

**זיהום אור וצמצומו
רקע מדעי, תמונת מצב
ודרכי פעולה אפשריות**

**סיכום ותובנות של ועדת מומחים
2017**

עריכה: ד"ר ערן ברוקוביץ'

חברי ועדת המומחים (על פי סדר אל"ף-בי"ת): אביב אבישר¹, ד"ר חגית אולנובסקי², ד"ר ערן ברוקוביץ'³, פרופ' ענת ברנע⁴, אינג' גלעד גוזני⁵, אינג' אלכס גולדין⁶, אבי גלבע⁷, עמית גרין⁸, יעל הולנדר וולפרט⁹, ד"ר אנה טרכטנברוט¹⁰, יערה ישראלי¹¹, אינג' יוסי כהן¹², נועה כהן-אורגד¹³, יהלי כץ¹⁴, צליל לבין¹⁵, פרופ' אורן לוי¹⁶, פרופ' נעם לוין¹⁴, ד"ר נעם לידר¹⁷, נורית מירון¹, ד"ר יריב מליחי¹⁷, יהודה מרכוס⁷, הדס מרשל⁹, ד"ר אינה ניסנבאום¹⁸, ד"ר סטיליאן גלברג¹¹, ד"ר נגה סטמבלר^{3,19}, אינה פישר²⁰, ד"ר רון פרומקין²¹, ד"ר שירי צמח שמיר^{23,22}, מיכאל צוקראן⁵, אינג' דני קלינה²⁴, פרופ' נגה קרונפלד-שור¹⁵, ד"ר אוהד קרני¹¹, טל רובין¹⁵, אלון רוטשילד²⁵, יוסי רינסקי¹⁸

שיוך מוסדי של חברי הוועדה:

¹עיריית נתניה, ²SP-Interface, ³האגודה הישראלית לאקולוגיה ולמדעי הסביבה, ⁴האוניברסיטה הפתוחה ויו"ר העמותה לזואולוגיה בישראל, ⁵אור מכון, ⁶גולדין לייט שירותי הנדסת תאורה, ⁷אולטרא-טק תאורה, ⁸מכון שינה אסותא, ⁹היחידה האזורית לאיכות הסביבה בשרון, ¹⁰המשרד להגנת הסביבה, ¹¹עיריית ירושלים, ¹²חברת החשמל לישראל, ¹³עיריית הרצליה, ¹⁴האוניברסיטה העברית בירושלים, ¹⁵אוניברסיטת תל-אביב, ¹⁶אוניברסיטת בר אילן, ¹⁷רשות הטבע והגנים, ¹⁸האגודה הישראלית לתאורה, ¹⁹סטמבלר יעוץ מדעי, ²⁰עיריית פתח תקוה, ²¹פרומקין יעוץ אקולוגי, ²²המרכז הבין-תחומי הרצליה, ²³אוניברסיטת חיפה, ²⁴הוועדה הישראלית להנדסת המאור - CIE ישראל, ²⁵החברה להגנת הטבע

עריכת לשון: ענבר קמחי-אנגרט

עיצוב גרפי: Touch

ציטוט מומלץ (כותבי המסמך): צליל לבין, אביב אבישר, שרית ברנד-קליבנסקי, ענת ברנע, גלעד גוזני, אלכס גולדין, אודי גלוסשניידר, אנה טרכטנברוט, יוסי כהן, נעם לוין, נעם לידר, אינה ניסנבאום, בלה סביצקי, נגה סטמבלר, טליה פונצ'ק, שירי צמח שמיר, נגה קרונפלד-שור, אלון רוטשילד, אושרי רינות וערן ברוקוביץ'. 2017. זיהום אור וצמצומו. רקע מדעי, תמונות מצב ודרכי פעולה אפשריות. סיכום ותובנות של ועדת מומחים. האגודה הישראלית לאקולוגיה ולמדעי הסביבה. עמודים 74

Tzlil Labin, Aviv Avisar, Sarit Brand-Klibanski, Anat Barnea, Gilad Gozani, Alex Goldin, Udi Gluschnaider, Yossi Cohen, Noam Levin, Noam Leader, Inna Nissenbaum, Bella Savitsky, Noga Stambler, Talya Ponchek, Shiri Tsemah Shamir, Noga Kronfeld-Schor, Oshri Rinot & Eran Brokovich. 2017. Light pollution and its mitigation - Scientific background, current status and possible action plans. Experts' opinion, The Israel Society of Ecology and Environmental Sciences. pp 74

| תוכן עניינים |

5	על אודות ועדות המומחים של האגודה הישראלית לאקולוגיה ולמדעי הסביבה
7	סיכום בכותרות
8	עיקרי הדברים
12	[1] קצת על אור
14	[2] מהו זיהום אור?
22	[3] היקף זיהום האור ואבדן שמי הלילה
34	[4] המנגנון הפיזיולוגי המושפע מזיהום אור
38	[5] השפעות בריאותיות של זיהום אור
42	[6] השפעות אקולוגיות על החי והצומח
50	[7] אסדרה לצמצום זיהום אור בעולם ובארץ
59	[8] סיכום והמלצות ועדת המומחים
72	רשימת נספחים
73	נספח 1: סוגי זיהום אור נוספים



על אודות ועדות המומחים של האגודה הישראלית לאקולוגיה ולמדעי הסביבה

.....

שמירה על הסביבה ועל מערכות אקולוגיות מורכבות מצריכה ידע מדעי נרחב, מדויק ועדכני. עם זאת, קיומו של גוף ידע כזה המבוזר במוסדות האקדמיה בלבד, אינו מספיק לשם קבלת החלטות מדיניות מושכלות. מצד אחד, צריך שחוקרים, מומחים בעלי ידע, יהיו מעוניינים ומסוגלים להעביר אותו למקבלי ההחלטות בצורה ברורה; מהצד האחר, מעצבי המדיניות ומקבלי ההחלטות נדרשים לקבל את כל המידע שהם זקוקים לו, להבין ולהטמיע אותו בתוך תהליך קבלת ההחלטות. חרף רצון שני הצדדים להעזר האחד בשני, נוצר לעיתים מצב בו מתקשים שני קצוות אלה – המשתמש שהוא קובע המדיניות, והמדען שהוא בעל הידע – למצוא את הדרך לקיים את מערכת זרימת המידע הנדרשת כדי להבטיח מדיניות סביבה מבוססת מדע.

האגודה הישראלית לאקולוגיה ולמדעי הסביבה (ע"ר) פועלת לטיפוח הקהילה המדעית ולשיפור מדיניות הסביבה בישראל באמצעות קידום מעמד השיח המדעי, הנגשתו והטמעתו בקרב מעצבי דעת הקהל וקובעי המדיניות בישראל.

בחזונה של האגודה ידע מדעי בנושאי הסביבה בישראל משמש בסיס איתן לתהליכי קבלת החלטות במישור הלאומי והמקומי. ידע זה צריך להיות זמין ונגיש לעובדי ציבור, לארגונים אזרחיים ולציבור הרחב ולהשתלב בקידום מדיניות סביבתית מושכלת לשיפור מצב הסביבה בישראל.

כדי להתמודד עם האתגר הרב-ממדי של שמירת הסביבה ושל חיבור בין מדענים לקובעי מדיניות, ייסדה האגודה מנגנון של ועדות מומחים שעוסקות בסוגיות ספציפיות ופועלות באמצעות קידום שיתוף פעולה בין האקדמיה, מכוני המחקר הממשלתיים ואנשי המקצוע במשרדי הממשלה.

לאגודה ניסיון רב-שנים של יצירת שיתוף פעולה בין המאסדר ובין מדענים למתן מענה מדעי לשאלות ניהול משאבי טבע ועיצוב מדיניות סביבה שעל הפרק.

הסוגיה הנדונה במסמך זה היא סוגיית זיהום אור וצמצומו

מסרתה של הוועדה לכנס תחת קורת גג אחת את מומחי הבריאות, האקולוגיה והתאורה, לצד גורמי ממשלה רלוונטיים, כדי להבין את הבעיות העולות כתוצאה מזיהום האור בישראל, לאתר את פערי הידע ולבחון יחד דרכי פתרון לצמצום זיהום זה ונזקיו.



סיכום בכותרות

.....

- תאורה נדרשת לכל היבט בחיי היום-יום שלנו, והיא מאפשרת את חיינו כפי שאנו מכירים אותם.
 - בתכנון לקוי ולא מדויק עשויה התאורה להפוך ממשאב למטרד. מערכות התאורה הקיימות מעוצבות או מותקנות לרוב בצורה לוקה בחסר – הן מבחינת שמירה על בריאות האדם וסיפוק צרכיו, הן מבחינת יעילות בצריכת האנרגיה, הן מבחינת יצירת השפעות סביבתיות שליליות. תאורה שכזו, היוצרת השפעות שליליות העולות על החיוביות, גורמת לזיהום אור.
 - זיהום אור יתבטא בעיקר בהארה במקום, בזמן או בעוצמה שאינו נדרש בהם או שאינו מצוי בהם כחלק ממשטר התאורה הטבעי (זיהום אקולוגי).
 - צמצום זיהום האור מונע פגיעה בבריאות האדם ובטבע, מקטיץ את בזבז האנרגיה, וחוסך כסף.
- ההמלצות העיקריות של הוועדה הן:
- יש להכיר בזיהום אור כמפגע סביבתי המחייב נקיטת צעדי אסדרה (רגולציה) למזעורו, בראש ובראשונה על ידי המשרד להגנת הסביבה משרד הבריאות ומערכת התכנון בישראל.
 - יש להעלות את המודעות לנושא זיהום האור בקרב הציבור ובקרב מקבלי החלטות.
 - על גופי השלטון והתכנון, צה"ל, גופי תשתית ורישיונות עסק (לרבות רישוי לאירועים ארעיים בשטחים הפתוחים) לחייב תכנון תאורה על פי תקנים.
 - יש לשפר תקנים הדורשים שיפור (למשל עדכון ת"י 13201) ולהשלים במהרה תקנים חסרים.
 - בעת תכנון תאורה יש לנקוט אמצעים שיבטיחו שהאור יאיר במקום ובזמן המתאימים ולמטרה שלשמה הוא מיועד. אמצעים אלה כוללים פרמטרים
- טכניים של גוף התאורה והנורה המאושרים על ידי יצרן גוף התאורה, מיקום גוף התאורה במרחב וכוונונו, וכן שעות התאורה ומשכה. בתוך כך יש:
 1. למנוע במידת האפשר זיהום אור באזורים רגישים (שמורות טבע, שטחים פתוחים, אזורי מגורים) ובזמנים שבהם הכרחי שיהיה חשוך (שעות הלילה).
 2. למנוע זיהירת רקיע על ידי מניעת פליטת אור ישירות אל קו האופק או מעליו.
 3. למנוע פיזור אור מחוץ לאזור שהוא מיועד אליו (פלישת אור).
 4. למנוע סנוור הנגרם מאור עודף, בעוצמה רבה מדי או שאינו ממוקם במקום הנכון.
 - יש לצמצם בלילה את השימוש באור לבן שעוצמתו בתחום אורך גל קצר (440-480 ננומטר) רבה, ושפוגע בטבע ובאדם.
 - מומלץ כי המשרד להגנת הסביבה ורשות הטבע והגנים יקיימו מערך לניטור זיהום אור בשטחים הפתוחים ובשמורות הטבע, שיוודא עמידה בהמלצות מסמך זה. כמו כן, מומלץ כי יתבצע ניטור תאורה באתרי טבע ובפארקים עירוניים.
 - יש לעגן את נושא תכנון התאורה וזיהום האור בקורסים אקדמיים בפקולטות המתאימות ולקדם תכנית לימודים ייעודית ללימודי המשך בתחום התאורה (תואר שני).
 - יש להקים מערך להכשרה מתאימה לעוסקים בתכנון תאורה, בביצוע ובפיקוח (מעבדות, מפקחים, המוסד לגיהות, המשרד להגנת הסביבה).
 - יש להעמיק את הידע והמחקר בתחום זיהום האור, השפעותיו על האדם ועל מערכות אקולוגיות.

עיקרי הדברים

.....

מאז החלו החיים על פני כדור הארץ, הדיוק שבמחזוריות היממית, הירחית והעונתית של התאורה הטבעית הוא אחד האותות החשובים המניעים תופעות ביולוגיות מהרמה המולקולרית ועד רמת המערכת האקולוגית, כמו למשל תפקוד תקין של מערכות מטבוליות ופיזיולוגיות, התנהגות פרטים והסתגלויות, פיזור גאוגרפי ומגוון המינים.

בנוסף לזיהום אור, שימוש עודף באור גורם לבזבז אנרגיה. כ-19% מייצור החשמל העולמי משמש לתאורה חשמלית. האנרגיה הנדרשת לתאורה מייצרת מדי שנה 1,900 מגה-טונות של פחמן דו-חמצני מתוך כ-40,000 מגה-טונות, וכרוכה בעלות שנתית של 360 מיליארד דולר.

מקורות זיהום האור מגוונים, וכוללים כמעט כל סוג תאורה מלאכותית שלא תוכנן תוך מחשבה על מזעור זליגת האור. תאורת כבישים, רחוב ושלטי פרסום, תאורה אמנותית, הארה לצורכי בטיחות וביטחון (למשל של מתקני תשתית), תאורה של מתקנים תת-ימיים וכלי שיט, תאורה ביתית, תאורת מגדלים ומבנים, תאורת כלי רכב ועוד. במרכז ישראל קשה לזהות אזורים שאינם סובלים מזיהום אור, וגם השטחים הפתוחים והחשוכים בדרום ישראל אינם רציפים, וסובלים מקיטוע על ידי תאורת כבישים וישובים.

התנהגותם של מרבית האורגניזמים בכדור הארץ מתוזמנת באמצעות שעות ביולוגי פנימי, בעל מחזוריות יממית של כ-24 שעות (מחזוריות צירקדי, circadian cycle). האות העיקרי המסנכרן את השעון הפנימי הוא מחזוריות האור והחושך. למחזוריות זו תפקיד מכריע בוויסות מקצבים ביולוגיים יומיים ושנתיים. השעון הקוצב את הפעילות אחראי על ניהול התזמונים

תאורה נדרשת לכל היבט בחיי היום-יום שלנו, והיא מאפשרת את חיינו באופיים הנוכחי. עם זאת, בתכנון לקוי ולא מדויק התאורה עשויה להפוך ממשאב למטרד. מערכות התאורה הקיימות מעוצבות או מותקנות, במקרים רבים, בצורה לוקה בחסר – הן מבחינת בריאות האדם וסיפוק צרכיו הן מבחינת הגבלת השפעות סביבתיות שליליות.

זיהום אור הוא מכלול ההשפעות השליליות של תאורה מלאכותית. הוא כולל הארה במקום, בזמן ובעוצמה לא רצויים לאדם, וכן הארה של מערכות אקולוגיות היוצרת הפרעה לדפוסי התאורה הטבעיים בצורות הבאות:

1. שינוי משטר התאורה הטבעי: הארה במקום ובזמן שאינה מצויה בהם כחלק ממשטר התאורה הטבעי, או בעוצמה רבה יותר מהתאורה הטבעית.
2. שינוי החתימה הספקטרית של האור: הארה השונה בעוצמה ובספקטרום מזו של אור השמש, הירח או הכוכבים.
3. הכנסת אור מהבהב במקומות שלא היה קיים באופן טבעי.
4. הכנסת מקורות לא טבעיים של אור מקוטב (אור מקוטב נוצר כאשר השדה החשמלי של גל האור מסודר כולו במישור אחד, לעומת אור שמש או נורה שבהם כיוון השדה החשמלי אקראי; למשל, אור מסכים, אור המוחזר ממשטחים כמו בנייני זכוכית, שדות פאנלים סולריים ועוד).

