

2.2. חשיפה לתאורת LED, השעון הצירקדי ותפקודים קוגניטיביים



- מחקרי התערבות שבחנו את ההשפעה של חשיפה לאור מונכרומטי על פעילות אזורית במוח הראו, כי פעילות נצפית רגעים ספורים לאחר חשיפה לאור בכחול באזורים בתת-קליפת המוח הקשורים לערנות, ולאחר כ- 20 דקות הפעילות נצפית גם באזורים בקליפת המוח הקשורים למשימה מתמשכת
- מחקרי התערבות שבחנו חשיפה קצרת טווח לאור פוליכרומטי הדגישו שיפור ברמות תפקוד קוגניטיבי שונות, מערנות ועד לביצועים מתקדמים גם ביום וגם בערב. נמצא כי השפעות האור על תפקודים קוגניטיביים הן בעיקר תלויות אורך גל, עם רגישות מרבית לאורך גל קצר כחול ובטמפרטורת צבע גבוהה (6500k). השפעות על תפקודים קוגניטיביים נצפו כבר בעוצמות הארה נמוכות (40 lux)
- עם זאת, בחלק מהמחקרים שנסקרו נמצאו ממצאים לא עקביים, בעיקר ביחס להשפעת חשיפה אקוטית במהלך היום שנבחנה במדדים אובייקטיביים
- יש לציין כי המחקרים שנסקרו בפרק זה היו בעלי גודל מדגם קטן שלא יכלו להעריך יחס מנה-תגובה (dose-response), ובחנו השפעות של חשיפה אקוטית בלבד. לפיכך, נדרשים מחקרים נוספים בקרב קבוצות אוכלוסייה גדולות ובחינת חשיפות והשפעות ארוכות-טווח (כרוניות ומצטברות)
- במספר מחקרים בוצעה השוואה בין מקורות תאורה מסוגים שונים בעלי טמפרטורת צבע שונה (לדוגמא: "אור קר" מ-LED מול "אור חם" מליבון). השוואה זו אמנם משקפת תנאי הארה אופייניים לסביבה, אך לא מאפשרת לבודד את הגורם המשפיע מאחר וההשוואה לא בוצעה עם פרמטר אחד קבוע

תפקודים קוגניטיביים ברמות שונות כגון לימוד, תשומת לב, ריכוז, זיכרון, שפה, הנמקה וקבלת החלטות, ערנות^א ומצב רוח נמצאו מושפעים מחשיפה לאור דרך תגובות לא חזותיות במוח^{1 2 3}.

באופן כללי, תפקודים קוגניטיביים מווסתים לאורך היממה בעיקר על ידי שני תהליכים מרכזיים: תהליכים צירקדיים והומואוסטזיס שינה⁴. בדומה לתפקודים פיזיולוגיים רבים אחרים, כמו טמפרטורת גוף ולחץ דם, הפועלים על פי המקצב הצירקדי, גם ערנות וביצועים קוגניטיביים נמצאים בשיאם במהלך היום (זמן ערות). מחקרים הראו כי תפקודים קוגניטיביים מתווכים גם כן על ידי תאי מלנופסין המעבירים אותות לגרעין הסופריכיזמטי הקשור בפעילות השעון הצירקדי^{5 6}.

תהליך מרכזי נוסף במערכת העצבים התורם לוויסות תפקודים קוגניטיביים הוא אינרציית שינה שהיא מצב פיזיולוגי של תפקוד קוגניטיבי וחוש-מוטורי לקוי המתרחש עם ההתעוררות ובמעבר משינה לערות^ב. לאחר שלב ההתעוררות, המקצב הצירקדי במוח מאפשר התייצבות של רמות התפקודים קוגניטיביים לאורך היום. יש לציין כי עדיין לא ברור חלקו היחסי של כל אחד משלושת התהליכים יחסי הגומלין ביניהם בהקשר להשפעתם על תפקודים קוגניטיביים⁴.

^א ערנות (alertness) היא צורת הפעלה ספציפית של עוררות הדורשת עיבוד קוגניטיבי
^ב לרוב אינרציית שינה נמשכת 15-30 דקות לאחר התעוררות. במצב זה, האדם חווה תחושות נמנום, דיסאוריינטציה וירידה בזריזות החושית.



