

פיק כחול? (בשעות היום) כן!

Recommendations for daytime, evening, and nighttime

indoor light exposure to best support

physiology, sleep, and wakefulness in healthy

adults
Timothy M. Brown, George C. Brainard, Christian Cajochen, Charles A. Czeisler, John P. Hanifin, Steven W. Lockley, Robert J. Lucas, Mirjam Mu'nch, John B. O'Hagan, Stuart N. Peirson, Luke L. A. Price, Till Roenneberg, Luc J. M. Schlangen, Debra J. Skene, Manuel Spitschan, Céline Vetter, Phyllis C. Zee, Kenneth P. Wright, Jr.

•Published: March 17, 2022 – PLOS Biology journal

•<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001571>

יואב אבינור מהנדס חשמל בכיר

מבוא

לאור ישנן השפעות פוטו-ביולוגיות חשובות על בריאות האדם ורווחתו באמצעות אפנון של מקצבי היממה ערנות ושינה, ועל תפקודים נוספים אנדוקריניים וקוגניטיביים

בתנאי החיים המודרניים אנשים רבים שוהים בתוך מבנים סגורים כאשר דפוסי חשיפתם לאור ממקורות מלאכותיים אינם מבטיחים את קיום התפקודים הללו באופן מיטבי. הידע המדעי שנצבר במחקרים רבים מראה כי להארה מספקת בשעות היום חשיבות קריטית שאינה פחותה ממניעת חשיפה לאור בשעות הלילה.

התקדמות בהבנת פעולתם של המנגנונים הפוטו-ביולוגיים בצד התפתחות של טכנולוגיות תאורה, מציגות כעת הזדמנויות לתכנון וביצוע של מתקני תאורה באופן שיסייעו לרווחה בריאותית וביצועים פיזיים וקוגניטיביים מיטביים

מבוא

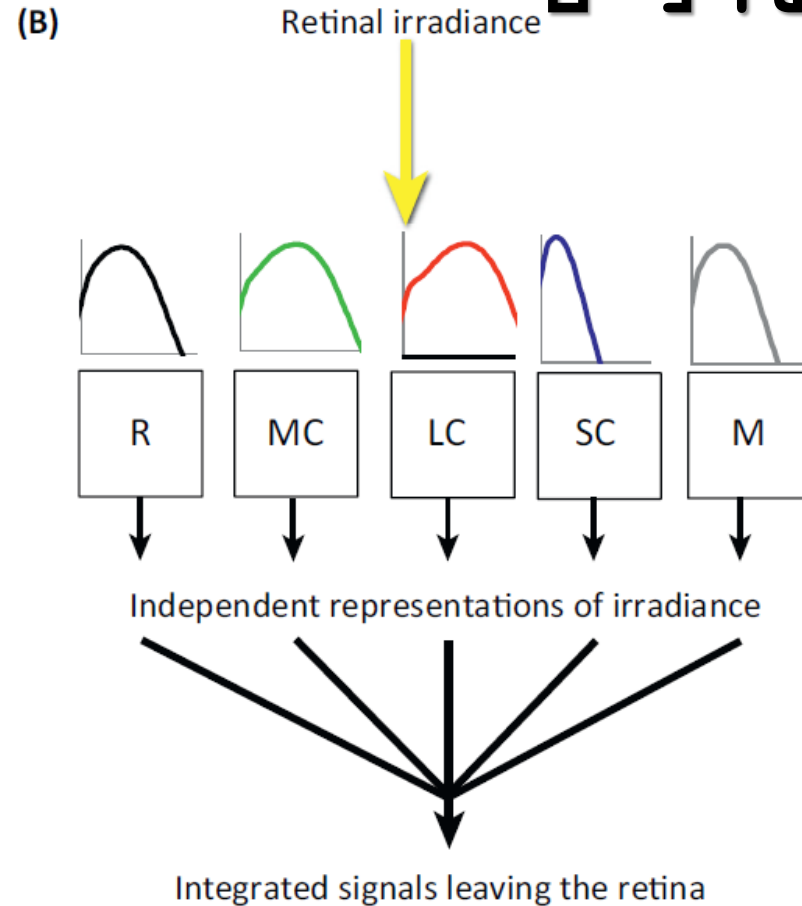
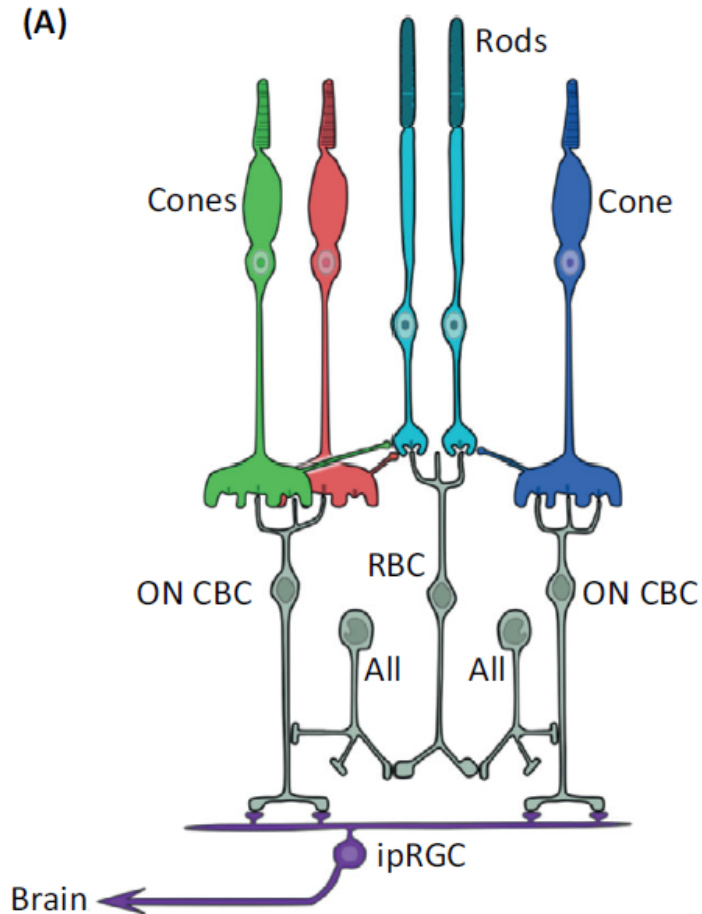
התקן הבינלאומי CIE S026, שפורסם בשנת 2018, מספק הגדרות סטנדרטיות לכימות ההשפעה הפוטו-ביולוגית של האור באמצעות נירונים מסוג ipRGC ברשתית הרגישים לאור באמצעות הפוטופיגמנט מלנופסין