השפעת האור עשויה להיגרם כתוצאה מהשפעות ישירות של הארה מלאכותית, כמו גם כתוצאה מזהירות הרקע – פיזור התאורה על ידי מולקולות או אירוסולים באטמוספירה, המופצים מעלה.

הוויסות ההורמונלי ואת שחרור ההורמונים בגוף. הפרעה למחזוריות הגוף על ידי הארה עשויה להשפיע באופן מהותי על מחלות, כגון השמנת יתר, סכרת, דיכאון ודיכאון עונתי (Seasonal affective disorders), להביא לדיכוי מערכת החיסון, לעקה חמצונית ולהפרעות שינה ולהעלות את הסיכון לסרטן השד – כל המחלות המצויות בצמיחה בחברות המתועשות ובעולם המפותח. השפעות בריאותיות דומות צפויות גם על עולם החי, אם כי עדויות מחקריות על השלכות אלה נדירות.

זיהום אור משפיע על תהליכים רבים בעולם החי, כגון יצרנות ראשונית, חלוקת זמני פעילות במרחב בין מינים שונים, תיקון והבראה של תפקודים פיזיולוגיים, מזידת זמן באמצעות השעון הצירקדי, מחזורי חיים ירחיים ועונתיים, איתור משאבים ואיבים טבעיים, ניווט והתמצאות במרחב. מחקר מועט נעשה על השלכות התהליכים ברמת האוכלוסייה או המערכת האקולוגית, כגון פוריות, תמותה, יצרנות של חברות, הרכב מינים ויחסים בין רמות שונות בשרשרת המזון (תחרות, טריפה, תקשורת).

לסיכום, אף על פי שהאור כשלעצמו חיוני לאדם, זיהום האור פוגע בכולנו, ועולה לנו כסף רב. זיהום אור פוגע בבריאות הציבור ובבריאות המערכות האקולוגיות.

בגוף כולו, וחולש על מערכות גוף רבות. אצל יונקים, קולטני אור המצויים ברשתית העין (intrinsically photoreceptive Retinal Ganglion Cells – ipRGC) רגישים במיוחד לחשיפה לאור כחול באורכי גל קצרים – סביב 460 ננומטר, ומכילים חלבון בשם מלנופסין. האור מכייל קבוצת נוירונים המהווים יחד את המִתְנָד הצירקדי, שמפקח, בין השאר, על הפרשת ההורמון מלטונין מבלושת האצטרובל במוח. המלטונין שכיח בכל ממלכת החי (קיים גם אצל צמחים), ומנצח על שינויים בתפקודים פיזיולוגיים שונים בתגובה להשתנות אורך היום. המלטונין, המופרש בלילה, הוא חוליה קריטית שאחראית להעברת השפעות האור למסלול הנוירו-אנדוקריני (עצבי-הורמונלי) וכן ישירות למערכות גוף מסוימות.

תאורה לא מתאימה או שאינה מתוזמנת, ופגיעה בסנכרון הגוף עם מחזור התאורה הטבעי עשויות לגרום אצל בני אדם הפרעות לשעון הביולוגי, המסכנות את איכות החיים ומגבירות סיכונים למגוון מחלות ספציפיות. הפרעות צירקדיות, בעיקר אלה המשנות את הפרשת המלטונין, משבשות את מחזורי השינה והערות, את טמפרטורת הליבה של הגוף, את חילוף החומרים ודפוסיים של ביטוי גנים בגוף, ומשנות את



לפיכך, ועדת המומחים ממליצה על שורת פעולות למניעת זיהום אור ולצמצומו:

על מדינת ישראל להפנים את הצורך בתכנון מסודר של נושא התאורה כדי לצמצם את זיהום האור באופן כללי ולמנוע אותו במקומות רגישים. על הממשלה לערוך שינויים מהותיים בנושא התאורה בהתאם להמלצות להלן, ויש צורך בקביעת תקופת מעבר שלאחריה התאורה בישראל תהיה תאורה מתוכננת בהתאם לתקנים קיימים ולקווים המנחים במסמך זה.

- יש להכיר בזיהום אור כמפגע סביבתי המחייב נקיטת צעדי אסדרה למזעורו, בראש ובראשונה על ידי המשרד להגנת הסביבה ועל ידי משרד הבריאות כאחראים לאסדרה, ולאחר מכן ליישם ולהטמיע את הצעדים במערכת התכנון, בגופי תשתית וביוני, ברישוי עסקים, במערכת הביטחון, בחברות ממשלתיות וכדומה.
- יש להעלות את המודעות לנושא זיהום האור בקרב הציבור ובקרב מקבלי החלטות.
- אנו ממליצים למשרדי הממשלה לחייב תכנון תאורה על פי מפרטים ותקנים קיימים, כמו למשל המפרט הכללי לעבודות בנייה פרק 08 ות"י 13201 במסמכים סטטוטוריים, במכרזים, בתמיכות ובמענקים ציבוריים.
- הוועדה ממליצה לרשויות השלטון המקומי לפעול בהתאם להמלצות מסמך זה ובדומה לסעיף 3 לצורך תכנון מדויק של התאורה, צמצום זיהום האור בתחומן, מניעת בזבוז אנרגיה וחסכון כלכלי. במעבר לטכנולוגיות חדשות יש לבצע ניטור של האור במצב הקיים, לתכנן את השינויים בהתאם לתקנים ולבדוק את התוצאות המתקבלות לאחר ההתקנה.
- הוועדה ממליצה כי תבוטל החרגת האור הנראה מחוק הקרינה הבלתי מייננת (חוק הקרינה הבלתי מייננת, התשס"ו-2006) וכך לגרום שגם החוק למניעת מפגעים סביבתיים (חוק למניעת מפגעים סביבתיים (תביעות אזרחיות), התשנ"ב-1992) יחול

- על קרינת אור נראה. הוועדה ממליצה כי המלצות מסמך זה ייכנסו להמלצות האגף למניעת קרינה ורעש במשרד להגנת הסביבה, ויוגדרו כהנחיות מחייבות על ידי מוסדות התכנון השונים (לרבות ולמ"ב) בבואם לאשר תכניות סטטוטוריות.
- יש לשפר תקנים הדורשים שיפור (למשל עדכון ת"י 13201) ולהשלים במהרה תקנים חסרים כדי להבטיח כי תאורת הלילה תהיה יעילה בניצול האנרגיה, ותאפשר את צורכי האדם תוך מזעור ההשלכות השליליות של זיהום אור על האדם ועל הסביבה.
 - בעת תכנון תאורה יש לנקוט באמצעים שיבטיחו שהאור יאיר במקום ובזמן המתאימים ולמטרה שלשמה הוא מיועד. אמצעים אלה כוללים פרמטרים טכניים של גוף התאורה והנורה, מיקום גוף התאורה במרחב וכוונונו, וכן שעות התאורה ומשכה. בתוך כך יש:
 - למנוע ולהפחית זיהום אור באזורים רגישים (שמורות טבע, שטחים פתוחים, אזורי מגורים) ובזמנים שהחשכה הכרחית בהם (שעות הלילה).
 - למנוע זיהרת רקיע על ידי מניעת פליטת אור ישירות אל קו האופק או מעליו.
 - למנוע פיזור אור מחוץ לאזור שהוא מיועד אליו (פלישת אור).
 - למנוע סנוור הנגרם מאור עודף, בעוצמה רבה מדי או שאינו ממוקם במקום הנכון. - יש לצמצם את השימוש באור לבן שעוצמתו רבה בתחום אורך גל קצר (420-500 ננומטר) שפוגע בטבע ובאדם, למשל על ידי עמידה במפרט הכללי לעבודות בנייה פרק 08, כולל כל ההיבטים הבריאותיים והבטיחותיים (למשל בטיחות פוטוביולוגית ת"י 62471 הגדרת קבוצת סיכון 0).
 - יש להטמיע מפרטים למניעת זיהום תאורה בהנחיות מחייבות מטעם מוסדות התכנון, צה"ל, גופי תשתית ורישיונות עסק (לרבות רישוי לאירועים בשטחים הפתוחים).
 - מומלץ כי המשרד להגנת הסביבה ורשות הטבע והגנים יקיימו מערך לניטור זיהום אור בשטחים

יש לעגן את נושא תכנון התאורה וזיהום האור בקורסים אקדמיים בפקולטות המתאימות. יש להעמיק את הידע והמחקר בתחום זיהום האור והשפעותיו הבריאותיות על האדם ועל מערכות אקולוגיות. יש למצוא ערכי סף אקוטיים וכרוניים לזיהום אור.

הפתוחים ובשמורות הטבע, וכן מומלץ כי יתבצע ניטור תאורה באתרי טבע ופארקים עירוניים.
11. יש להקים מערך להכשרה מתאימה לעוסקים בתכנון תאורה, בביצוע ובפיקוח (מעבדות, מפקחים, המוסד לגיהות, המשרד להגנת הסביבה).

המלצות פרטניות להפחתת בזבז אור ולהורדת כמות האור

הבינוי והשיכון ב"קובץ הנחיות למתכנן לתאורת כבישים, רחובות וגנים ציבוריים".

4. יש להעריך את עוצמת האור הדרושה בהתאם

למטרת ההארה. אנו ממליצים שעוצמות האור בתקן 13201 לתאורת דרכים יהיו עוצמות אור מרביות, ושכל מקרה לא תותר חריגה מעבר ל-30% מהתקן (כולל מדדי התחזוקה)*.

5. יש להגביל את זמני ההארה וליצור שעות חושך

בכל מקום אפשרי או לפחות להקטין את עוצמת התאורה בשעות שהיא נדרשת פחות. בשעות של חוסר פעילות אנו ממליצים לתכנן את עוצמת התאורה המרבית על פי תקן CIE 126-1997.

6. הוועדה ממליצה להקפיד במיוחד על מניעת זיהום אור באזורים המיועדים לשמירת טבע ולהגנה על מערכות אקולוגיות.

7. במקומות שנעשתה כבר החלפה לטכנולוגיות מתקדמות, מומלץ לבחון את ההתאמה לדרישות התקנים וההנחיות לעוצמת ההארה ולספקטרום כפי שמוצגות בדו"ח זה.

8. במסמך מפורטות המלצות פרטניות לפי אזורים שונים (שטחים פתוחים ושמורות טבע, מרחב ביטחוני או תאורה ביטחונית, מרחב ציבורי בנוי באזורים כפריים ועירוניים, המרחב הפרטי ומקומות עבודה).

* כמו כן ראו דעת מיעוט בהמלצות הוועדה בעמוד 63.

תכנון תאורה הוא המפתח לתאורה נכונה, כלומר לתאורה בעוצמה מתאימה, חסכונית באנרגיה ובעלת השפעות שוליות מזעריות.

1. יש להפחית את כמות האור שפונה או זולגת כלפי מעלה. יש להאיר רק את מה שצריך להאיר ובעוצמה המזערית הדרושה.

2. יש להגדיר את כמות האור הנדרשת על פי אפיון

אזורים שונים. אנו ממליצים ליצור מפה של אזורי אור ולתכנן תאורה על פי הצרכים ובהתאם לתקנים המתאימים (13201 לדרכים, CIE 126-1997 להפחתת זהירת רקיע, CIE 150:2003 לצמצום השפעת תאורת חוץ ו-EN12464-2 עבור שטחים שאינם דרכים).

3. יש להקטין ככל הניתן את הרכיב הכחול בתאורה

חיצונית בלילה. עקב האופי הפוגעני של אור כחול בשעות הלילה למערכות השעון הביולוגי ועקב הנזק הפוטנציאלי שעלול להיגרם בתנאים מסוימים לעין עצמה, אנו ממליצים לנקוט משנה זהירות ולהפחית ככל הניתן את השימוש באור לבן שעוצמתו גבוהה בתחום אורך גל קצר (420-

500 ננומטר). לשם כך אנו ממליצים להשתמש בתאורה בטמפרטורה נומינלית של 3,000 מעלות קלווין (Kelvin) או פחות, עם ערך מרבי (פיק) של הקרינה בתחום הכחול של הספקטרום, 420-500 ננומטר, של עד 55% מהעוצמה המרבית הנפלטת*.

המלצות ברוח זו הוטמעו כבר בתוך "המפרט הכללי לעבודות בנייה, פרק 08" ובהנחיות של משרד

{1}

קצת על אור

.....

ניתן גם לסווג את האור על פי טמפרטורה במעלות קלווין, המשולה לטמפרטורה של גוף שחור שמחממים אותו והוא מתחיל לפלוט אור – מאדום בטמפרטורות נמוכות ועד ללבן שמושג בטמפרטורות גבוהות. צבע השמיים ביום מעונן קלות יהיה 6,500 מעלות קלווין לערך, ולקראת שקיעה, כשהאור נעשה אדמדם, הטמפרטורה עשויה לרדת עד לכ-3,200 מעלות קלווין (פירוט נוסף בסעיף "כיצד מודדים זיהום אור?").

Digital Number – DN הוא ערך הניתן לכל פיקסל בתמונה דיגיטלית בחישה מרחוק, ויכול לשמש להערכת עוצמת התאורה.

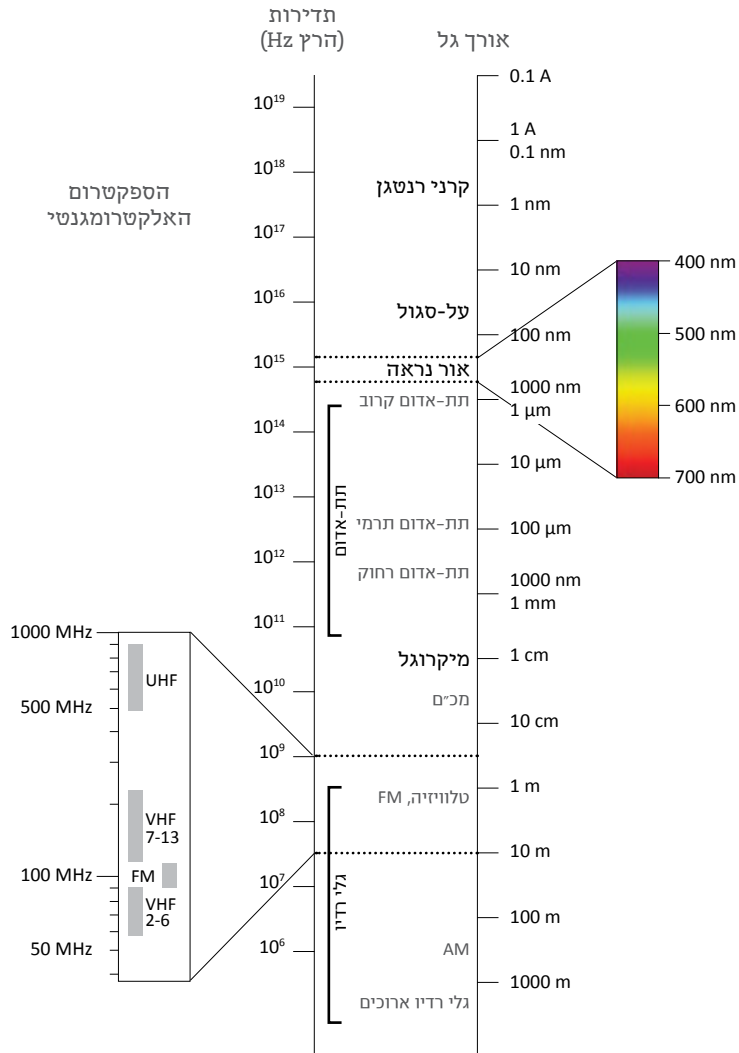
עד לפני מספר שנים, רוב החיישנים ששימשו למיפוי זיהום אור מהחלל (DMSP), צילומים של אסטרונאוטים מתחנת החלל הבינ-לאומית, (SAC-C, EROS-B) לא היו מכילים ליחידות של שטף קרינה, כך שעוצמת הקרינה בלילה נמדדה ביחידות יחסיות של DN. אחד החיישנים על הלוויין VIIRS ששוגר בשנת 2011, הוא הראשון שמודד את התאורה בלילה ביחידות רדיומטריות, של $3.2,1 \text{ nanoWatts}/(\text{cm}^2\text{xsr})$.