בסקירה זו מוצגים מחקרים שבחנו את ההשפעה של חשיפה לאור כחול בבוקר, במהלך היום או בערב על תפקודים קוגניטיביים. במרביתם נבחנה חשיפה אקוטית (שניה עד כחצי שעה) לילית או יומית עם עוצמת הארה ומשך חשיפה קבועים. בחלק מהמחקרים נערכו השוואות לגבי ההשפעה של אור מונוכרומטי (אור בעל אורך גל יחיד) כחול לבין ההשפעה של חשיפה לאור מונוכרומטי אחר (למשל ירוק, אדום או סגול). מחקרים אחרים השוו בין אור לבן רגיל (פוליכרומטי, המורכב ממספר אורכי גל) לבין "אור לבן מועשר בכחול" (blue-enriched light), עם ריכוז גבוה יותר של אור כחול מאשר בתאורה לבנה רגילה)

פעילות מוחית הקשורה בתפקודים קוגניטיביים נבדקה בעיקר באמצעות שתי שיטות להדמיה: טומוגרפיית פליטת פוזיטרונים (PET, Positron Emission Tomography) והדמיות של תהודה מגנטית תפקודית (fMRI, Functional Magnetic Resonance Imaging)^c. בנוסף, להשלמת המידע נעשה שימוש במדידות של הפעילות החשמלית במוח (אלקטרואנצפלוגרם, EEG) במהלך ביצוע מבחנים קוגניטיביים.

2.2.1 השפעות חשיפה לתאורת LED מונוכרומטית על תפקודים קוגניטיביים

מחקרים התערבותיים קטנים (N=3-18) בחנו מנגנון אפשרי של השפעת חשיפה לאור באורכי גל שונים (באמצעות תאורה מונוכרומטית) בתנאים מבוקרים על תגובות פיזיולוגיות הקשורות בתפקודים קוגניטיביים:

ממצאי מחקרים שעשו שימוש ב-fMRI^{7, 8, 9} מצביעים על כך שחשיפה לאור מונוכרומטי כחול במהלך היום, בהשוואה לאור ירוק (520 ננומטר, אורך גל בינוני) או לאור סגול (430 ננומטר אורך גל קצר יותר מכחול), יעילה יותר בשיפור תגובות המוח למטלת זיכרון מורכבת. הפעילות המוחית נצפתה לאחר חשיפה רגעית (50 שניות) במבנים של תת-קליפת המוח בלבד. לאחר 18-20 דקות של חשיפה נצפתה פעילות בתת-קליפת המוח הקשורה לערנות ובקליפת המוח הקשורה לפעילות קוגניטיבית.

מחקר נוסף¹⁰ בחן מהירות תגובה לביצוע מטלה לאחר חשיפה לשלושה אורכי גל במהלך היום. משתתפים שהו בתנאי חשיכה ($0.01 < \text{lux}$) למשך 10 דקות. לאחר מכן הם נחשפו לאור מונוכרומטי בעוצמת הארה נמוכה (10 lux) בשלושה אורכי גל: קצר (470 nm), בינוני (530 nm) וארוך (620 nm) למשך 28 דקות. מהירות התגובה נבדקה לפני ואחרי השהות בחשיכה, ו-4 פעמים במהלך החשיפה לאור. ממצאי המחקר הראו כי לאחר חשיפה לאור כחול רמת הריכוז לביצוע המשימה עלתה. כמו כן, השפעת האור הכחול על פעילות קליפת המוח זוהתה תוך 5 דקות לאחר חשיפה במהלך היום, זמן קצר משנצפה במחקרים קודמים^{7, 8, 9}. לא נצפו השפעות דומות על פעילות קליפת המוח בתנאי חשיכה ובחשיפה לאורך גל בינוני או ארוך בכל נקודת זמן שנמדדה.

מחקר אחר¹¹ בחן את השפעת החשיפה לאור מונוכרומטי באורכי גל שונים (כתום, ירוק, או כחול) למשך 10 דקות, כשעה לפני ביצוע מטלות שמיעה פשוטות או מורכבות תוך כדי חשיפה לאורך גל ירוק (515 nm). נמצא כי חשיפה קודמת (הסתגלות) לאור כתום (589 nm), בהשוואה לאור כחול (461 nm), מביאה לשיפור בתגובות מוח קוגניטיביות באזורים הפרפרונטאליים ובגרעין הכר התלאמי (pulvinar)^d במהלך ביצוע מטלות פשוטות ומורכבות. תגובות אלו לא נמצאו לאחר חשיפה קודמת לאור כחול. תוצאות אלו מדגישות את חשיבות הפער באורך גל בין זמן הסתגלות לבין זמן ביצוע מטלות, ומדגימות שחשיפה מוקדמת לאור באורכי גל ארוכים יותר משפרת את ההשפעה הבאה של האור באורך גל שונה על מבנים מוחיים¹¹.