נייר העמדה שיוצג בהרצאה מספק המלצות לתאורה, המבוססות על הסכמה מדעית של מומחים, המבוססת במדד כמותי הנמדד בקלות המוגדר במסגרת תקן CIE S026 הארת אור יום מלנופית –

Melanopic Equivalent Daylight Illuminance

המלצות הדו"ח נתמכות על ידי מחקרים שניתחו באופן מפורט, על בסיס מדד **Melanopic EDI**, את הרגישויות לאור של מקצב היממה, של תפקודים נירו-אנדוקריניים ושל תגובות ערנות, ומספקות מסגרת פשוטה לתכנון וביצוע תאורה

שילוב אותות עצביים מקולטני הראיה השונים

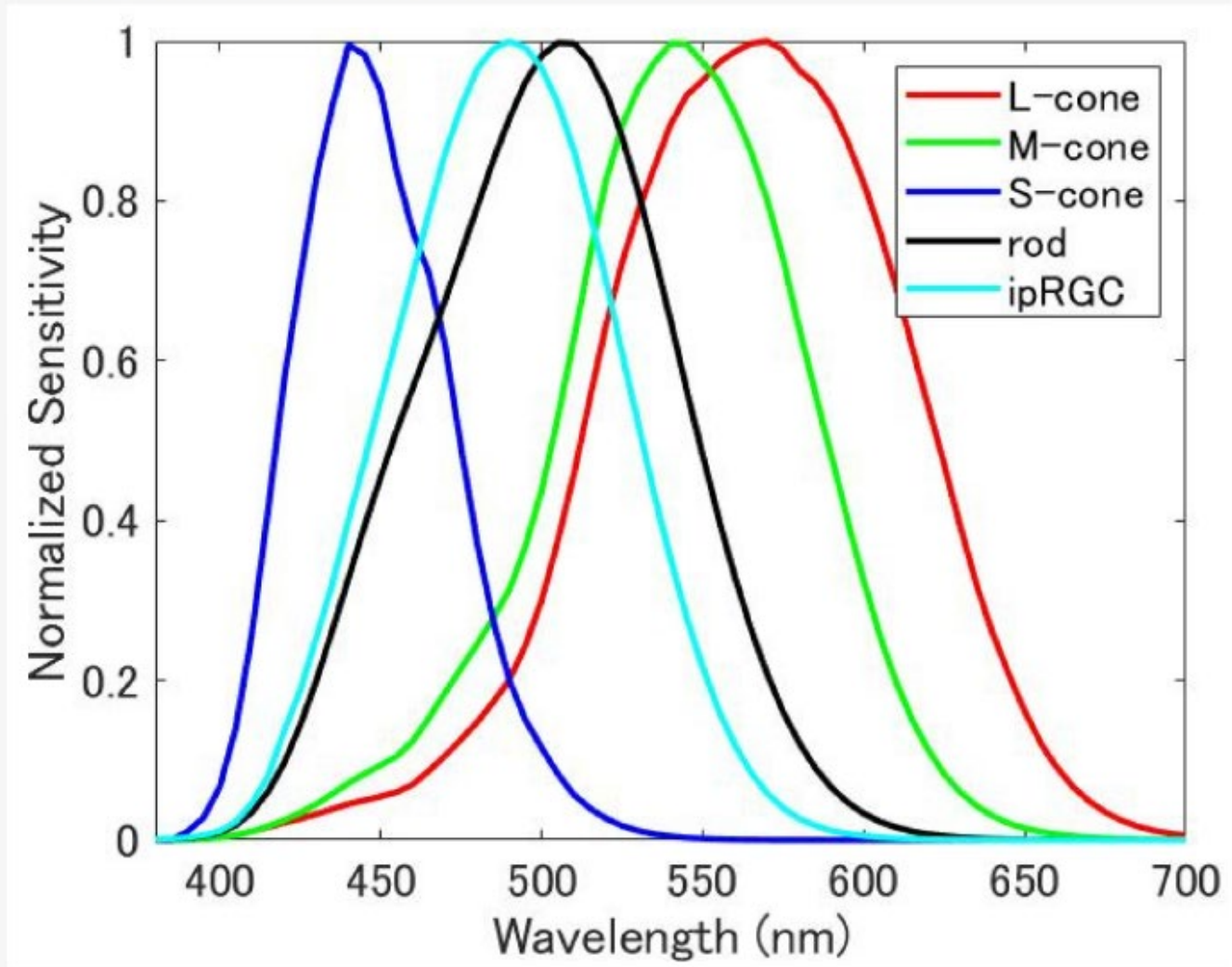


TRENDS in Neurosciences

Measuring and using light in the melanopsin age ; Lucas et al ; 2014

פונקציות רגישות ספקטרלית של חמשת קולטני הראיה

Figure 1. Spectral sensitivity function of the cone, rod, and ipRGC.



פונקציות הרגישות הספקטרלית של חמשת קולטני הראיה מנורמלות
לשיעור כערך 1

הגדרת פונקציות CIE S 026/E:2018 הרגישות בתקן

• $S_{\alpha}(\lambda)$ – α -opic action spectrum – הגדרה כללית לפונקציה המתארת את הרגישות הספקטרלית היחסית של כל אחד מחמשת קולטני הראיה כאשר הערך המקסימלי של הפונקציה מנורמל לערך 1

- $S_{sc}(\lambda)$ – פונקציית הרגישות הספקטרלית של מדוכים רגישים לאורך גל קצר (כחול)
- $S_{mc}(\lambda)$ – פונקציית הרגישות הספקטרלית של מדוכים רגישים לאורך גל בינוני (ירוק)
- $S_{lc}(\lambda)$ – פונקציית הרגישות הספקטרלית של מדוכים רגישים לאורך גל ארוך (אדום)
- $S_{rh}(\lambda)$ – פונקציית הרגישות הספקטרלית של הקנים (הפוטופיגמנט רודופסין)
- $S_{mel}(\lambda)$ – פונקציית הרגישות הספקטרלית של תאי ipRGC (הפוטופיגמנט מלנופסין)

פונקציות הרגישות הפוטופית והמלנופית

- **Photopic illuminance –**

$$E_v = 683 \text{ [lm/W]} * \sum E(\lambda) * V(\lambda) * \Delta\lambda \text{ [lm/m}^2\text{]}$$

$E(\lambda)$ - the irradiance from a light source at a point of a surface at a specific wavelength λ [$\text{W/m}^2/\text{nm}$]