האור הנראה והלא הנראה הם חלק מהספקטרום האלקטרומגנטי, שהוא אוסף כל הגלים האלקטרומגנטיים בכל התדרים האפשריים (איור 1). כאשר מדברים על ספקטרום או טווח ספקטרי של אור, בדרך כלל מתייחסים לתחום הנראה או הקרוב לנראה ולהרכב הצבעים השונים ולעוצמתם, המרכיבים את האור הכללי.

כל גל אלקטרומגנטי (וגלים בכלל) ניתן לאפיין על פי התדר שלו (מספר חזרות בשנייה) או על פי אורך הגל שלו (המרחק שהגל משלים בו מחזור מלא). אורכי הגל השונים באור הנראה מפורשים על ידי המוח האנושי כצבעים, מאדום באורכי הגל הארוכים ביותר, ועד סגול באורכי הגל הקצרים ביותר. אורך הגל קשור ביחס הפוך לתדירות הגל, באמצעות הנוסחה: $f = \frac{c}{\lambda}$ שבה f היא התדירות, λ הוא אורך הגל ו- c היא מהירות האור. את צבע האור ניתן לסווג על פי אורך הגל שלו. האור הנראה נע בערך בין 400 ל-750 ננומטר ותהליך הפוטוסינתזה (יצרנות ראשונית) מתבצע בו, התחום התת-אדום, IR, נמצא מעל 750 ננומטר, והוא למעשה פליטת חום, התחום העל-סגול, UV, נמצא בתחום 200–380 ננומטר.

1. Levin et al. (2014). A new source for high spatial resolution night time images – The EROS-B commercial satellite. *Remote Sens. Environ.* 149, 1-12
2. Levin & Duke. (2012). High spatial resolution night-time light images for demographic and socio-economic studies. *Remote Sens. Environ.* 119, 1-10
3. Chalkias & Letu. (2015). In: Thenkabail (ed.). *Remote Sensing Handbook*. Taylor and Francis. pp. 289-310

איור 1: מיקומו של האור הנראה בספקטרום האלקטרומגנטי



{2}

מהו זיהום אור?

.....

עוצמת ההארה תצנח ל-0.0001 לוקס. לצורכי השוואה, תאורת רחוב נפוצה מאירה בעוצמה של 10-40 לוקס, ומקורות אור מלאכותיים אחרים צפויים להיות אף חזקים יותר. במרבית המקרים ממוקמת תאורת הרחוב בגובה מספר מטרים, ויוצרת זהירות רקיע. זהירות הרקיע לבדה, בשמיים מעוננים באזור עירוני, משתווה בעוצמתה לאורו של ירח מלא בליל הקיץ (כאשר הירח במרחק המרבי מכדור הארץ), ולא פעם עוצמת ההארה של זהירות הרקיע אף חזקה יותר⁵.

באופן כללי, זיהום אור הוא סך ההשפעות השליליות של תאורה מלאכותית. להגדרה זו נכנס גם זיהום אור אקולוגי שהוא הפרעה לדפוסי התאורה הטבעיים, שעשויה להיגרם כתוצאה מהשפעות ישירות של תאורה מלאכותית כמו גם כתוצאה מזהירות הרקיע – פיזור התאורה על ידי מולקולות או אירוסולים באטמוספירה, המופצים מעלה. יש לציין שזיהום אור אקולוגי משפיע גם על האדם כמפורט בהמשך.

מאז שהחלו החיים על פני כדור הארץ, היו המחזוריות הימית, הירחית והעונתית של התאורה הטבעית אות חשוב לחיזוי השינויים הסביבתיים. מחזוריות התאורה הטבעית הניעה התפתחות של תופעות ביולוגיות מהרמה המולקולרית ועד רמת המערכת האקולוגית, ובהן תפקוד מערכות מטבוליות ופיזיולוגיות, התנהגות פרטים והסתגלויות, פיזור גאוגרפי, מגוון מינים ותופעות נוספות⁴. במהלך 100 השנים האחרונות אנו עדים לשימוש נרחב בנוורות חשמליות, שמשבש את משטרי התאורה הטבעיים, שהיו עד אז מקצבים יציבים לאורך תקופות גאולוגיות ואבולוציוניות ארוכות^{5,4}.

שיבושים אלה מתאפיינים במספר רכיבים: עוצמה וספקטרום, המפורטים להלן, וגם הבהוב וקיטוב המפורטים בנספח 1:

1. עוצמה: התאורה המלאכותית מפיצה אור בעוצמות חזקות יותר מהאור בסביבת הלילה הטבעית (טבלה 1). ירח מלא בשמי לילה נקיים מעננים מאיר בעוצמה של 0.1 לוקס (הגדרת היחידות בהמשך המסמך). בלילה מעונן כשהירח חסר,

טבלה 1: רמות הארה שונות⁶

עוצמת הארה בלוקס	מקור אור
103,000	אור שמש מלא
50,000	אור שמש חלקי
10,000-1,000	יום מעונן
0.3-0.1	ירח מלא בלילה בהיר
0.03-0.01	רבע ירח
0.001	לילה ללא ירח עם כוכבים
0.0001-0.00003	שמי לילה מעוננים
18,000	שולחן ניתוחים
600-400	משרד מואר היטב
300-100	רוב בתי המגורים
15	אורות רחוב ליד כבישים ראשיים (ממוצע)
10	מגרשי חניה מוארים
5	רחובות של שכונות מגורים (ממוצע)
0.15	זהירות רקיע בעיר

4. Gaston et al. (2015). The biological impacts of artificial light at night: the research challenge. *Phil. Trans. R. Soc. B.* 370, 20140133

5. Gaston et al. (2014). Benefits and costs of artificial nighttime lighting of the environment. *Environ. Rev.* 10, 1-10

6. Gaston et al. (2013). The ecological impacts of nighttime light pollution: A mechanistic appraisal. *Biol. Rev.* 88, 912-927

2. ספקטרום: לתאורה מלאכותית טווח ספקטרי צר והרכב צבעים ועוצמות שונה מזה של אור השמש, הירח או הכוכבים (הרכב ספקטרי או חתימה ספקטרית שונה):
הטווח הספקטרי של התאורה המלאכותית נע בין טווח ספקטרי צר של נורות הנל"ן - נורת נתרן בלחץ נמוך, לטווח רחב של נורות קסנון (HID - High Intensity Discharge) ונורות לד (LED - Light Emitting Diode). טכנולוגיות ההארה מגוונות ומשתנות בין אזורים גאוגרפיים, אך גם ברמה המקומית קיימת נטייה לשימוש בטכנולוגיות הטרוגניות יחסית. בשנים האחרונות נצפית מגמה של מעבר לשימוש במקורות אור "לבנים" יותר, המאופיינים לא פעם בהרכב רב עוצמה של אור כחול מתוך הטווח הספקטרי, בעיקר כשהארה מבוצעת באמצעות תאורת לד (איור 2)⁴. יש לציין כי טכנולוגיית הלד מתפתחת כיום לכיוון של צמצום האור הכחול (איור 3).

לנורות נל"ן - נורות המפיקות אור בטווח ספקטרי צר באזור 589.3 ננומטר. טכנולוגיות חדישות יותר נוטות לא פעם להפיק אור בטווח ספקטרי נרחב, כגון נורות מסוג נל"ג (נתרן לחץ גבוה) המפיקות אור צהוב וזליגה של אורכי גל בגוונים נוספים; נורת HID - המפיקה אור בהיר יותר עם עוצמות משמעותיות יותר של אורכי גל בגוונים כחול ועל-סגול; נורת הלד האופיינית, שבדרך כלל מפיקה אורכי גל בטווח שבין 400 ל-700 ננומטר עם שיאי עוצמה באורכי הגל היוצרים גוונים כחולים וירוקים.

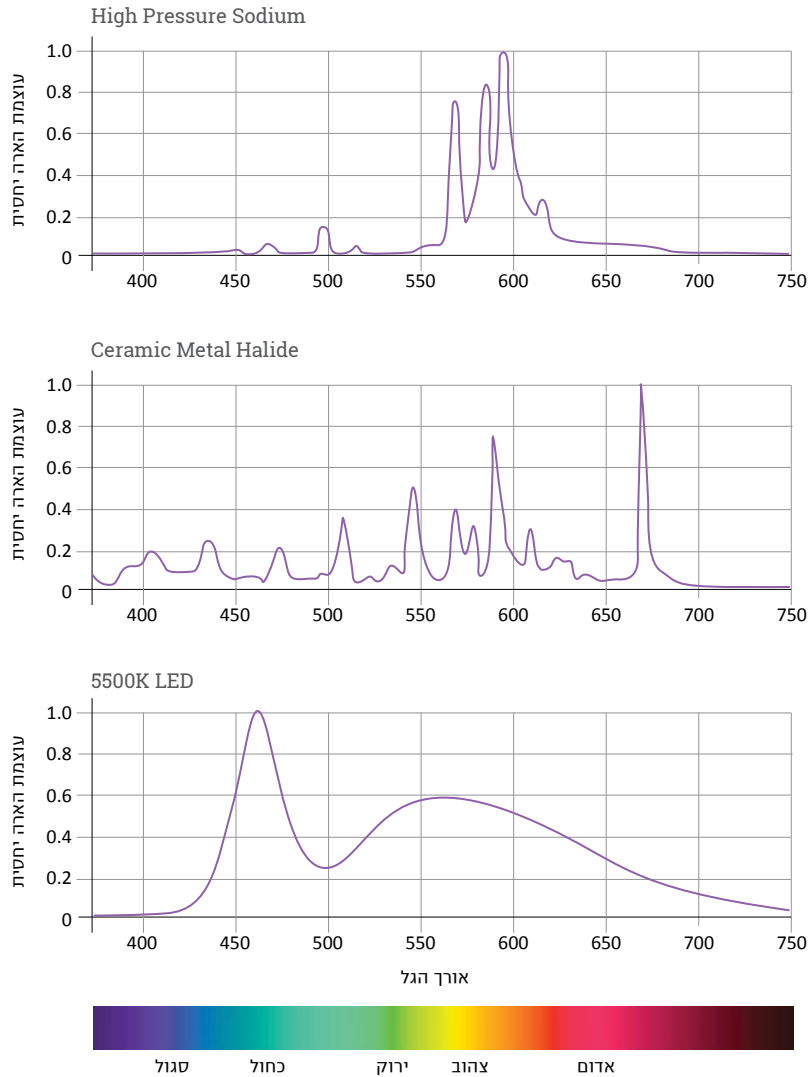
שינויים כאלה משפיעים לא רק על ההרכב הספקטרי של האור הישיר אלא גם על זהירות הרקיע⁵ נורה נוספת הנפוצה בעיקר לתאורה חיצונית במקומות שנדרשת העברת צבע טובה, כמו שטחי מסחר ואצטדיונים, היא נורת מטאל הליד. נורה זו פועלת על עיקרון של זרם חשמלי באדי פחם או באדי הלוגנים ומתכות שונות, וגוון ההארה שלה לבן-כחלחל⁷.

בכל מקרה ההרכב הספקטרי של התאורה המלאכותית שונה מהותית מהטבעית, ועל כן עלול להיות בעל השפעות שקשה להעריכן.

בבריטניה, לדוגמה, הנורות החשמליות בשימוש היו בעיקרן נורות להט שמפיקות אורכי גל המייצרים אור צהוב במרבית המקרים. בשנות ה-60 וה-70 החל מעבר

7. פורטל החשמל. כניסה ביוני 2016 הלייד - נורות פריקה---כספית-נלג-מטל-<http://www.israelelectric.net/article>

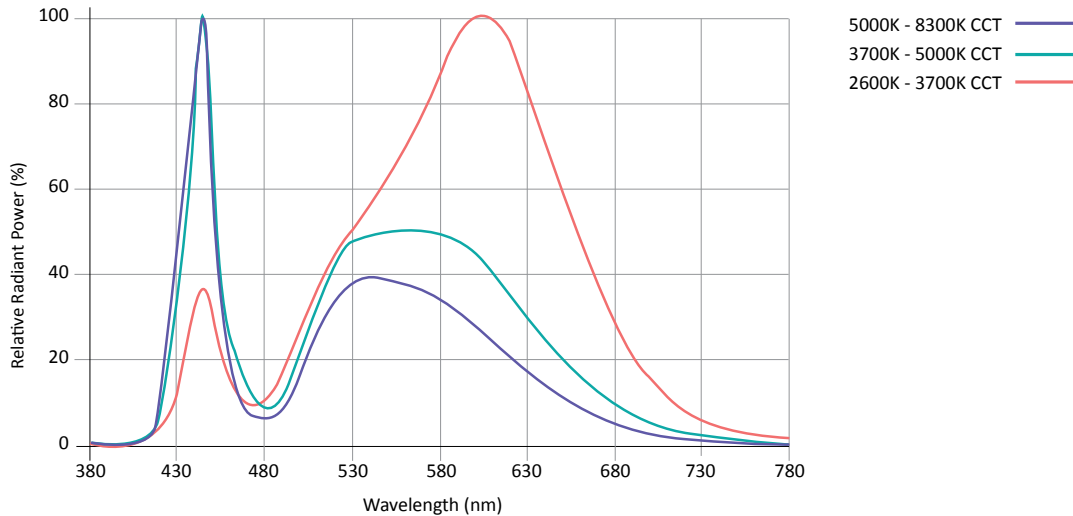
איור 2: הרכב ספקטרי של סוגי נורות שונות. מלמעלה למטה: 1. ההרכב הספקטרי של נורת נל"ג בעלת פיזור סביב 550-650 ננומטר, נורה המצויה בשימוש כמעט בלעדי לתאורת כבישים בישראל⁸. 2. נורת מטאל הליד בעלת הרכב ספקטרי רחב. 3. הרכב ספקטרי של נורת לד מטיפוס BRWL בעלת טמפרטורה של 5,500 מעלות קלווין - פיזור גבוה באורכי גל קצרים סביב 450 ננומטר⁹. יש לציין כי קיימות נורות לד בעלות שיא קטן הרבה יותר בתחום הכחול, בדרך כלל בעלות טמפרטורה מתחת ל-3,000 מעלות קלווין. לנורות נוספות ראו⁶



8. לידר. (2010). חוות-דעת בנושא תאורת LED. רשות הטבע והגנים

9. IDA. (2010). Visibility, environmental, and astronomical issues associated with blue-rich white outdoor lighting. International Dark-Sky Association. Tucson-Washington, DC

איור 3: עוצמת הארה לאורך הספקטרום של נורות לד חדישות. ניתן לראות כי הנורות החמות יותר (באדום) בעלות עוצמה מרבית (פיק) קטנה יחסית בתחום הכחול המזיק (הגרף מתוך דפי מידע מנורת ה-XLAMP של חברת CREE).