^c שיטת דימות מוחי המשמשת למדידת פעילותם של אזורים במוח תוך כדי ביצוע מטלות
^d הגרעין הכר התלאמי (pulvinar thalami) מהווה גרעיני הפולבינר בתוך התלמוס



תאורת LED הנפוצה לשימוש באוכלוסייה הכללית היא בתאורה לבנה בגוונים שונים (כלומר מכילה מספר אורכי גל, אור פוליכרומטי) ולא תאורת LED באורך גל מסוים (מונוכרומטי). לכן, מחקרים שנסקרו לגבי השפעות חשיפה לאור פוליכרומטי משקפים באופן מהימן יותר את החשיפה בקרב הציבור. מחקרים אלו בחנו השפעות מידיות של חשיפות אקוטיות יומיות ולילות.

במחקר¹² שנערך בקרב 104 עובדים במשרד נמצא, כי חשיפה לתאורת פלואורסצנט מועשרת בכחול (17000k) במהלך היום, בהשוואה לתאורת פלואורסצנט לבנה (4000k), מובילה לשיפור סובייקטיבי (שאלונים) בתפקודים קוגניטיביים ובתחושת ערנות ואיכות שינה של העובדים בלילה.

במחקר שבוצע בקרב 58 תלמידים בשני תיכונים¹³ נמצא כי חשיפה לתאורת LED מועשרת בכחול (טמפרטורת צבע 5500k) במהלך היום מובילה לשיפור בתפקודים קוגניטיביים וברמות הריכוז (מבחנים פסיכולוגיים) של התלמידים בשתי כיתות, בהשוואה לשתי כיתות עם תאורה רגילה (תאורת פלואורסצנט 3000k-3500k).

במחקר שבוצע בקרב 18 משתתפים בגילאים 19 עד 30, (אשר תואר בפרק 2.1 בעמ' 18)¹⁴, נבחנה ההשפעה של היסטוריית החשיפה למרכיב האור הכחול בתאורת LED על השעון הצירקדי. נמצא כי לאחר חשיפה לאור בוהק מועשר בכחול (6500K, 500 lux) בבוקר, המשתתפים היו ערניים יותר והפגינו ביצועים קוגניטיביים טובים יותר בהשוואה לביצועים לאחר חשיפה לאור חלש "חם" (נורות ליבון כביקורת, 40 lux, 2600k).

מחקר התערבותי¹⁵ בחן את ההשפעות של טמפרטורת צבע בתאורת LED על תפקוד תלמידי בית ספר יסודי במהלך חשיפה לשלוש רמות טמפרטורת צבע (אור לבן חם 3500k, אור לבן רגיל 5000k ואור לבן מועשר בכחול 6500k). המחקר בוצע בשלושה שלבים: בשלב המקדים, נבדקו תגובות פסיולוגיות (ECG) של 17 משתתפים בכיתה בחשיפה לשלוש רמות טמפרטורת צבע (עוצמת הארה ממוצעת 550 lux). בשלב שני, נבדקו ביצועים בפעילות למידה (פתירת בעיות חישוב, אחוז התשובות הנכונות כמדד לדיוק ומהירות) ופעילות פנאי (שיח בין תלמידים) בקרב 31 תלמידים בתנאי חשיפה דומים לאלו בשלב המקדים. לבסוף, נערך ניסוי בשתי כיתות עם 54 משתתפים במשך שבועיים. בשבוע ראשון, משתתפים נחשפו לתאורת פלואורסצנט רגילה. בשבוע שני, כיתה אחת נחשפה לתאורת LED מועשרת בכחול עם עוצמת הארה ממוצעת של 500-600 lux. למרות שההבדלים בממצאי השלב השני לא היו מובהקים סטטיסטית, ממצאי השלב המקדים והניסוי האחרון הראו שיפור בביצועים לימודיים בחשיפה לתאורת 6500k ושיפור בפעילות הפנאי בתאורת 3500k.

מחקר התערבותי שפורסם ב-2018¹⁶ בחן את השפעות (יחס מנה-תגובה) החשיפה היומית לתאורת LED לבנה מועשרת בכחול על ערנות. הניסוי בוצע בקרב 25 משתתפות ו-25 משתתפים צעירים (גיל ממוצע 23.02 שנים \pm 0.3 חודשים). המשתתפים, שישנו במכון ערב לפני יום הניסוי, התעוררו לאחר 8 שעות שינה לחדר בתנאי אור מעומעם (פלואורסצנט תלוי בתקרה, טמפ' צבע K2500, עוצמה 10lux). בין השעות 9:00-17:30, התקיימו ארבעה מפגשי ניסוי במשך שעה בכל פעם (בין לבין, האור עומעם לשעה וחצי). במפגשי הניסוי, המשתתפים נחשפו למקור אור מתאורת LED (מתקן נייד שהונח מול כל משתתף, טמפ' צבע K5800) וכל משתתף נחשף רק לעוצמת אור אחת (24, 74, 222, 666, או 2000lux). לאורך היום, נבדקו ארבעה פרמטרים המצביעים על רמת ערנות: חציון זמן תגובה בביצוע מטלה, תפיסת ישונויות סובייקטיבית, משך מצמוץ, טמפ' עור. נמצא כי לאחר תיקון לשעה ביום ולריבוי השוואות, חשיפה לתאורת LED לבנה מועשרת בכחול בעוצמה של עד 2000lux אינה משפרת באופן מובהק את רמות הערנות.