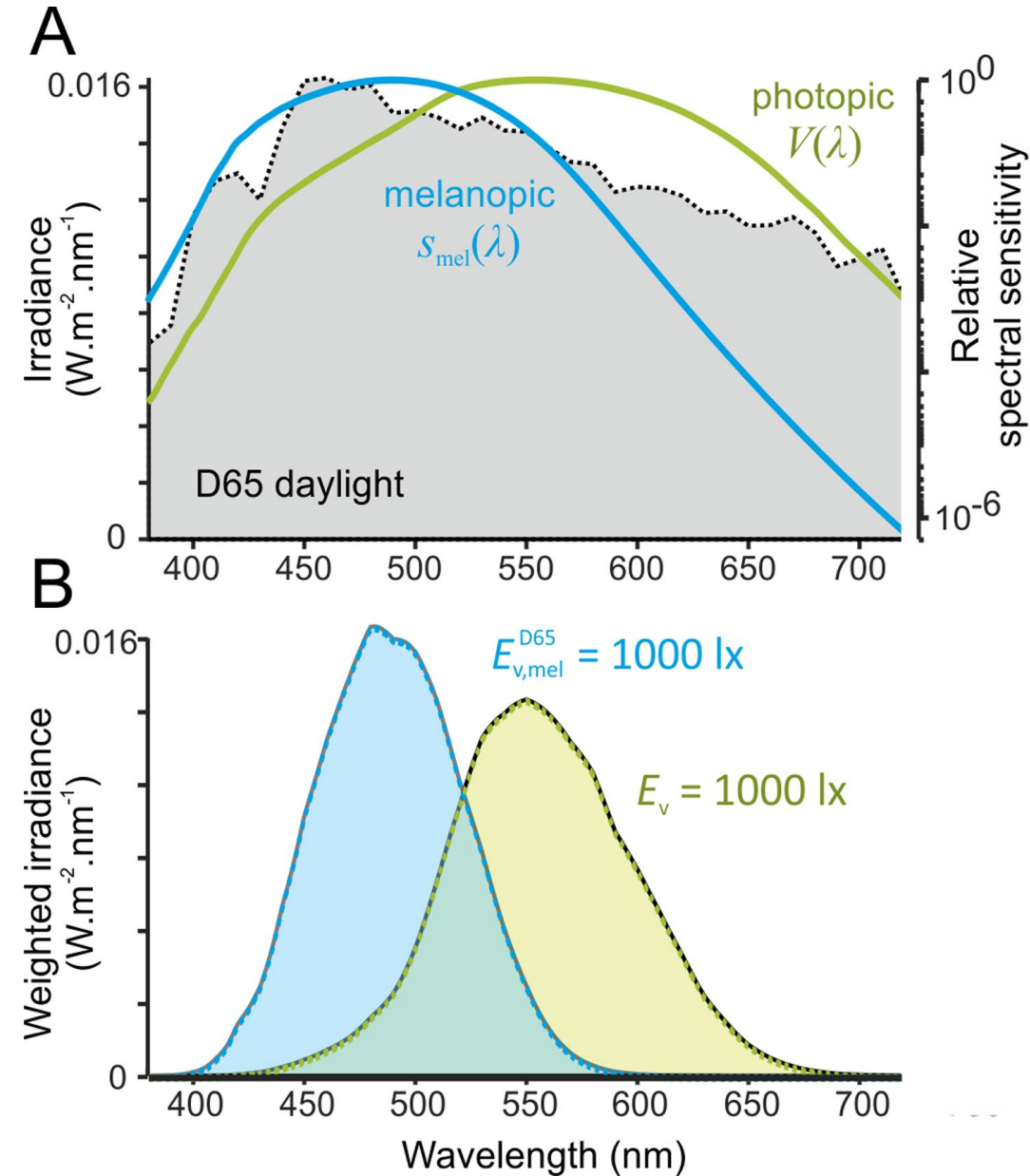
$V(\lambda)$ - Photopic sensitivity at a specific wavelength λ

- **Melanopic irradiance –**

$$E_{\text{mel}} = \sum E(\lambda) * S_{\text{mel}}(\lambda) * \Delta\lambda \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$E(\lambda)$ - the irradiance from a light source at a point of a surface at a specific wavelength λ [$\text{W/m}^2/\text{nm}$]

$S_{\text{mel}}(\lambda)$ - melanopic sensitivity at a specific wavelength λ



הארה מלנופית שוות ערך ביחס לאור יום

- כפי שמודדים עוצמת הארה ויזואלית בלוקסים יש צורך להגדיר עוצמת הארה מלנופית המשפיעה על נירונים מטיפוס ipRGC בערכי לוקס משלה
- בתקן CIE S 026 נקבע כי מקור האור הסטנדרטי לחישוב לוקסים של הארה מלנופית יהיה אור יום D65 שהספקטרום שלו הוא של אור יום בגוון אור 6500K (אור יום טיפוסי בארצות צפוניות)
- נקבע בתקן כי עבור מקור האור הסטנדרטי D65 הארה בעוצמה של 100 לוקס פוטופי היא גם הארה בעוצמה של 100 לוקס מלנופי
- התקן מגדיר מדד של הארה מלנופית שוות ערך Melanopic Equivalent Daylight Illuminance המאפשר להמיר את עוצמת הקרינה המלנופית שחושבה לעוצמת שוות ערך בלוקס מלנופי על בסיס ההגדרה של מקור אור סטנדרטי D65
- המשמעות המעשית היא כי עבור כל מקור אור שעבורו יש לנו את ערכי פיזור ההספק הספקטרלי, נוכל למדוד בפשטות את עוצמת ההארה שלו בלוקסים פוטופיים רגילים (עם לוקס-מטר) ולהמיר אותה לערך של לוקסים מלנופים
- כעת יהיה בידינו כלי שמאפשר להשוות באופן כמותי ומדויק מדידות שהתבצעו ביחס לעוצמות הארה מלנופיות שונות של מקורות אור שונים