הגדרות נפוצות

זיהום אור בריאותי – זיהום אור אקולוגי המשפיע על בני האדם. הזיהום פוגע לא רק בבעלי החיים, וישנה גם השפעה על בני האדם המפורטת בהמשך. לצורך מסמך זה נקרא לתופעה זו זיהום אור בריאותי.

אור פולש - אור שאינו מכוון כראוי וחודר לשטח פרטי: ישירות לחצר או דרך החלון לפנים הבית.

המקורות לזיהום אור כיום מגוונים, וכוללים תאורת כבישים, תאורת רחוב ושלטי פרסום, תאורה הנובעת משיקולים ארכיטקטוניים, הארה לצורכי ביטחון, תאורה של מתקני מחקר תת-ימיים וכלי שיט, תאורה ביתית, תאורת מגדלים ומבנים, תאורת אירועי פנאי בחיק הטבע ותאורת כלי רכב. כל מקורות האור האלה עלולים להשפיע באופן שלילי, ופוגעים בבריאות האדם ובתפקוד מערכות אקולוגיות ברמות שונות ובקני מידה נרחבים במרחב ובזמן¹⁰.

זהירת רקיע (Sky glow) – תופעה רחבת היקף של מאות אלפי מקורות אור המצטברים יחד ותורמים להארת שמי הליל. התאורה המשתקפת חזרה מן הרקיע היא זהירת הרקיע¹⁰.

זיהום אור אסטרונומי (Astronomical light pollution) – תופעת טשטוש מראה הכוכבים וגרמי שמיים על ידי תאורה ישירה או השתקפותה¹⁰.

שמי לילה מזוהמים (Polluted night sky) – כשהבהירות המלאכותית של השמיים גבוהה ב-10% או יותר מבהירותם הטבעית של שמי הליל, ברום שמעל 45 מעלות¹¹.

זיהום אור אקולוגי (Ecological light pollution) – תאורה מלאכותית הגורמת לשינויים במשטר התאורה הטבעי של אור/חושך במערכות אקולוגיות¹⁰.

¹⁰ Longcore & Rich. (2004). Ecological light pollution. Front. Ecol. Environ. 2, 191-198.

¹¹ Cinzano et al. (2001). The first World Atlas of the artificial night sky brightness. Mon. Not. R. Astron. Soc. 328, 689-707.



האקולוגיה המקומית, השפעותיהן נותרו מוגבלות. התאורה החשמלית – המצאה חדשה יחסית ששגשה ונפוצה במהירות – שינתה את סביבת הלילה באזורים רבים על פני כדור הארץ¹⁰. המצב נעשה דינמי במיוחד בשנים האחרונות, כשפיתוחים טכנולוגיים, כדוגמת

כפעילי יום, בני האדם תרו זמן רב אחר שיטות להארת הלילה. לפני המהפכה התעשייתית נעשה שימוש במגוון אמצעי הארה המבוססים על שימוש בעץ להבערה, בנפט ואף בדגים מיובשים. בעוד שיטות ההארה הללו השפיעו במידה ניכרת על התנהגות בעלי החיים ועל

באנרגיה ובעלת השפעה סביבתית נמוכה, קיימות מערכות תאורה שאינן מתוכננות כהלכה, כפי שניתן לראות במקרים רבים בתאורת החוץ, ולוקות בחסר הן מבחינת סיפוק צורכי האדם ושמידה על בריאותו הן מבחינת השפעות סביבתיות שליליות.

שינויים שנועדו לייצר תאורה לבנה יותר, ניהול מרכזי של מערכות תאורה ומיזמים לשילוב תאורה המופעלת בשיטות סולריות באזורים כפריים⁵, הפחיתו את צריכת האנרגיה לשימוש בתאורה באזורים המפותחים וברבים מן האזורים המתפתחים. בעוד שההתקדמות הטכנולוגית מאפשרת כיום תאורה ממוקדת, יעילה מבחינת השימוש

כיצד מודדים זיהום אור?

ההגדרה המדעית של קנדלה היא: עוצמת האור בכיוון נתון ממקור המפיק קרינה מונוכרומטית בתדר 540 טרה-הרץ בעוצמה של $1/683$ ואט לסטרדיאן (יחידת מידה לזווית במרחב תלת-ממדי, כמו למשל זווית שתתאר קצה של חרוט).

התדר 540 טרה-הרץ (צבע ירוק) הוא תדר הרגישות המרבית של העין האנושית. המקדם נועד כדי ליצור זהות עם ההגדרה הקודמת של הקנדלה.

הקנדלה כיחידה פיזיקלית עברה מספר שלבים עד להגדרתה הנוכחית: בתחילה הוגדרה על פי עוצמת ההארה של להבת נר, לאחר מכן על פי הזוהר הנפלט מפלטינה בנקודת ההתכה שלה. כיום נגזרת הגדרת הקנדלה מהגדרת היחידה המקובלת למדידת הספק חשמלי – הוואט.

שטף הארה – נמדד ביחידות לומן (סימול מקובל lm), יחידות מידה פוטומטריות למדידת עוצמת אור. לומן נגזר ממערכת היחידות הבין-לאומית, ומשמש לצורך מדידות של עוצמת האור שנקלט על ידי עין אנושית. דהיינו, מספר הלומנים תלוי בספקטרום של האור הנפלט ובכמות החלק הנראה בעין אנושית.

כדי למדוד את האור ביחידות לומן יש למדוד את הכמות הכוללת של האור הנראה שנפלט בזווית מוגדרת ממקור או ממקורות אור מסוימים. לומן מוגדר כיחידת קנדלה אחת (סימול מקובל cd) על פני סטרדיאן אחד.

לאור יש שתי תכונות עיקריות החשובות למדידה בהקשר של זיהום אור. הראשונה היא עוצמת האור והשנייה היא ההרכב הספקטרי, דהיינו צבע או צבעי האור המתבטאים באורכי גל שונים. ישנן מספר דרכים ומספר יחידות מקובלות למדידת עוצמת האור, שטף האור והספק האור.

היחידות הפוטומטריות מודדות את האור בהתאם ליכולת הראייה של העין האנושית. דהיינו, כל צבע נמדד בהתאם לרגישות העין לאותו צבע. לעומתן ניתן למדוד את אנרגיית האור על פני כל הספקטרום הנפלט ממקור האור (יחידות רדיומטריות) ללא מתן משקל שונה לצבעים שונים. לדוגמה, אור בתחום התת-אדום שאיננו מסוגלים לראות, יהיה שווה אפס ביחידות פוטומטריות, אבל בהחלט מדיד ביחידות רדיומטריות.

היחידות המתאימות לעין האנושית עשויות שלא להתאים למדידות הבחנות בעל חיים החי בסביבה שונה, כמו למשל מתחת למים, או לצמחים שחשובים להם אורכי גל המשמשים לפוטוסינתזה. למשל, לנחש המסוגל לראות בטווח התת-אדום, היחידות הפוטומטריות אינן רלוונטיות.

יחידות פוטומטריות:

עוצמת הארה – נמדדת בקנדלה (לטינית: Candela; מילולית, נר), יחידת מידה פוטומטרית למדידת עוצמת אור נראה. קנדלה מודדת שטף אור לזווית מרחבית, ומסומנת באותיות cd. הקנדלה היא אחת משבע היחידות הבסיסיות של מערכת היחידות הבין-לאומית.

לוקס (lx) מוגדר כמספר הלומנים למ"ר (שטף ליחידת שטח). כך, אם שטף של 1,000 לומן מתרכז לשטח של מ"ר אחד, הוא מאיר את אותו מ"ר בעוצמה של 1,000 לוקס. אם אותם 1,000 לומן יאירו שטח של 10 מ"ר, הם יפיקו עוצמת אור של 100 לוקס.

יחידות רדיומטריות:

נמדדות ביחידות של אנרגיה. יחידות המידה הרדיומטריות הן רבות, עובדה המשקפת את הקושי במדידת אור. ישנם כמה מינוחים כלליים שעוזרים במיון היחידות: יחידות "ספקטריות" הן יחידות המודדות את הגודל ליחידת אורך גל; יחידות "פוטוניות" נמדדות במספר פוטונים (כל פוטון נושא כ- 4×10^{-19} ג'ול). היחידות גם מתחלקות ליחידות המודדות פליטה ממשטח, וליחידות המודדות קרינה הפוגעת במשטח. המידות הללו זהות ביחידותיהן, שהן לרוב ואט או ואט לשטח מסוים, אך מייצגות גדלים שונים לחלוטין. היחידות המקובלות במדידות שטף אור במחקרים מדעיים משמשות בהקשר של יצרנות ראשונית, גידולי חקלאות ואור בים, ונמדדות לרוב במיקרומול קוונטה (פוטונים) למ"ר לשנייה.

לכל יחידת מידה רדיומטרית קיימת יחידת מידה פוטומטרית מקבילה, שמודדת את אותו הגודל כאשר העוצמה משוקללת לפי העקומה הפוטופית, שמכמתת את תגובת עין האדם. למעשה, מדידה פוטומטרית מתייחסת רק לאור נראה, ואינה מתייחסת כלל לשאר רכיבי האור. מנקודת מבט רדיומטרית, מדידה פוטומטרית היא מדידה רדיומטרית מנוונת, שכן אין בה מידע על תלות העוצמה באורך הגל.

מדידה של זיהום אור יכולה להיעשות על ידי קביעה של רמות הארה (אילומינציה) במקום נתון. הארה היא כמות האור לכל יחידת שטח, והיא יחידת המדידה

השכיחה ביותר. מומלץ לבצע מדידות הארה על ידי חישוב הפוטונים בכל מ"ר למשך שנייה, בשילוב עם מדידות אורכי הגל של התאורה¹⁰

אף על פי כן, שכיחות מדידות בלוקס – יחידת מדידה המבטאת את בהירות האור כפי שהיא נצפית בעינו של אדם. מבחינת הרכב האור, יחידת הלוקס מודדת בעיקר את אורכי הגל שעין האדם מבחינה בהם, ורגישה פחות לאורכי גל שעין אדם אינה מבחינה בהם. דהיינו, מידה זו היא מדידה חלקית של האור הנראה, ולמעשה רלוונטית רק לאדם, מאחר שאורגניזמים אחרים קולטים אור באופנים שונים – חלק מהם רגישים לאורכי גל שאינם נראים לעינו של אדם. כדי לעבור מיחידות לוקס הרלוונטיות לאדם, ליחידות המתאימות לבעל חיים ספציפי, יש צורך במחקרים אקולוגיים ופיזיולוגיים לזיהוי תגובות האורגניזמים השונים ביחס לתנאי ההארה, לדוגמה: חישוב עקומת התגובה לאור ביחס לרמות הארה שיימדדו בלוקס ולאורכי הגל שייבחרו בהתאמה לרגישות הספקטרית של המינים הנבדקים¹⁰.

יחידת המידה לוקס עוברת כיול כך שתוכל לבטא את עוצמת אורכי הגל במספר בודד. כפי שצוין לעיל, העוצמה המתוארת באמצעות לוקס מתמקדת בהארה הנצפית על ידי עין האדם – אורך הגל המרבי שנמדד באמצעות לוקס הוא 555 ננומטר. עם זאת, אורך הגל האפקטיבי בהשפעתו על השעון הביולוגי הוא 480 ננומטר, ועין אדם רגישה גם לתדרים נמוכים יותר. משמעות הדבר היא שמידת לוקס תקנית אינה יכולה לתת אנדיקציה טובה לגבי טווח ההארה המשפיע על השעון הביולוגי של האדם, מכיוון שהיא לא נותנת אינדיקציה לגבי כל אורכי הגל¹².

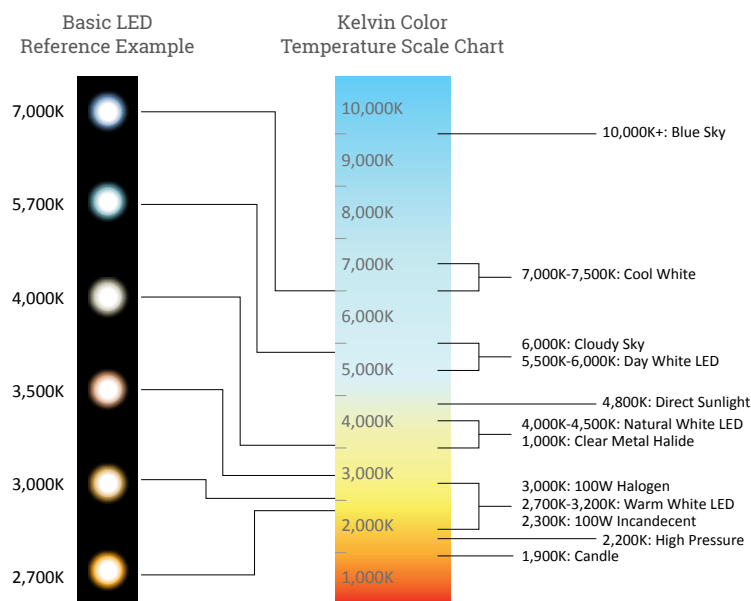
יחידת המידה מעלות קלווין המתארת טמפרטורת צבע היא מהיחידות הבין-לאומיות הבסיסיות, ומאפשרת

Stevens & Zhu. (2015). Electric light , particularly at night , disrupts human circadian rhythmicity : is that a problem ? Philos. Trans. R. Soc. B. 370, 20140120

יתר (איור 5). סולם קלווין מבוסס על סולם צלזיוס, כך שמעלת קלווין שווה למעלת צלזיוס אחת. מדידת הטמפרטורה מתחילה באפס המוחלט (273.15- מעלות צלזיוס) ולא מנקודת הקיפאון של מים¹³.

תיאור של גוון צבע הארה. נקודת האפס של טמפרטורת הצבע קלווין שווה מינוס 273.15 מעלות צלזיוס, ומתארת למעשה את צבעו של גוף שחור לחלוטין (שאינו פולט כלל אור). חימום גוף שכזה לכ-3,000 מעלות יגרום לו לפלוט אור אדום, וב-6,000 מעלות כבר נראה אור לבן

איור 5: דוגמאות לגוון תאורת לד ביחס לסקלת טמפרטורת צבע המתוארת במעלות קלווין¹⁴



מומחים יישומיים בתחום וכן לנוכח תפרוסת השימוש הנרחבת ביחידת מדידה זו בעבר ובהווה¹⁰.