מחקר התערבותי קטן¹⁷ בקרב 15 סטודנטים לפסיכולוגיה בחן השפעת חשיפה לילית לתאורת LED לבנה מועשרת בכחול על ערנות, בתקנון להבדלים במצב העוררות הבסיסית (basal arousal) טרם

החשיפה. הניסוי בוצע בשני מפגשים (פעם בשבוע). טרם תחילת הניסוי נמדדה למשתתפים טמפ' עור והם ענו על שאלון וביצעו שני מבחנים קוגניטיביים פשוטים לבדיקת רמת עוררות בסיסית (בתנאי תאורת בקרה; מנורת לד מכוסה, עוצמה 3lux). בנוסף, ביצעו המשתתפים מטלה מורכבת אחת לבדיקת רמת הערנות. לאחר זמן הסתגלות של 15 דקות, כל המשתתפים נחשפו לתאורת הניסוי (עוצמה 2500lux) למשך שעה. במקביל לחשיפה, שוב נבדקו המדדים האובייקטיביים והסובייקטיביים לעוררות בסיסית ולערנות. במחקר נמצא כי קיימת שונות בין המשתתפים ברמת העוררות הבסיסית. כמו כן, נמצא כי השיפור הגדול ביותר חל בקרב אלו שדיווחו על רמות גבוהות של עוררות בסיסית, והם הגיבו מהר יותר במטלה מורכבת.

מחקר קטן אחר¹ בחן את ההשפעות של חשיפה לילית אקוטית לאור כחול על רמות מלטונין, ערנות וביצועים קוגניטיביים בקרב 16 גברים בריאים (טווח גילאים 20-28 שנים). המשתתפים נחשפו במשך שעותיים לאור פוליכרומטי משני סוגי נורות (CFL, ליבון) בעוצמת הארה זהה ונמוכה (40lux) ועם טמפרטורות צבע (CCT) שונות: 6500k ("אור קר", מועשר בכחול) ו- 2500k ("אור חם") בנורות CFL ו- 3000k ("אור רגיל") בנורות ליבון. ביצועים קוגניטיביים נבדקו באמצעות מטלות הקשורות לקשב מתמשך ולתפקודים ניהוליים שלוש פעמים בערב. נמצא כי חשיפה ל-"אור קר" (6500k CCT) שיפרה ביצועים קוגניטיביים עם זמני תגובה מהירים יותר משמעותית במשימות הקשורות בקשב מתמשך. לא נמצא הבדל קוגניטיבי בין הקבוצות במדדים של משימות הקשורות לתפקודים ניהוליים.

שתי סקירות שפורסמו ב-2018 בחנו השפעות תאורה לבנה פוליכרומטית על ערנות. בסקירת ספרות אחת¹⁸ נבחנו מחקרים שבדקו השפעת חשיפה קצרת טווח לעוצמות שונות של תאורה לבנה במהלך היום והערב על ערנות. נמצא כי בעוד שקיימים ממצאים מובהקים שחשיפה לילית של תאורה לבנה משפרת את הערנות, הממצאים לגבי השפעת חשיפה יומית על רמות הערנות אינם עקביים וחד משמעיים, בפרט ביחס למדדים האובייקטיביים והמתאם שלהם לערנות.

סקירה שניה¹⁹ השוותה באופן שיטתי בין מחקרים שבחנו השפעות של חשיפה קצרת טווח לאור לבן ביום ובלילה (בנפרד) על ערנות, בדגש על עוצמת התאורה וטמפרטורת הצבע. במרבית המחקרים (ביום ובלילה) נמצא כי עוצמת האור משפיעה בעיקר על רמות הערנות הסובייקטיבית, אך השפעת טמפרטורת הצבע על ערנות סובייקטיבית פחות ברורה. מיעוט המחקרים התייחס למדדים אובייקטיביים וממצאיהם לא היו עקביים.

