") ולנורת ליבון, כפונקציה של עוצמת הארה בלוקסים ומשך החשיפה בדקות.

המודל מראה כי חשיפה למשך שעה לתאורה של נורת ליבון בעוצמת הארה של 100 לוקס (עוצמה סטנדרטית על הקרנית כאשר מדובר בתאורת פנים) תגרום לדיכוי של 25% בייצור המלטונין.



הועדה הישראלית להנדסת המאור - CIE ישראל



בהתבסס על ממצאים אמפיריים ומודלים מחקרניים אנו רואים כי גם ע"י שימוש בנורות ליבון לא ניתן להימנע לחלוטין מדיכוי ייצור המלטונין בעוצמות הארה המשמשות בבתים.

סיכום

1. לנורות לד ולנורות פלורוסנטיות בעלות גוון אור 4000K, אותה השפעה פוטוביולוגית על דיכוי ייצור המלטונין וזהו גוון האור הנכון הן ויזואלית והן פוטוביולוגית עבור רוב מקומות העבודה בכלל ובפרט כאשר העבודה מתבצעת בשעות היום.
2. ניתן לבצע מעבר לשימוש בנורות לד במקומות עבודה ללא חשש!
3. כבר כיום ניתן ליישם מערכות תאורה מבוססות לדים בהן ניתן לשלוט הן על עוצמת התאורה והן על גוון האור ונראה כי בעתיד הן יהיו נפוצות יותר ויותר כאשר במקביל נדרש יהיה להגדיר פרוטוקולים לתפעול מערכות אלו.
4. לתאורת פנים בבתים בה נעשה שימוש בעיקר בשעות הלילה רצוי להשתמש במקורות אור בעלי גוון "אור חם" כאשר לנורות לד בגוון אור של 2700K אותה השפעה פוטוביולוגית כשל נורת ליבון בעלת אותו שטף אור.
5. השפעתה של תאורת חוץ על התאורה בבתי מגורים זניחה לחלוטין כל עוד תאורת הפנים פועלת.
6. השפעתה של תאורת החוץ על התאורה בבתי מגורים לאחר כיבוי תאורת הפנים אפסית עקב עוצמות התאורה הנמוכות (לוקסים בודדים) היכולות לחדור לבתים ובנוסף לכך כאשר העיניים עצומות בזמן השינה, לאור אין כלל השפעה על דיכוי המלטונין.
7. בעוצמות ההארה המשמשות בתאורת חוץ, רמת התאורה נמוכה מהסף המדוד הגורם לדיכוי ייצור המלטונין (80 לוקס במישור העין) כאשר נתון זה אינו תלוי בטכנולוגיה של מקור האור ועל כן גם עבור תאורת חוץ ניתן לעבור לטכנולוגיית הLED ללא חשש, כפי שכבר מתבצע בפועל ברחבי העולם.
8. הגבלה של עוצמות הארה ושימוש בגוון אור של 3000K בתאורת חוץ רצויה בסביבת אזורי טבע מוגנים בהם מבקשים למזער את ההשפעה על חיות בר הנמשכות לאור.
9. לשימוש בתאורת חוץ בגוון אור של 3000K באזורי מגורים יכולים להיות יתרונות בהתאמה טובה יותר לרגישות הספקטראלית של אנשים מבוגרים והקטנת הילת האור סביב ישובים (Dark Sky) אולם זאת תוך תשלום של נצילות נמוכה במקצת מזו של תאורה בגוון אור של 4000K.
01. תאורת חוץ בגוון אור של 4000K אפקטיבית יותר עבור אנשים צעירים עקב רגישות מערכת הראיה ל"אור כחול" בעוצמות נמוכות (יחס S/P גבוה יותר בתחום המזופל) ונצילות אורית גבוהה. כבר כיום נמכרים גופי תאורה בעלי נצילות שמעל 120lm/W ברמת הגוף ונצילות זו הולכת ומשתפרת עם הזמן.



הועדה הישראלית להנדסת המאור - CIE ישראל



11. בנושא גוון אור של תאורת חוץ אין נכון להיום הנחיות ואף לא המלצות מצד גופים מקצועיים כגון CIE או IES ואף לא של ארגוני בריאות כגון ארגון הבריאות העולמי (WHO) או המכון הלאומי האמריקאי למדעי בריאות סביבתית (NIEHS).
21. לשימוש בטכנולוגיית הלדים ישנם יתרונות מובנים לאופטימיזציה של תאורת חוץ כגון:
 - עקומות פיזור אור מדויקות המונעות הארה משנית לא רצויה
 - אפשרות כיוול מתקני התאורה לרמות הארה מדויקות
 - עמעום לפי לוי"ז או לפי נפח תנועה

ביבליוגרפיה

[1] Brainard G.C. et al

Dose-response relationship between light irradiance and the suppression of melatonin in human volunteers,
Brain Res (1988) 454:212–218

[2] Zeitzer J.M. et al

Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression,
J Physiol. 2000 Aug 1; 526(Pt 3): 695–702

[3] Jean-Louis G. et al

No melatonin suppression by illumination of popliteal fossae or eyelids
Journal of Biological Rhythms, 2000 Jun;15(3):265-9

[4] Brainard G.C. et al

Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor,
The Journal of Neuroscience, August 15, 2001, 21(16):6405–6412

[5] Thapan K. et al

An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans,
Journal of Physiology (2001), 535.1, pp.261–267



הועדה הישראלית להנדסת המאור - CIE ישראל



[6] Berson D.M. et al

Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock
Science (February 2002) 295 (5557): 1070–3.

[7] Hattar S. et al

Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections,
and intrinsic photosensitivity,
Science (February 2002) 295 (5557): 1065–70

[8] Wout van Bommel

Incandescent replacement lamps and health, 2010 Feb.

[9] Figuerio, M.G., Rea M.S., Bullough, J.D.

Does architectural lighting contribute to breast cancer?
Journal of Carcinogenesis 2006, 5:20