אקולוגים מבצעים מדידות של רמות הארה, וכן עשויים לבחון תופעות מדידות נוספות בתחום, כגון: שינוי פתאומי בהארה, אחוזי שינוי בהארה, התייחסות לרמות הארה והפצת אור – לומינציה – ממקורות אור שאורגניזמים שונים מסוגלים להבחין בהם¹⁰.

מתכנני תאורה לא מתעניינים בהרכב האור הספקטרי אלא בכמות האור בתחום הנראה. לעומתם, אקולוגים מודאגים מחלק מאורכי הגל שמשפיעים על תופעות אקולוגיות ועל בעלי חיים¹⁰. לדוגמה, נורות נל"ג מושכות עשים בגלל הרכב אורכי הגל שלהן המכיל על-סגול, בעוד שנורות נל"ג בעוצמת לוקס זהה ללא על-סגול בהרכבן הספקטרי – אינן מושכות עשים¹⁵. אף על פי כן, נעשה שימוש בלוקס עקב הצורך בשפה משותפת עם

¹³ Fischer et al. (2007). Report to the CIPM on the implications of changing the definition of the base unit kelvin.

¹⁴ Meea. (2016). Choosing the right lightbulb, 'Lights for learning' program – saving energy through education and fundraising. Midwest energy efficiency Alliance. <http://www.lights4learning.org/latest-news/choosing-right-lightbulb>

¹⁵ Rydell. (1992). Exploitation of insects around streetlamps by bats in Sweden. *Funct. Ecol.* 6, 744-750.

{3}

היקף זיהום האור ואבדן שמי הלילה

.....

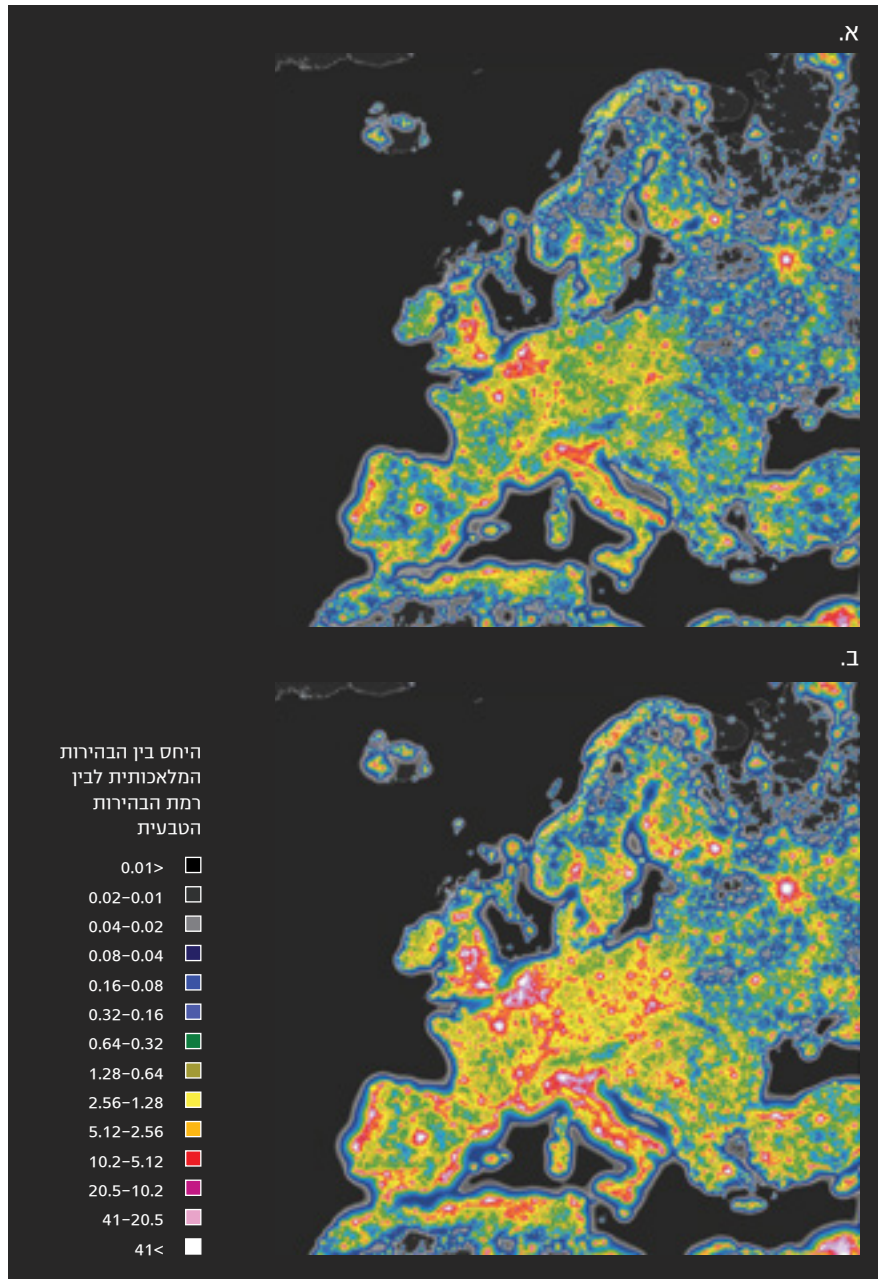
מאוכלוסיית ארה"ב וכמחצית מאוכלוסיית האיחוד האירופי, איבדה את היכולת לחזות בשביל החלב, הגלקסיה שאנו חיים בה. כ-10% מאוכלוסיית העולם, ובהם 40% מאוכלוסיית ארה"ב ו-16% מאוכלוסיית האיחוד האירופי אינם יכולים אפילו להתבונן בשמיים כשהעין מורגלת לראיית לילה, מאחר ששמי הלילה בהירים מעל לסף המאפשר לעינינו ראיית לילה¹¹. בפריסה עולמית, יש מעל 100 מיליון עמודי תאורת רחוב, וכבר בסוף המאה הקודמת הייתה זהירות הרקיע בעלת עוצמה רבה יותר מרמות ההארה הטבעיות המצופות ב-5% משטח כדור הארץ, שמתוכם 23% מהשטח היבשתי של ארה"ב ו-37% מזה של האיחוד האירופי¹¹.

בפריסה עולמית, ניתן לומר כי תאורת לילה מלאכותית מופקת על ידי יחסי גומלין בין שלל מערכות התאורה לבין הטופוגרפיה, הצמחייה ותפוצת האזורים הבנויים, שקובעים יחד את מידת ההחזרה, המיסוך והבליעה של האור. יחסי הגומלין גורמים לפיזור מרחבי גדול והטרוגני של הארה מבחינת עוצמה, הרכב ספקטרי וריצוד⁵.

אור לא רצוי חודר ליותר ויותר מקומות עקב ההיקף הנרחב של התשתיות העירוניות על פני כדור הארץ, אפקט זהירות הרקיע ופיזור התאורה. הערכה שבוצעה במטרה לאמוד את השפעות זהירות הרקיע הצביעה על חשיפה של 18.7% משטחי הקרקע העולמיים לזיהום אור. בחינת כמות האור על ידי שימוש בתמונות לוויין הראתה כי 11.4% משטחי הקרקע ו-0.2% מן השטחים הימיים על פני כדור הארץ מוארים, וכן כי כמות הזיהום נמצאת בתהליך האצה ממוצע של כ-6% לשנה, עם שונות נרחבת על פני אזורים גאוגרפיים – מ-0% ועד 20%⁴.

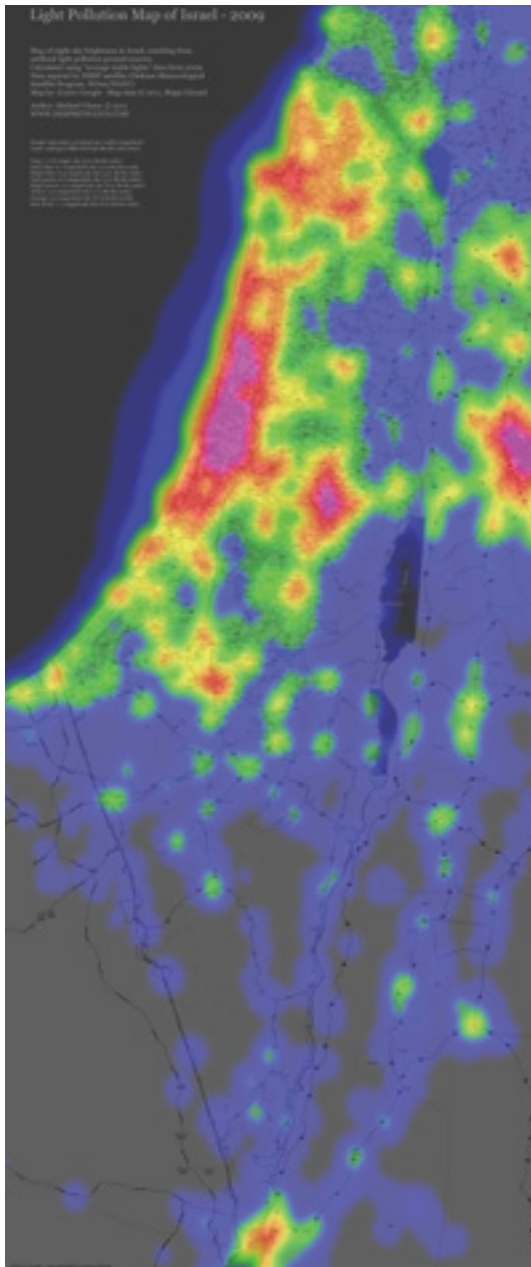
זיהום שמי הלילה אינו מוגבל למדינות מפותחות בלבד, ומדובר בתופעה בקנה מידה עולמי המשפיעה כמעט על כל מדינה בעולם. הזיהום חריף במיוחד בארה"ב, באירופה וביפן (איור 6). נכון לשנים 1996-1997, מעל 99% מאוכלוסיית ארה"ב והאיחוד האירופי וכשני שלישים מאוכלוסיית העולם התגוררו בשטחים ששמי הלילה בהם מוארים מעל סף המוגדר כזיהום. על פי הערכת תפקודי העין האנושית, כחמישית מהאוכלוסייה העולמית, הכוללת מעל שני שלישים

איור 6: מפת בהירות הרקיע באירופה ביחס לבהירות השמים הטבעית¹⁶.
 א. בהירות הרקיע ב־2014. ב. חיזוי בהירות הרקיע לאחר מעבר לאורות לד של 4000 קלווין ללא שינוי שטף האור.



Falchi et al. (2016). The new world atlas of artificial night sky brightness. Science advances. 2(6) e1600377 .16

זיהום האור בישראל

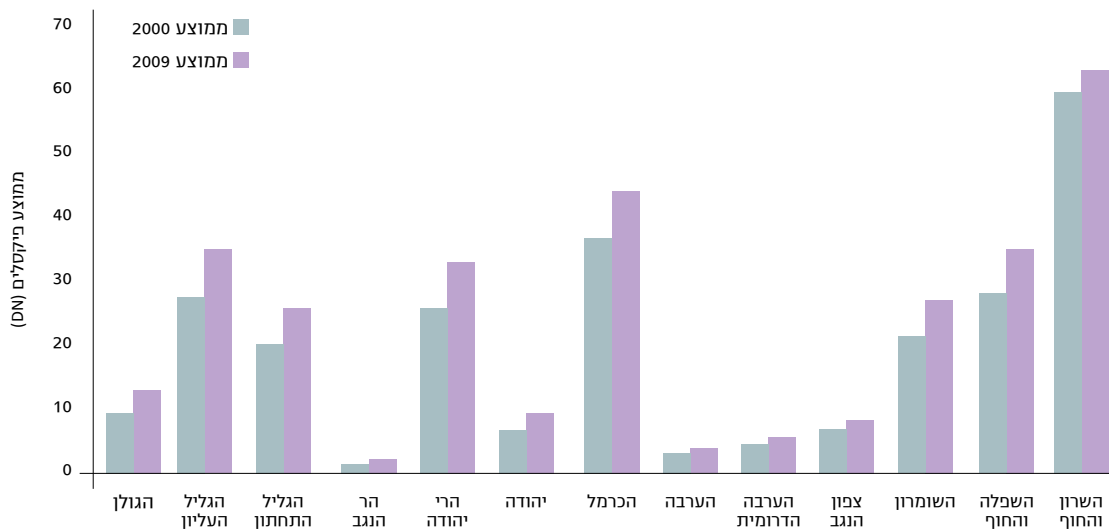


במרכז ישראל קשה לזהות אזורים שאינם סובלים מזיהום אור (איור 7). עם זאת, ניתן לראות כי גם האזורים הבלתי מופרעים בדרום אינם רציפים, וסובלים מקיטוע על ידי מקורות זיהום נרחבים.

איור 7: מפת זיהום האור בישראל, עדכנית לשנת 2009 ומתוארת על ידי סקלה של צבעים; אדום - שמיים מוארים, ירוק - רמה בינונית, אפור - שמיים חשוכים¹⁷. הנתונים לקוחים מחיישני DMSP.

Vlasov. (2011). Deep-Sky Watch. <http://www.deepskywatch.com/light-pollution-israel.html>. (Accessed: 19th December 2015) .17

איור 8: השוואה בין ממוצע ערכי התאורה בשטחי שמורות מאושרות ומוכרזות בשנת 2000 (עמודות אפורות) ובשנת 2009 (עמודות סגולות)¹⁸. ממוצע פיקסלים (DN) משמעו עוצמת האור כפי שחושבה על פי ערך הפיקסל מתמונות חישה מרחוק מחיישני DSMP מסדרות שונות (f14, f16) ללא כיוול. מנתונים מקבילים בספרות ניתן להניח שההפרש בין השנים גדול מעט יותר מהמוצג.

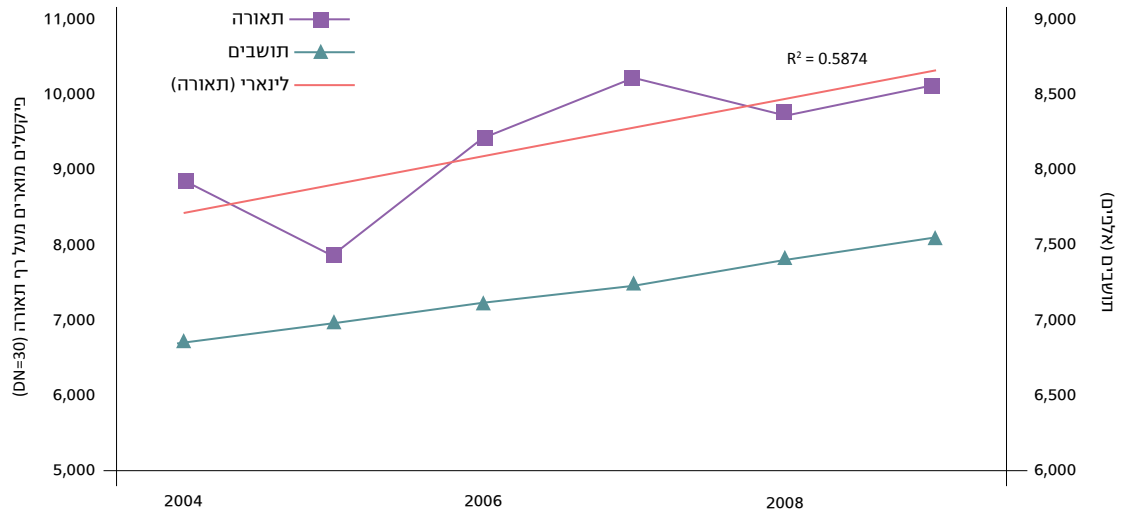


בעוצמות התאורה לביין התרבות האוכלוסייה. על פי נתוני הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, בין השנים 2004 ל-2009 חלה עלייה בעוצמות האור בד בבד עם העלייה במספר התושבים (איור 9).