על סמך ממצאי המחקרים שנכללו בסקירות אלו, נראה כי השפעות האור המשפרות את הערנות משתקפות בעיקר במדדים סובייקטיביים, ואינן עקביות במדדים אובייקטיביים. החוקרים ציינו כי רבים מהמחקרים שנכללו בסקירות היו בעלי מדגם קטן, שונים מאד זה מזה מתודולוגית ובחנו תנאי תאורה מוגבלים בלבד. לכן לא ניתן כרגע להשוות בין המחקרים ונדרש מחקר נוסף.

¹ Chellappa S. L, Steiner R, Blattner P, et al. Non-visual effects of light on melatonin, alertness and cognitive performance: can blue-enriched light keep us alert? PLoS One 2011; 6:e16429. doi: 10.1371/journal.pone.0016429

² Gronfier, C. The good blue and chronobiology: light and non-visual functions (N68, 2013). In ebook 2017, UV and Blue-Violet Light, ocular risks and prevention, Points de Vue, International Revue of Ophthalmic Optics: Collection of articles from 2011 to 2017. Retrieved November 20, 2018 from www.pointsdevue.com

³ Sedwick C. Melanopsin Ganglion Cells: A Different Way of Seeing Things. PLoS Biology 2010; 8(12): e1001003.

⁴ Burke T M, Frank A J L, Scheer B et al. Sleep inertia, sleep homeostatic, and circadian influences on higher-order cognitive functions. Journal of Sleep Research 2015; 24: 364–371.

-
- ⁵ Chee M W L, Chuah L Y M. Functional neuroimaging insights into how sleep and sleep deprivation affect memory and cognition. *Current Opinion in Neurology* 2008; 21: 417–423.
- ⁶ SCHEER (Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks), Opinion on Potential risks to human health of Light Emitting Diodes (LEDs), 6 June 2018
- ⁷ Vandewalle G, Gais S, Schabus M et al. Wavelength-dependent modulation of brain responses to a working memory task by daytime light exposure. *Cereb Cortex* 2007a; 17: 2788–2795.
- ⁸ Vandewalle G, Schmidt C, Albouy G et al. Brain responses to violet, blue and green monochromatic light exposures in humans: prominent role of blue light and the brainstem. *PLoS One* 2007b; 2:e1247.
- ⁹ Vandewalle G, Archer S. N, Wuillaume C, et al.. Effects of light on cognitive brain responses depend on circadian phase and sleep homeostasis. *Journal Biology Rhythms* 2011a; 26: 249–259.
- ¹⁰ Okamoto Y, Nakagawa S. Effects of daytime light exposure on cognitive brain activity as measured by the ERP P300. *Physiology & Behavior* 2015; 138: 313–318.
- ¹¹ Chellappa S. L, Ly J. Q, Meyer C, et al. Photic memory for executive brain responses. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.* 2014; 111: 6087–6091.
- ¹² Viola AU, James LM, Schlangen LJM et al. Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health* 2008; 34(4):297-306.
- ¹³ Keis O, HannahHelbig B, JudithStreb A et al. Influence of blue-enriched classroom lighting on students' cognitive performance. *Trends in Neuroscience and Education* 2014; 3: 86–92.
- ¹⁴ Münch M, Nowozin C, Regente J et al. Blue-Enriched Morning Light as a Countermeasure to Light at the Wrong Time: Effects on Cognition, Sleepiness, Sleep, and Circadian Phase. *Neuropsychobiology* 2016; 74: 207-218.
- ¹⁵ Choi K, Shin C, Kim, T et al. A wakening effects of blue-enriched morning light exposure on university students' physiological and subjective responses. *Scientific Reports* 2019; 9:345 DOI:10.1038/s41598-018-36791-5.
- ¹⁶ Lok R, Woelders T, Gordijn C. M. et al. White Light During Daytime Does Not Improve Alertness in Well-rested Individuals. *Journal of Biological Rhythms* 2018;. 33: 637–648.
- ¹⁷ Correa A, Barba A, Padilla F. Light Effects on Behavioural Performance Depend on the Individual State of Vigilance. *PLoS ONE* 2016; 11(11): e0164945.
- ¹⁸ Lok R, Smolders K.C.H.J, Beersma D.G.M, and Y.A.W. de Kort .Light, Alertness, and Alerting Effects of White Light: A Literature Overview .*Journal of Biological Rhythms* 2018 Vol. 33 No. 6, 589– 601.
- ¹⁹ Souman JL, Tinga AM, Pas SF, van Ee R, and Vlaskamp BNS.Acute alerting effects of light: a systematic literature review. *Behav Brain Res* 2018; 337:228-239.