הארה מלנופית שוות ערך ביחס לאור יום

- E_v^{D65} – luminous illuminance of D65 daylight [$\text{lm}/\text{m}^2 = \text{lux}$]

- E_{mel}^{D65} – melanopic irradiance flux of D65 daylight [W/m^2]

- **Melanopic efficacy of luminous radiation for D65 daylight –**

$$K_{\text{mel},v}^{D65} = E_{\text{mel}}^{D65} [\text{W}/\text{m}^2] / E_v^{D65} [\text{lm}/\text{m}^2] = 1.3262\text{E-}03 [\text{W}/\text{lm}]$$

- **Melanopic EDI (Equivalent Daylight Illuminance) of any light source –**

$$E_{v,\text{mel}}^{D65} = E_{\text{mel}} / K_{\text{mel},v}^{D65} [\text{lm}/\text{m}^2 = \text{Melanopic lux}]$$

E_{mel} - Melanopic irradiance of any specific spectrum light source

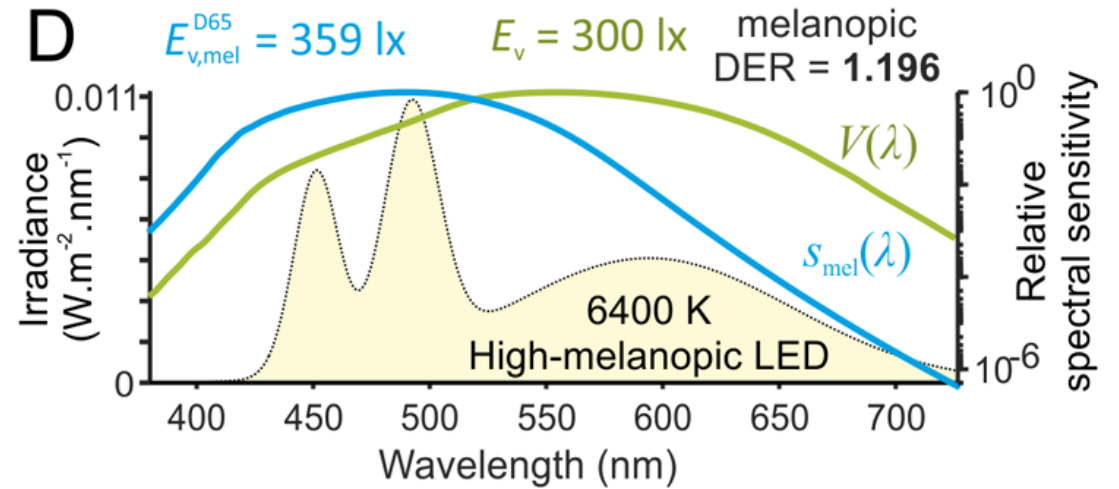
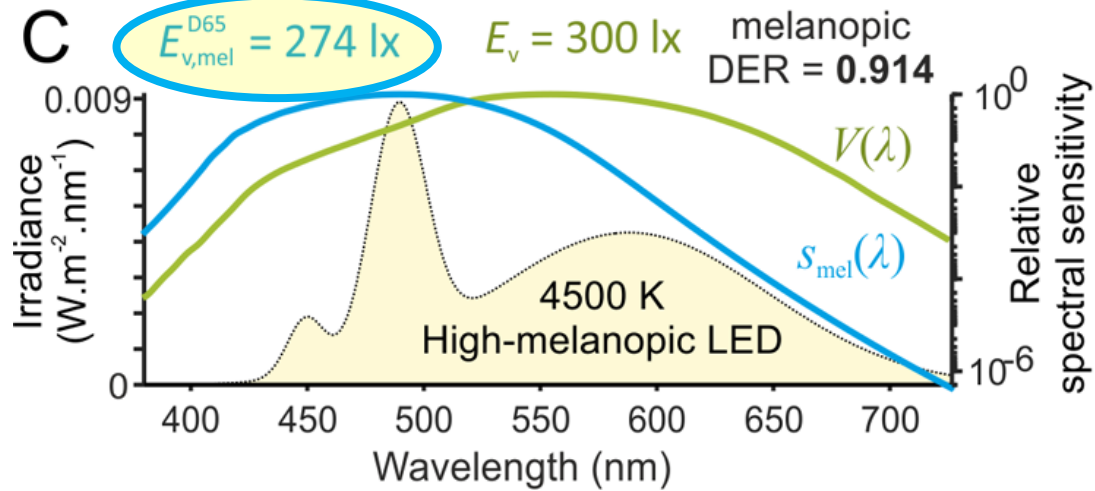
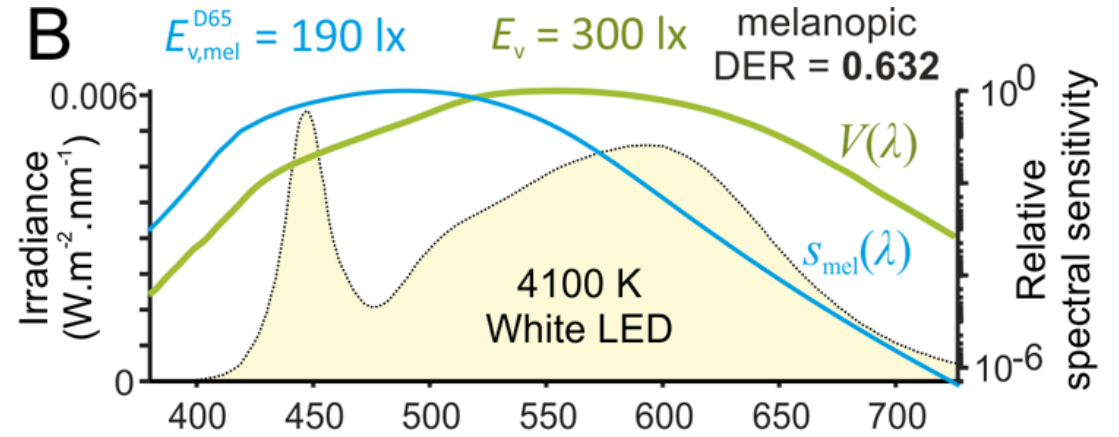
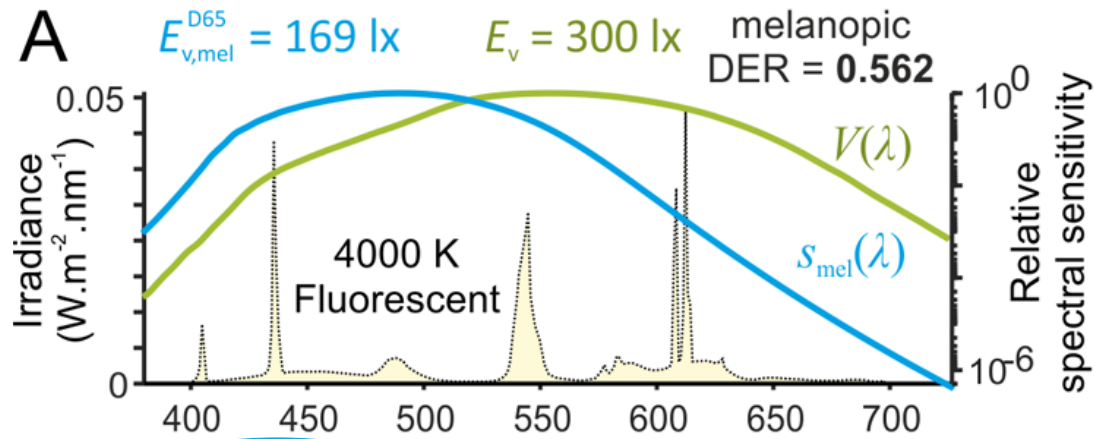
- **Melanopic DER (Daylight Efficacy Ratio) of any light source –**