עוצמות התאורה בשטחים הפתוחים בישראל בכלל ובשמורות הטבע בפרט, עולות עם הזמן (איור 8). בדרום הארץ קיימת השפעה מכרעת של אתרים מוארים בסביבה מבודדת על זיהום האור, כדוגמת מפעלי הפוספטים¹⁸. כמו כן, נצפה קשר בין העלייה

18. וייל ולידר. (2010). ניתוח מרחבי של זיהום אור באמצעות חישה מרחוק. רשות הטבע והגנים

איור 9: השוואת נתוני דמוגרפיה ואור בישראל בין השנים 2004 ל-2009. מקור הנתונים מחיישני DSMP מסדרת נתונים זהה (f16). ככל הנראה, הירידה בתאורה ב-2005 וב-2008 נובעת מ'רעשים' ממגבלות החיישן ומתהליך העיבוד במקור. המגמה ברורה וחוזרת גם בניתוח סדרות נוספות. נתוני האוכלוסייה מתבססים על נתוני הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, 2012.¹⁸



זיהום אור ימי וחופי

בעולם, להוציא אנטארקטיקה, לזיהום תאורת לילה מלאכותית. ניתן לשער כי מדינות העולם המפותחות סובלות באופן חמור יותר מזיהום אור בסביבה החופית, אך למעשה אסיה ואפריקה מזדווגות במקום השני והשלישי באחוזי קווי החוף המושפעים מזיהום אור. במקום הראשון מזדווגת אירופה (טבלה 2)¹⁹.

מקורות האור המלאכותי בסביבה הימית מגוונים, ומשפיעים במרחקים שונים מהחוף, חלק מהם זמניים ומקומיים, כמו תאורת אניות משא ואסדות קידוח, וחלק קבועים ולאורך תפוצה גאוגרפית נרחבת, כמו ערים ונגלים, שפכי נהרות, מפרצים ומדפי יבשת (איור 10)¹⁹.

בעוד השפעות זיהום אור במערכות היבשתיות צוברות תיעוד, בתי גידול ימיים זכו להתייחסות פחותה בהרבה. מעל מיליארד בני אדם, כ-23% מאוכלוסיית העולם, מתגוררים בטווח של כ-100 ק"מ מקו החוף, והמערכת הימית היא מקור מזון חשוב לאוכלוסיות רבות. מערכות אקולוגיות ימיות רבות ברחבי העולם חשופות להארה מלאכותית בלילה, שמשנה את הצבעים, המחזוריים ועוצמות תאורת הלילה בסביבה הימית¹⁹.

תצלומי לוויין של התאורה הלילית של כדור הארץ הם עדות לתפוצתו רחבת ההיקף של המין האנושי והשפעותיו על מערכות כדור הארץ בכלל ועל מערכות ימיות בפרט. בשנת 2010 נחשפו כ-22.2% מרצועות החוף

Davies et al. (2014). The nature, extent, and ecological implications of marine light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment* .19 12, 347-355

לעתים הים הוא גם נתיב נדידת עופות (למשל, מזרח הים התיכון הוא ציר מרכזי לנדידת עופות, בעיקר ציפורי שיר, בין אירופה לאפריקה וחזרה), ולכן תאורה מלאכותית של מתקנים, כמו אסדות קידוח, עלולה להפריע לנדידה.

השפעות התאורה ממקורות יבשתיים על הסביבה הימית מעבר לקו החוף מוגברות כתוצאה מפיזור ההארה כלפי מעלה או השתקפויות של האור המלאכותי באטמוספירה ועל ידי העננים, בתופעת זהירות הרקיע.

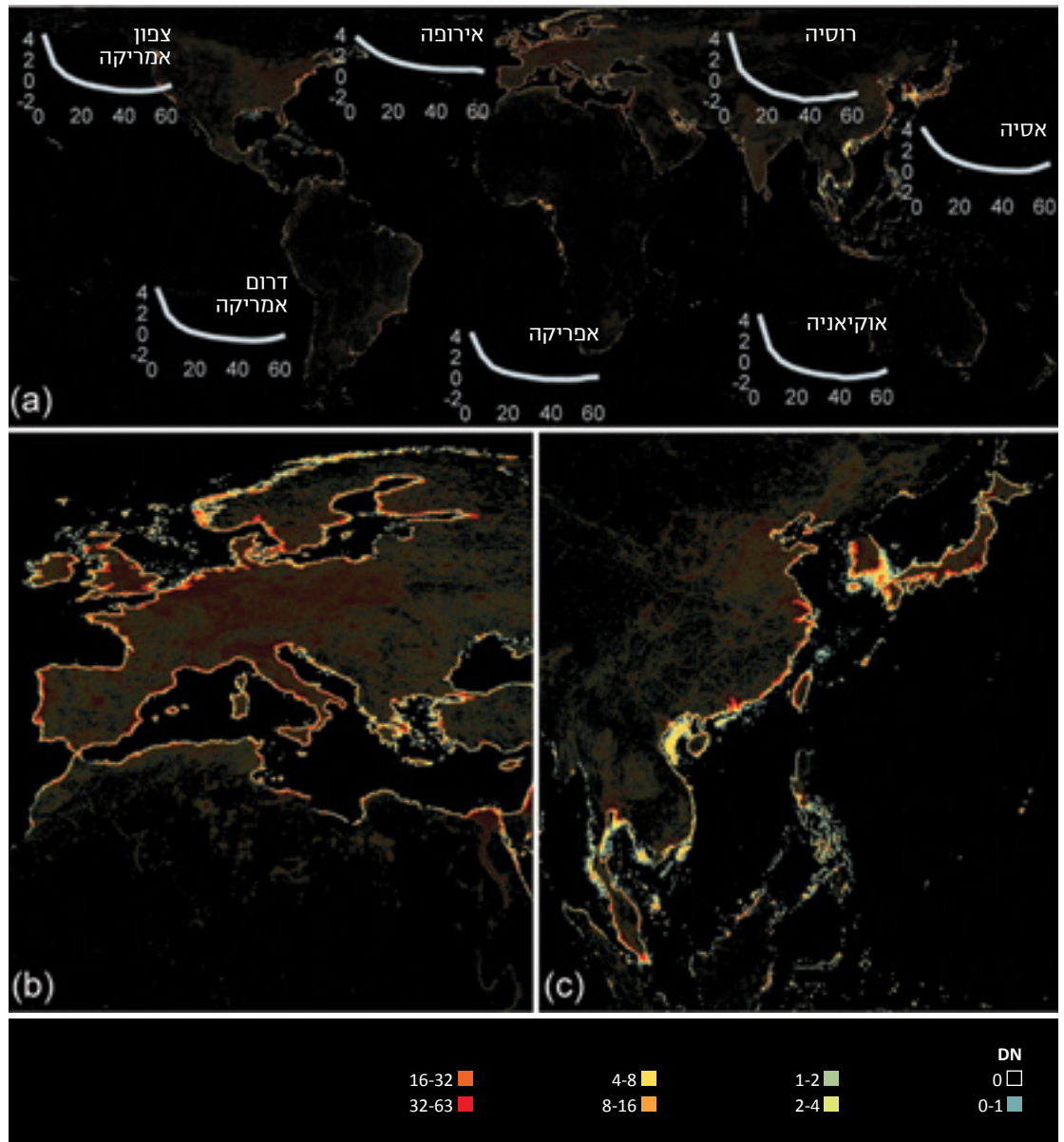
טבלה 2. היקף זיהום אור חופי באזורים שונים בעולם¹⁹. הטבלה מבוססת על חישובים מהתמונה באיור 10. אזורי חוף מזוהמים הוגדרו ככאלה שעוצמת הפיקסלים בהם הייתה מעל 5 בסולם לא מכויל בטווח 0-63. חישוב אורך החוף הכללי אינו כולל את אנטארקטיקה.

אחוז החוף המושפע	מספר הקילומטרים בחוף המושפעים מאור	אזור
54.3	115,383	אירופה
34.2	113,166	אסיה (למעט רוסיה)
22.1	18,589	אפריקה
15.5	24,197	דרום אמריקה
11.8	64,356	צפון אמריקה
7.9	11,692	אוקיאניה
6.1	7,377	רוסיה
22.2	354,760	סך הכול

הסביבה הימית, כמו היבשתית, סובלת מהארה מתבהרת, שנעשית לבנה יותר, ושונה מאור הירח. ההשפעות הללו רלוונטיות במיוחד לתהליכים ביולוגיים תלויי עומק, ששינויי ספקטרום האור לאורך עמודת המים עשויים להנחותם¹⁹, וכן לתזמון רבייה של אלמוגים, המסתמכים על השינויים המחזוריים בתאורת הירח לצורך סנכרון הרבייה.

לאורכי גל שונים של אור יכולת חדירות שונה בתווך הימי. אור בצבע כחול יחדור לעומק רב יותר – עד כ־200 מטר במים צלולים, דבר שיעצים את ההשפעה הפוטנציאלית שלו, בעוד אור אדום ייבלע על ידי המים, ייחלש במהירות וייעלם במים הרדודים¹⁹.

איור 10: היקף זיהום אור ימי עולמי. הגרפים בפאנל העליון מייצגים את לוג אורך החוף המושפע כפונקציה של עוצמת זיהום האור ביבשות שונות¹⁹. DN היא מידת עוצמת האור שנמדדת בתמונה דיגיטלית. a- פיזור עצמת האור המלאכותי ביבשות שונות. ציר X: עוצמת האור ב-DN; ציר Y: לוג אורך החוף המושפע מעוצמת התאורה. החופים הוגדרו עד 10 ק"מ פנימה ליבשה. b ו-c תקריבים של יבשות לדוגמא.





מניעים פסיכולוגיים לתאורת יתר של כבישים ורחובות

עוצמת אור כפונקציה של בטיחות המשתמש

באזורים שההארה בלילה הוגבלה בהם, ניתן היה לצפות ללחץ ציבורי משמעותי שיביא להחזרת התאורה, בלי כל קשר לשאלה אם ההארה ממלאת תפקיד במובן זה⁵.

קיום מחקר שיקבע קשר מובהק בין תאורת דרכים לשכיחות ולחומרה של תאונות בכבישים שונים הוא

דבר מורכב, וזאת עקב ארבע סיבות עיקריות:

1. לא ניתן לבודד את משתנה התאורה בלבד – קיימים משתנים רבים נוספים הקשורים להיתכנות תאונה: סוג הכביש, זרימת הולכי רגל, הימצאות צמתים או היעדרם, מהירות התנועה, סוג התנועה, צפיפות כלי הרכב וכן הלאה. כל אלה הם גורמים שעשויים לתרום לעלייה בסיכון לתאונות דרכים במהלך הלילה. מהירות הנהיגה הממוצעת במהלך הלילה נוטה להיות גבוהה יותר לנוכח מיעוט התנועה. כמו כן, ישנם משתמשי כביש המושפעים מעייפות או מגורמים כמו אלכוהול או סמים. למרות הקשיים, מחקר משנת 1996 הראה כי, ככל הנראה, ישנה השפעה של תאורת דרכים על הפחתה בתאונות דרכים, ובאופן ספציפי על תאונות שמעורבים בהן הולכי רגל לעומת תאונות בין כלי רכב⁵.

2. הוספת גורמים נוספים – כאשר מעמעמים או מכבים אורות בחלק מהלילה, הדבר מלווה במקרים רבים באסטרטגיות למזעור תאונות, כגון שיפור שילוט וסימוני כביש. שינויים בתשתיות ייכנסו לשקלול גורמי ההשפעה על תאונות דרכים⁵.

3. אינטראקציות בין גורמים משתנים – יש להניח כי ישנה אינטראקציה חזקה בין השפעת תאורת דרכים על תאונות והאצת הפיתוח של טכנולוגיות כלי רכב בכלל, ושל פנסי כלי הרכב בפרט. בהירות הפנסים של כלי הרכב הלכה וגברה במידה רבה

חלק מהסיבות לתאורת לילה ולזיהום האור הנובע ממנה, מקורן בתחושה שלאור יש קשר הדוק לבטיחות בדרכים ולבטיחות האישי. קיימת תפיסה בציבור (ובקרב מתכנני תאורת דרכים ולקוחותיהם) כי לתאורת כבישים תפקיד ישיר בבטיחות הנסיעה בלילה. מסיבה זו נעשה שימוש רחב היקף בתאורת דרכים. לדוגמה, עד לשנת 2007 הותקנה תאורה בכבישי בריטניה מתוך ההנחה כי היא מפחיתה תאונות בשעות הלילה בכ-30% בממוצע. הנחה זו שונתה ל-10% באוטוסטרדות ובכבישים דו-סטריים ול-12.5% בממוצע בדרכים חד-סטריים. נוכח הנחה מעודכנת זו פעלו רשויות מקומיות בבריטניה להפחתה ניסיונית של תאורת הדרכים במטרה להביא לחיסכון באנרגיה מבלי לסכן את בטיחות הציבור⁵.

במחקר עדכני המשווה בין תאונות דרכים במהלך היום לעומת הלילה, נמצא כי השיפור בבטיחות בדרכים ביום לעומת הלילה לא עלה על 13%²⁰. המידע האמפירי המסביר את הקשר בין שיפור היבטי בטיחות בדרכים לבין תאורת דרכים בלילה – נותר מוגבל. מחקר שנערך ב-2010 הסיק כי תאורת דרכים אכן עשויה למנוע תאונות דרכים, אך המידע התבסס על מחקרים אמפיריים מועטים בלבד שנערכו בפריסה גאוגרפית מוגבלת, מה שמפחית ממדינות ממצאי המחקר. נראה כי מחקרים אמפיריים מסוג זה כמעט בלתי אפשריים מסיבות אתיות ומוסריות. הפחתה של תאורת דרכים בלילה אינה יכולה להיעשות בדרכים שקיים בהן סיכון גבוה לתאונות⁵.

רשויות מקומיות במחוזות מסוימים בבריטניה הפחיתו את ההארה בלילה על ידי עמעום תאורה או כיבוי תאורה במהלך חלק משעות הלילה, שינוי שלא הביא לעלייה בתאונות דרכים. עם זאת, כשתאונות אירעו

Bullough et al. (2013). To illuminate or not to illuminate: roadway lighting as it affects traffic safety at intersections. *Accid. Anal. Prev.* 2013, 53, 65-77

לעלייה בפעילות הכלכלית של האדם בשעות אלה, ואף לסברה כי המרחב העירוני בלילה נעשה בטוח יותר עבור מרבית האוכלוסייה, כפי שנכתב: "Gaslight is found to be the best nocturnal police", גם בימינו, ההנחה השכיחה היא ששיפור מתקני תאורת הרחוב, בד בבד עם טיפולים נוספים, יסייע להפחית את הפשיעה בעזרת הגברת הפיקוח והנראות ויצירת הרתעה.⁵

על אף התחושות שתוארו, לא קיימות הוכחות מובהקות להפחתת רמות פשיעה בזכות שימוש בתאורה. ישנם מחקרים המצביעים על ירידה בפשיעה שנרשמה באזורים שתאורה הוכנסה אליהם או שופרה בהם, אך לעומתם, מחקרים אחרים אינם מראים מתאם, וייתכן שחששות הציבור מפשיעה הן שפוחתות עם הכנסת תאורה, ולא הפשיעה עצמה.^{21,5}

מבחינת מדיניות, תפיסת תחושת הביטחון עשויה להיות חשובה במידה דומה לאלמנטים שנמצאו להם השפעות ממשיות על הפשיעה, כגון אכיפה, נוכחות שוטרים, מצלמות וכן הלאה. עם זאת, בדוגמאות מסוימות שנבחנו, נראה כי הכנסת תאורה באזורים שקודם לכן היו חשוכים, דווקא הגבירה אירועי פשיעה. ייתכן גם כי הכנסת תאורה עשויה להביא לתוצאות לא מכוונות של הגברת פשיעה באזורים אחרים – 'העתקת הפשיעה' מאתר אחד לאחר, ולא דווקא הפחתה.⁵

מחקרים שעסקו בהערכת הפחתת הפשיעה נוכח תאורה משופרת הראו כי התאורה נמצאה אפקטיבית יותר בבריטניה לעומת ארה"ב בצמצום פשיעה, אך ייתכן שההבדלים נובעים משוני בשיטות המחקר. נוסף על כך, נמצא כי מדדי הפשיעה בלילה מואר לא צנחו מתחת למדדי הפשיעה במהלך היום. אין מספיק מחקרים בתחום זה, והמחקרים המעטים שנערכו נוטים להתמקד בסקלה קטנה של רחובות, שהוארו במסגרת מיזמי הארה, ונמשכו זמן קצר יחסית. כל אלה יצרו קושי להצביע על תוצאות מובהקות סטטיסטית. זאת

ב־60 השנים האחרונות, במקביל לשינויים בתאורת הדרכים, שהתגברה דרמטית בשנים אלה. הגברת בהירות ההארה עשויה ליצור בעיות, בייחוד עבור נהגים מבוגרים. קיימות הוכחות כי תאורה בהירה מפנסים של כלי רכב חולפים גורמת סנוור.⁵

4. שינוי התנהגות הנהג לפני הניסוי ואחריו – קיימות הוכחות לכך שנהגים משנים את התנהגותם בנוכחות תאורת דרכים, כך שהם מגבירים את סיכוני הנהיגה על ידי האצת מהירות הנהיגה או הפחתה במידת תשומת הלב.⁵ התנהגות שכזו תשפיע על עריכת ניסויים, ולא תאפשר בידוד של המשתנים הנבדקים בניסוי.

התקנת תאורת דרכים ושיפור תאורה קיימת הוצעו כפתרון זול יחסית למניעת תאונות, על בסיס ההנחה כי הדבר יפחית תאונות במהלך הלילה בכ־30%. הנחה זו עשויה להביא להאצה דרמטית בתאורת הדרכים המלאכותית. עם זאת, נראה כי יש צורך במחקרים אמפיריים דחופים לקביעת אפקטיביות תאורת דרכים כפתרון להפחתת תאונות, בייחוד במדינות שרמות ההכנסה בהן בינוניות ונמוכות. נוסף על כך, ניתן לומר כי תאורת הדרכים אינה המשתנה הבלעדי הנקשר למזעור הסיכון לתאונות, אלא גם מידת פיתוח התשתיות שהושקעה – מה שעשוי להיות אפילו משמעותי יותר בהתייחס למדדי הפחתת תאונות.⁵

יש לציין כי בישראל אין תקנה מחייבת להארת דרכים, אלא רק מסמך הנחיות: "הנחיות לתכנון מאור בדרכים" (משרד התחבורה, 1996) שהגדיר מספר מקרים המחייבים תאורה. מדובר במסמך ישן, שאין לו תוקף מחייב.

מבחינת תפיסת הביטחון האישי ורמת הפשיעה, התנהגות עבריינית נקשרה באופן מסורתי לעלטה. ראות לקויה מגבירה תחושת סכנה עבור בני אדם, מה שמביא להימנעות מהימצאות באזורים חשוכים. הכנסת תאורת לילה מלאכותית בסוף המאה ה־19 הביאה

Steinbach et al. (2015). The effect of reduced street lighting on road casualties and crime in England and Wales: controlled interrupted time series analysis. *J. Epidemiol. Community Heal*

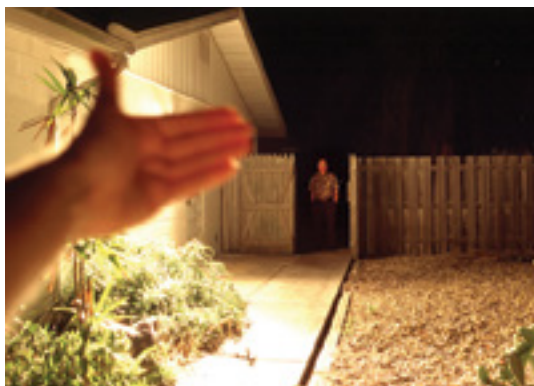
הצללה קבועה, שתספק הזדמנות לפעילויות פשיעה (איור 11), ולהפך – מקומות מוארים יכולים לשמש מוקדים פוטנציאליים המספקים ראות טובה לביצוע פשיעה. הארה עקבית יכולה להביא לכך שחשודים פוטנציאליים ימשכו פחות תשומת לב בהשוואה למקור תאורה נע, כדוגמת פנס בחשכה. הגברת הארה עשויה במקרים מסוימים להקל על ביצוע פשע ובריחה של מבצע העברה. כמו כן, ניגוד משמעותי בין אזורים מוארים לאזורים חשוכים עשוי להקטין את יכולות ראיית הלילה להבחנה בעברייני פוטנציאליים⁵.

ועוד, שיקולים אתיים ומוסריים מקשים על ביצוע מחקר אמפירי לבחינת קשר בין פשיעה לתאורה לילית.

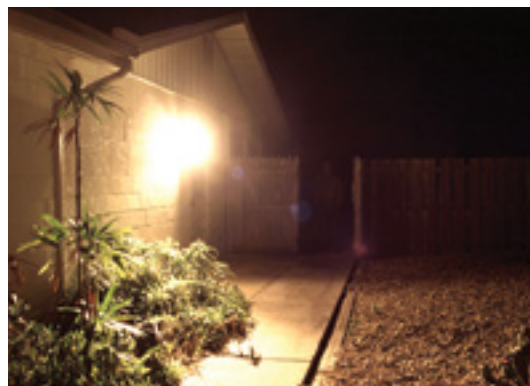
עד כה ניתן לומר כי מרבית המחקרים העוסקים בתחום מעידים כי שיפור תנאי הארה ברחובות הוא גורם מניע להפחתה במדדי הפשיעה. עם זאת, יש צורך בפיתוח פרוטוקולים אפקטיביים ועקביים להערכת הקשר בין המשתנים⁵.

מורכבויות נוספות עשויות להיקשר להארה ולפשיעה: מתקני תאורה שאינם מתוכננים כראוי עשויים ליצור

איור 11: אור מנורה ללא סוכך הוא אור מסנוור, ועלול לסייע להסתרת תוקף פוטנציאלי²². לאחר סנוור שכזה יעברו כ-20 דקות עד שהעין האנושית תחזור לתפקד ביעילות באור חלש.



הסנוור מהתאורה מחביא תוקף פוטנציאלי



הסנוור מהנורה ללא הסוכך גורם לצללים עמוקים

יכולת חזותית לקביעת סיכונים פוטנציאליים. מחקרים נוספים חשפו כי אנשים מעדיפים תאורה בסביבתם המידית לעומת כזו המכוונת לכביש המצוי לפניהם⁵.

יש לבחון נושא זה לעומק מבחינת הרגשת הציבור בישראל, האם לתפיסתו של הציבור הישראלי תאורה אכן תורמת לביטחון האישי? בכל מקרה, יש להוריד את רמת הסנוור של התאורה ברחוב.

מאחר שרשויות תרות אחר שינוי משטרי ההארה והפחתת רמות הארה, מתוך כוונה להביא להתייעלות בצריכת האנרגיה – ייתכן כי זוהי ההזדמנות להעריך באופן שיטתי ואמין את תפקיד תאורת הרחוב ביחס לרמות הפשיעה, ובייחוד לבחון את ההשלכות של פיתוחים טכנולוגיים בתחום ההארה, לדוגמה: מקורות הארה לבנה מסוימים הראו שיפור ביכולת לזיהוי פנים, וסייעו לתפיסת הביטחון של הולכי רגל בכך שיצרו

²².IDA Practical Guide. Topic: Residential lighting (good neighbor guide). International Dark-Sky Association. <http://www.ida.darksky.org/assets/documents/PG3-residential-lighting.pdf>



{4}

המנגנון הפיזיולוגי המושפע מזיהום אור

.....

ומעבירים מידע זה לשעון הפנימי²⁵. האור מכייל קבוצת נוירונים המהווים יחד את המתנד הצירקדי, שמפקח על תפקודים רתמיים רבים, בהם גם הפרשת ההורמון מלטונין מבלוטת האצטרובל שבמוח, אחת הזרועות העיקריות של השעון. המלטונין שכיח בכל ממלכת החי, ואף אצל צמחים²⁶, ומנצח על שינויים בתפקודים פיזיולוגיים שונים בתגובה להשתנות אורך היום. ההורמון, המופרש בלילה, הוא חוליה קריטית האחראית להעברת השפעות האור למסלול הנוירו-אנדוקריני (עצבי-הורמונלי) וכן ישירות למערכות גוף מסוימות²⁷.

הארכת משך החשיפה לאור משנה את משך הפרשת המלטונין. חשיפה להארה בלילה מפסיקה את הפרשת המלטונין, ועלולה להביא לשלל השפעות פיזיולוגיות דרך מנגנונים רבים. משערים כי חלק מההשפעות מתווכות על ידי רמות המלטונין המשתנות²⁸.

כאשר השעון אינו מקבל קלט מרשתית העין, בתנאי אור או חושך קבועים, הפעילות המחזורית הימית נסמכת על מחזוריות פנימית המתרחשת בתאי השעון בקצב הקרוב ל-24 שעות. בהינתן אור חיצוני מהסביבה מסתנכרן השעון הביולוגי עם סביבתו הטבעית תוך זמן קצר, והתנהגות בעל החיים תתאים עצמה מחדש לנסיבות הטבעיות²⁹.

במהלך שלושה מיליארד השנים האחרונות התפתח שעון ביולוגי פנימי המתבסס על אור השמש כמסנכרן עיקרי. השעון הופיע כבר אצל יצורים קדמונים, ולמעשה, התנהגותם של מרבית האורגניזמים החיים על פני כדור הארץ מתוזמנת באמצעות שעון ביולוגי פנימי, במחזוריות ימית של כ-24 שעות (מחזוריות צירקדית). האות העיקרי המסנכרן את השעון הפנימי הוא מחזוריות היום והלילה, הנובעת מסיבוב כדור הארץ סביב צירו²³.

נוסף על המחזוריות היומית, קיימת גם מחזוריות שנתית באורך היום, הנובעת מסיבובו של כדור הארץ סביב השמש. מחזוריות שנתית זו באורך היום יוצרת את עונות השנה השונות, המאופיינות בתנאים סביבתיים שונים, לעתים בצורה קיצונית. משך שעות האור הוא אות לסנכרון השעון הביולוגי הפנימי בסקלה עונתית (שליטה בתהליכים כמו רבייה, נדידה, שנת חורף ועוד). מכאן, שלמחזוריות הטבעית של אור וחושך תפקיד מכריע בוויסות מקצבים ביולוגיים יומיים ושנתיים²⁴.

השעון קוצב הפעילות בגופנו אחראי על ניהול התזמונים בגוף כולו, וחולש על מערכות גוף רבות. קולטני אור המצויים ברשתית העין (intrinsically photoreceptive Retinal Ganglion Cells – ipRGC), מכילים את החלבון מלנופסין, מבחינים באור

23. Refinetti. (2010). The circadian rhythm of body temperature. *Front. Biosci.* 15, 564

24. Refinetti & Menaker. (1992). The circadian rhythm of body temperature. *Physiol. Behav.* 51, 613-37

25. Brainard et al. (2001). Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. *J. Neurosci.* 21, 6405-12

26. Arnao & Hernández-Ruiz. (2015). Functions of melatonin in plants: a review. *J. Pineal Res.* 59, 133-150

27. Hattar et al. (2002). Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity. *Science* 295, 1065-70

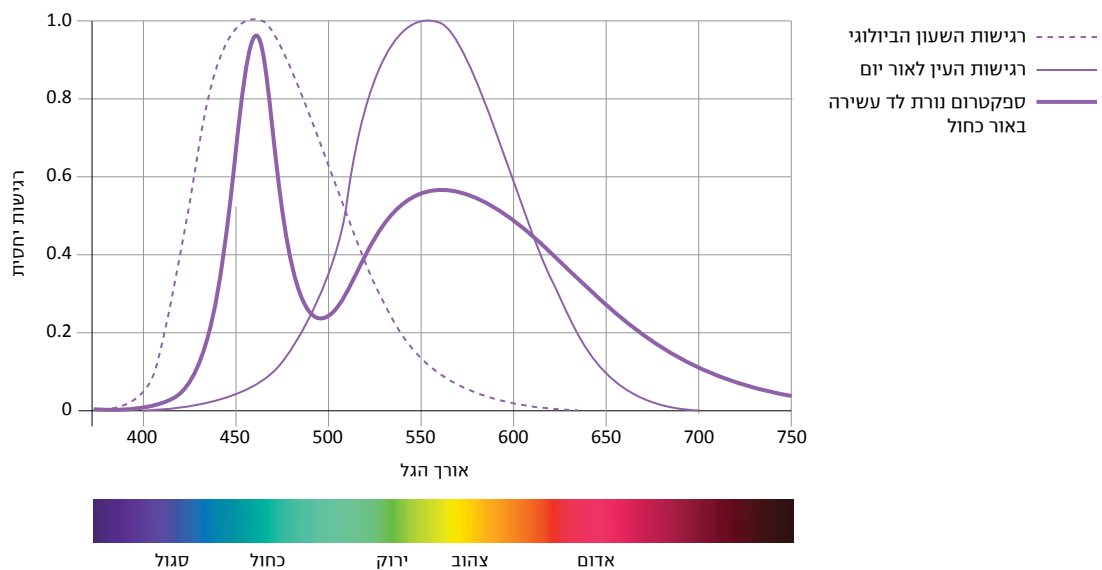
28. Cohen et al. (2010). Masking and temporal niche switches in spiny mice. *J. Biol. Rhythms* 25, 47-52

29. Papamichael et al. (2012). Human nonvisual responses to simultaneous presentation of blue and red monochromatic light. *J. Biol. Rhythms* 27, 70-78

גל של 555 ננומטר (ירוק) (איור 12), הוכח כי תאורה ב-460 ננומטר (סגול) מזכאת את ייצור ההורמון מלטונין פי שניים יותר ממנו²⁹. לעומתו, גוון האור האדום נמצא כבעל ההשפעה הקטנה ביותר¹².