$$\text{MDER} = \text{Melanopic EDI} / \text{Melanopic EDI}^{D65} \text{ (with the same photopic lux level, } \text{MDER}^{D65} = 1)$$

דוגמאות להארה מלנופית של מקורות

אור שונים

$$0.632/0.562 = 112.5\%$$



שאלות המפתח שבחן צוות המדענים

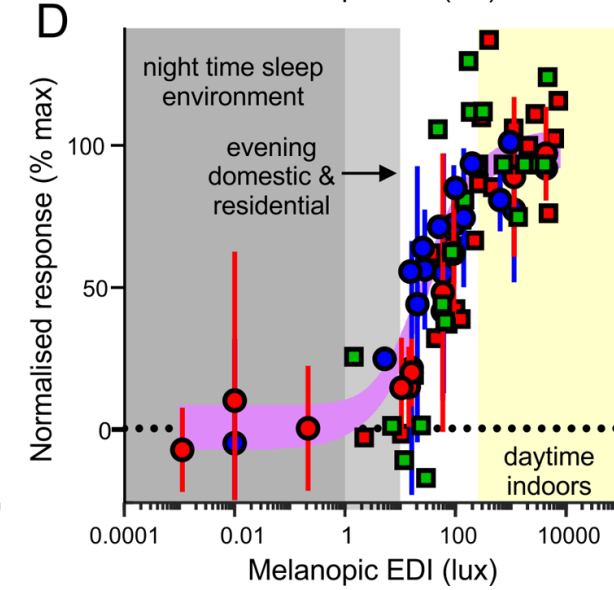
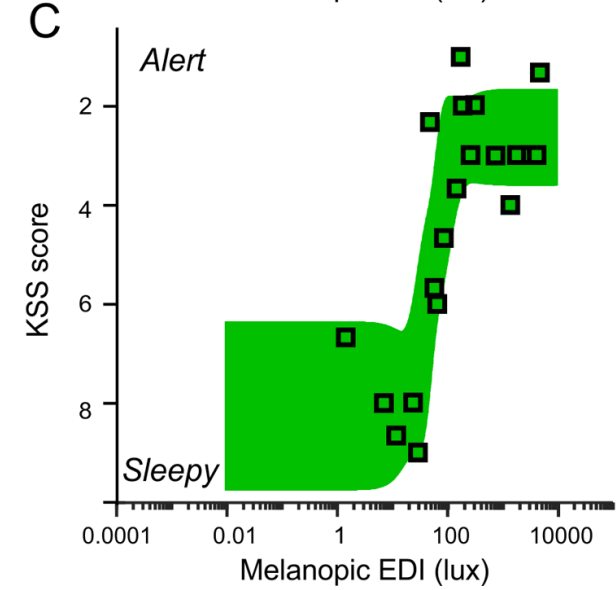
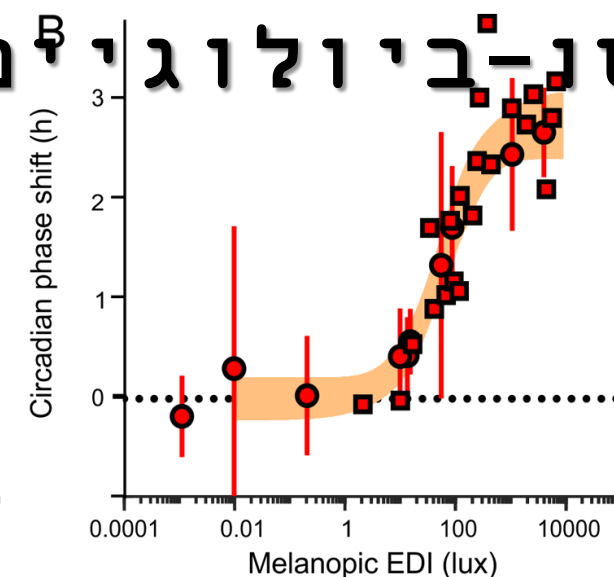
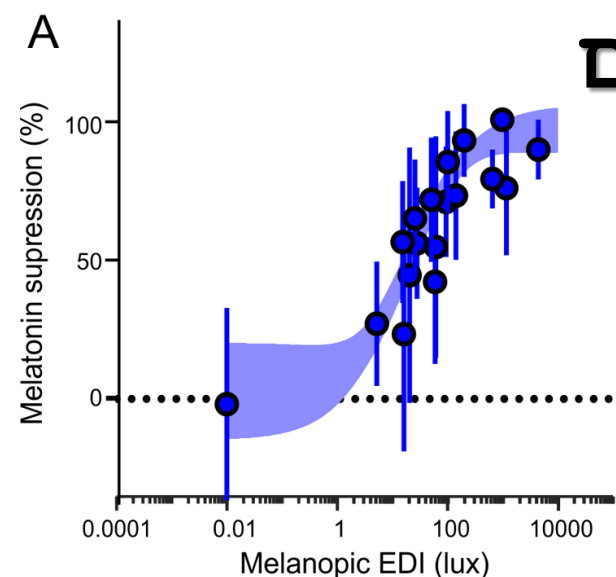
הכנסת השימוש במדד Melanopic EDI אפשר לראשונה לצבור גוף ידע ממחקרים שמציגים תוצאות מדידה בנות השוואה ביחס למדד אחיד, באופן שאפשר לצוות המדענים החתומים על נייר העמדה להתכנס כדי לבחון ולענות במשותף על הסוגיות הבאות:

1. שאלה – מהם תחומי ההארה המלנופית (Melanopic EDI) היכולים לספק בצורה סבירה הגדרות מינימום ומקסימום לתגובות פוטו-ביולוגיות בבני אדם (המחקרים שנבחנו בוצעו במבוגרים בריאים בגילאים 18 עד 55 שאינם כוללים עובדי משמרות)
תשובה – גובשו המלצות המוסכמות על כלל המדענים החתומים על נייר העמדה
2. שאלה – האם סיגנלים עצביים המגיעים ממדוכים וקנים הינם משמעותיים בהשפעתם הפוטו-ביולוגית? במידה שכן, כיצד מה צריכים להיות הקווים המנחים להנחיות תאורה?
תשובה – לא, הרגישות להארה המלנופית היא הפרמטר המובהק ביותר בהשפעה פוטו-ביולוגית
3. שאלה – האם התשובות לשאלות 1 ו 2 משתנות כאשר בוחנים את ההשפעות הפוטו-ביולוגיות השונות של חשיפה לאור? במידה שכן, כיצד מה צריכים להיות הקווים המנחים להנחיות תאורה?
תשובה – לא, התשובות לשאלות 1 ו 2 נכונות עבור השפעות פוטו-ביולוגיות שונות של חשיפה לאור

השפעת החשיפה לאור על מדדים

פוטנ-ביולוגיים

- הכנסת השימוש במדד Melanopic EDI אפשר לראשונה לבצע השוואה כמותית בין תוצאות של מחקרים שונים ע"ג סקלה לוגריתמית אחידה
- גרף A מציג ריכוז תוצאות מחקרים הבוחנים את דיכוי ייצור המלטונין כפונקציה של חשיפה לאור
- גרף B מציג ריכוז תוצאות מחקרים הבוחנים את העיכוב במחזור היממה כפונקציה של חשיפה לאור
- גרף C מציג ריכוז תוצאות מחקרים הבוחנים מדד ערנות כפונקציה של חשיפה לאור
- גרף D מציג מדד סינטתי של "תגובה נורמלית" כפונקציה של חשיפה לאור



המלצות נייר

העמדה

צוות המדענים החתומים על נייר העמדה הגיע להסכמה גורפת של ההמלצות הבאות:

המלצות לתאורת פנים בשעות היום

- עוצמת הארה מלנופית מינימלית של $\text{min Melanopic EDI} > 250\text{lux}$ במישור העין, הנמדדת במישור העין בגובה של 1.2 מטר מהרצפה (גובה העין של אדם יושב)
- ככל שניתן רצוי לעשות שימוש בתאורת אור יום טבעית
- תאורה מלאכותית צריכה להיות עשירה באור באורכי הגל קצרים (אור כחול) בדומה לאור יום טבעי!
- יישום – בתאורה משרדית המתוכננת לעוצמה של 500Lux למשטח העבודה צפויה לרוב עוצמת הארה של כ 300lux במישור העין. שימוש בתאורה מבוססת על High Melanopic LED 4500K ייתן עוצמת הארה מלנופית מספקת של 274lux ללא צורך בהגברה מיותרת של עוצמת ההארה הכללית והגדלת ההספק החשמלי של מתקן התאורה

המלצות נייר

העמדה המלצות לתאורת פנים בשעות הערב

- עוצמת הארה מלנופית מכסימלית של $\max \text{Melanopic EDI} < 10 \text{lux}$ במישור העין, הנמדדת במישור העין בגובה של 1.2 מטר מהרצפה (גובה העין של אדם יושב) למשך זמן של שלוש שעות לפני זמן השינה הרגיל
- ההמלצה היא להשתמש במקורות אור בעלי תכולה נמוכה של אור באורכי גל קצרים, כדוגמת לדים בגוון אור 2700K, 3000K
- $\text{MDER LED-B2 (3000K)} = 0.458$, $\text{MDER A (incandescent lamp)} = 0.496$
- נייר העמדה מציין כי מדידות אמפיריות שנעשו בבתי מגורים מראים כי ניתן להגיע ליעד המומלץ תוך שימוש במקורות אור מתאימים בעוצמות הארה סבירות
- הערה – אף כי נייר העמדה לא עוסק בנושא, נראה כי בתכנון על פי תקני התאורה המחייבים, מתקני תאורת חוץ עירוניים אמורים על פניו לעמוד ביעד המומלץ

המלצות נייר

העמדה

המלצות לתאורת פנים בחדרי שינה בשעות הלילה

- עוצמת הארה מלנופית מכסימלית של $\max \text{Melanopic EDI} < 1 \text{lux}$ במישור העין, חדרי שינה צריכים להיות חשוכים ככל שניתן
- עם זאת, ניתן ואף רצוי לתכנן תאורת לילה עבור בטיחותם של אנשים מבוגרים. תאורה זו צריכה להיות מוגבלת בעוצמות וכיווני הארה, ודלה באורכי גל קצרים.
- הערה – תאורת רחובות המתוכננת באופן נכון אינה אמורה לחדור לחלונות בתים. דבר זה נכון בפרט בעידן תאורת הLED בו נעשה שימוש בעדשות בעלות עקומות פוטומטריות מדויקות תוך ותוך נקיטת אמצעים כגון הגבלת הארה אחורית וכד'

שאלות?



תודה רבה !