הקולטנים המשפיעים ביותר על השעון הביולוגי בעין היונקים רגישים במיוחד לחשיפה לאור כחול באורכי גל קצרים, בטווח של 440-480 ננומטר. אף על פי שהרגישות המרבית של מערכת הראייה היא לאורך

איור 12: רגישות היחסית של העין האנושית לאור לצורכי ראייה (קו רציף דק) ולאור לפעילות המערכת הצירקדית (קו מקווקו) על רקע התחום הספקטרי של נורת לד לבנה.⁹



מהארת הלילה³⁰. הארה בתחילת הלילה תדחה את מחזור הפעילות של הבוקר, והארה בסוף הלילה תגרום להקדמת פעילות הבוקר.

קיים זיכרון קצר טווח של החשיפה לאור, שעשוי להשפיע על רגישות המערכת הצירקדית. נתגלה כי חשיפה לאור בהיר במהלך שעות היום מביאה לרגישות נמוכה יותר לזיהום אור במהלך שעות החשכה. לעומת זאת, חשיפה לאור מעומעם במהלך היום מביאה לעלייה ברגישות יתרה לזיהום אור בשעות החשכה, דבר המתבטא בדיכוי מלטונין משמעותי יותר³¹. כמו כן, נתגלתה שונות ברמות הרגישות של פרטים מזויגים שונים לזיהום אור. בתנאי חשכה לא קיימים הבדלים מובהקים ברמות המלטונין בדם בין גברים לנשים, בתזמון הייצור או ברמות המוחלטות של המלטונין בפלזמת הדם. לאחר חשיפה לאור בהיר במהלך הלילה – דיכוי מלטונין בפלזמת הדם היה גבוה ב-40% אצל נשים לעומת גברים. מכאן, שאצל בני אדם קיימים הבדלים בין המינים ברגישות של בלוטת האצטרובל בלילה³².

במחקר שבחן את השפעת ההארה בזמן שינה מבעד לעפעפיים סגורים, בוצעו הבזקי ההארה בגוון כחול של 480 ננומטר במהלך שעה שלמה וכן טיפול דומה בגוון ירוק של 527 ננומטר. נמצא כי הארה בכחול יצרה עיכוב מובהק בפאזה הצירקדית ודיכוי מובהק של המלטונין. לעומת זאת, במתכונת פולסי הארה בהפרשים של דקה באור ירוק לא נראה עיכוב דומה³³. המשמעות היא כי אור מלאכותי, בעל רכיב משמעותי בתחום הכחול, המגיע אל תוך חדר השינה (אם מתוך הבית ואם אור הפולש מבחוץ), עלול לפגוע בייצור המלטונין.

המחזוריות הפנימית שהתפתחה כתוצאה מהאור 'אור-חושך' מאפשרת לאורגניזם להכין את עצמו פיזיולוגית לקראת הזריחה וראשיתו של היום, ולקראת השקיעה ותחילת הלילה. חשיבותה של יכולת זו טמונה בהתכוננות לשינוי ולא רק בתגובה אליו, יכולת שהיא יתרון חשוב במיוחד לשרידות. החשיפה לשמש מסנכרנת את המקצבים הללו מחדש מדי יום, כך שהמקצב הפיזיולוגי נשמר במחזוריות של כ-24 שעות על ידי המחזוריות היממית של אור השמש והחשכה. בניגוד לאור השמש, תאורה חשמלית עמומה או כזו שאינה מתוזמנת עם התאורה הטבעית, מפריעה לכל ההיבטים הנוגעים למחזוריות השעון הפנימי¹². באופן פשטני יש כאן שני מצבים בעייתיים מבחינה פיזיולוגית:

1. חוסר באור במשך היום: במקרים רבים, העוצמה והטווח הספקטרי שאנו נחשפים אליהם במהלך היום באמצעות תאורה מלאכותית אינם מאפשרים את 'איפוס' המקצב הצירקדי בהתאם לאות של תחילת המחזור או סיומו¹².
 2. אור עודף בלילה: התאורה המלאכותית המופיעה במהלך הלילה מונעת חושך אמתי. לחושך יש חשיבות. הוא דרוש לייצור הורמונים כמו מלטונין, ולבקרת הורמונים אחרים כמו פרולקטין, גלוקוקורטיקואיד, הורמון הדחק ACTH (adrenocorticotrophic hormone) וסרוטונין, הנחוצים לפעילות הפיזיולוגית התקינה של הגוף. היעדר חושך קוטע תהליכי ייצור ובקרה של הורמונים, ומשפיע גם על ביטוי גנים וגם על הורמונים נוספים.
- פאזה החשיפה להארה (במהלך שעות היממה) ומאפייני ההארה משפיעים על עקומת התגובה שתתקבל כתוצאה

Golombek & Rosenstein. (2010). Physiology of circadian entrainment. *Physiol. Rev* 90, 1063-1102 .30

Hébert et al. (2002). The effects of prior light history on the suppression of melatonin by light in humans. *J. Pineal Res.* 33, 198-203 .31

Monteleone et al. (1995). Does bright light suppress nocturnal melatonin secretion more in women than men? *J. Neural Transm.* 102, 75-80 .32

Figueiro et al. (2013). A train of blue light pulses delivered through closed eyelids suppresses melatonin and phase shifts the human circadian system. *Nat Sci Sleep* 5, 133-141 .33

מנגנונים צירקדיים אצל צמחים

שעתוק גנים, יציבות אר-אן-איי שליח וקצב תרגום של מספר גנים הקשורים לשעון. מנגד, מספר גנים אחרים על ויסות כניסת האור³⁵. המערכת הצירקדית היא למעשה רשת בעלת פעולות משוב רבות בין השעון הקוצב את הפעילות ובין תהליכים שקולטים ופולטים תוצרים. מלטונין אף הוא מופיע אצל צמחים, ומשמש לשלל פעולות ובראשן פעילותו כנוגד חמצון²⁶.

נמצא שמלטונין שהוסף לצמח הפחית עקות, הפעיל הורמונים למניעת איבוד כלורופיל, שיפר את פעילות מערכת הפוטוסינתזה והיה אחראי על שלל פעילות אנזימים והורמונים. מלטונין תוך צמחי מצטבר בצמח בתנאי עקה, כך שהוא בעל תפקיד בהתמודדות עם עקות שונות²⁶. כמויות המלטונין משתנות על פי מחזור צירקדי, אך לא נראה שהוא מבוקר ישירות על ידי אור אלא על ידי השעון הביולוגי. כנראה שיש למלטונין תפקיד גם בבקרה הורמונלית של צמחים²⁶. סנכרון השעונים הביולוגיים בצמחים מתבצע בעזרת קולטני אור הנקראים פיטוכרומים (חומר אורגני המצוי בצמח שיש לו רגישות לאור אדום) וקריפטוכרומים, חלבונים המשמשים קולטני אור ורגישים בעיקר לאור כחול³⁶.

כמו אצל בעלי חיים, לשעונים ביולוגיים יש תפקיד משמעותי מאוד אצל צמחים, והם מאפשרים להם לחזות תהליכים יומיים ועונתיים ולהתכונן להם³⁴. למעשה, השעונים מחברים אותות סביבתיים, כמו אור וטמפרטורה, לפיזיולוגיה הפנימית של הצמח כדי לתזמן את הפעילות הפיזיולוגית לשעת היום או לעונה בשנה³⁵, דבר המהווה יתרון אבולוציוני ומסביר את היתרון בהתפתחות השעון³⁴.

השעון הביולוגי והתהליכים הקשורים אליו מגדילים את יכולת הגדילה של הצמח ואת הצלחת רבייתו, עוזרים להילחם בעקות סביבתיות ובמחלות, שולטים על המטבוליזם של ההטמעה, על מעבר למצב רבייה או לתרדמת חורף ועל תהליכים רבים נוספים. לשעון חשיבות רבה בפיתוח ובשליטה על תכונות של צמחים לחקלאות³⁵. השעון הביולוגי מפעיל ומסנכרן ביטוי גנים, ואצל צמחים מסוימים מבקר לפחות שליש מביטוי הגנים³⁴, וכן מבקר תהליכים תאיים ושלל פעולות התלויות בזמן, כמו פעילות הורמונלית. השעון אצל צמחים הוא אוטונומי בכל תא. אור חיצוני מסנכרן את פעילות הגנים הקשורים לשעון על ידי השפעה על

34. Harmer. (2009). The circadian system in higher plants. *Annu. Rev. Plant Biol.* 60, 357-377.

35. Hsu & Harmer. (2014). Wheels within wheels: the plant circadian system. *Trends Plant Sci.* 19, 240-9.

36. Tóth et al. (2001). Circadian clock-regulated expression of phytochrome and cryptochrome genes in arabidopsis. *Plant Physiol.* 127, 1607-1616.

{5}

השפעות בריאותיות של זיהום אור

.....

הפרעה למחזוריות הגוף על ידי הארה עשויה להשפיע באופן מהותי על מחלות כגון השמנת יתר, סכרת, דיכאון ודיכאון עונתי (Seasonal affective disorders), על דיכוי מערכת החיסון, על דיכוי הפרשת מלטונין, על עקה חמצונית, על הפרעות בחילוף החומרים, על הפרעות שינה ועל הסיכון לסרטן השד – כל המחלות המצויות בצמיחה בחברות המתועשות ובעולם המפותח^{37,12}. ככל הנראה, ההשפעות הפיזיולוגיות הללו משותפות לכלל היונקים³⁷.

בעקבות תאורה לא מתאימה או שאינה מתוזמנת ופגיעה בסנכרון גוף האדם עם מחזור אור השמש עשויות להיגרם הפרעות צירקדיות המסכנות את איכות החיים ומגבירות סיכונים למגוון מחלות ספציפיות. הפרעות צירקדיות, המתווכות בין השאר על ידי הפרעה להפרשת מלטונין, משבשות את מחזורי השינה והערות, את טמפרטורת הליבה של הגוף ואת חילוף החומרים, משנות את הוויסות ההורמונלי ושחרור הורמונים בגוף, ומשבשות דפוסים של ביטוי גנים בגוף.



Navara & Nelson. (2007). The dark side of light at night: physiological, epidemiological, and ecological consequences. *J. Pineal Res.* 43, 215–224 .37

דוגמאות להפרעות בריאותיות הנקשרות לזיהום אור

- **שיבוש הפעילות המחזורית היממית של השעון הביולוגי** – תהליכים כגון דפוסי גלי מוח, ייצור הורמונים, ויסות פעילות תאית ופעולות ביולוגיות נוספות. שיבושים בשעון הביולוגי נקשרים למספר הפרעות בריאותיות כגון: דיכאון, נדודי שינה ומחלות כלי דם ולב. המחזוריות הצירקדית שמוסתת על ידי השעון, מבקרת את ביטויים של 10-15% מהגנים שלנו³⁸. הפגיעה המתועדת ביותר היא בהפרעות שינה של עובדי משמרות. בשנים האחרונות התקיימו מחקרים שבחנו את הקשר האפשרי בין הארה בלילה למספר סוגי סרטן. ההנחה היא כי שיבוש המערכת הצירקדית יוצר השפעות פיזיולוגיות הנקשרות למחלת הסרטן, נוסף להשלכות בריאותיות חריפות אחרות³⁷ המפורטות להלן.
- **הפרעות מטבוליות** – יעילות תהליך הפקת האנרגיה מהמזון בתהליך חילוף החומרים תלויה ברמות ניצול אנרגיית המזון בגוף, ומשתנה מאדם לאדם. אנרגיה מטבולית יעילה היא רכיב קריטי לתפקודים פיזיולוגיים. קשיים או הפרעות לתפקוד יעיל של תהליכי חילוף החומרים עשויים להביא למגוון תחלואות, כגון השמנה, סכרת מסוג 2 ומחלות לב. שכיחותן של עדויות להשפעות של הארכת משך החשיפה לאור מלאכותי על מערכת חילוף החומרים באופן ישיר, או על התחלואות המתפתחות בסופו של תהליך – עולה³⁷. תאורה קבועה בלילה המשבשת הפרשת מלטונין נתגלתה כמאיצת שינויים בחילוף החומרים. אצל חלק ממיני היונקים משפיע המלטונין על ויסות מסת הגוף, על יעילות תפקודי המעי, על קצב חילוף החומרים, על ייצור חום שלא ברעד (NST) ועל שיפור סנתוז מטבע האנרגיה ATP בלב. חשיפה ממושכת לאור, שאינו חלק מהמשטר הטבעי, יוצרת שינוי תפקודי בתהליך הבסיסי של הפקה וניצול של אנרגיה³⁷.
- **הפרעות שינה** – בקרב עובדי משמרות נצפו השפעה מזיקה על חילוף החומרים של פחמימות ושומנים, פיתוח עמידות לאינסולין, עלייה בלחץ הדם, מחלות לב כליליות ואוטם שריר הלב. תחלואות אלה עשויות לנבוע מהשפעות פיזיולוגיות ישירות או בלתי ישירות של חשיפה לאור, כתוצאה מהיעדר שינה³⁷. היעדר שינה משנה באופן מובהק את הפרמטרים המטבוליים והאנדוקריניים הנקשרים להשמנה ולסכרת ולשרשרת תחלואות נוספות. רמות המלטונין, המשקפות שינויים בתאורת הסביבה בצורה ישירה יותר, נקשרו למחלות לב כליליות. למטופלים בעלי מחלות לב כליליות היו ריכוזי מלטונין נמוכים יותר בלילה באופן מובהק לעומת מטופלים שלא סבלו ממחלות לב. המלטונין מפחית את פעילות מערכת העצבים הסימפתטית ומוריד את הפעילות המחזורית של נוראדרנלין בלב באופן מובהק – השפעה שעשויה להימצא מועילה, מאחר שנוראדרנלין ואדרנלין מאיצים את ספיגת הכולסטרול ה'רע' – LDL. מאחר שחשיפה לאור מדכאת ייצור מלטונין אצל בני אדם, הולך ומתבהר הקשר הישיר הפוטנציאלי בין חשיפה לאור במהלך הלילה לבין תחלואות מטבוליות, כגון מחלות לב³⁷.
- **שיבוש פעילות מחזורית של מספר הורמונים, בהם:** פרולקטין (תהליכי רבייה); גלוקוקורטיקואיד (חילוף חומרים ורמת גלוקוז בדם); ACTH (מערכת החיסון, הפרשת קורטיזול ואדרנלין); סרוטונין (מוליך עצבי בעל תפקיד חשוב ברגשות הקשורים למצב רוח, ויסות טמפרטורת גוף, שיכוך כאבים, הנאה, שינה ושובע); מלטונין ('הורמון החושך', נוגד חמצון רב עוצמה ובעל תפקיד בהגנה על הדי-אן-איי בגרעין התא ובמיטוכונדריה, מעין שעון יומי ועונתי לפעולות כגון רבייה, התנהגות, החלפת פרווה או שיער ועוד); גלוטטיון (נוגד חמצון חשוב שמבוקר על ידי מלטונין וכמותו פוחתת עם החשיפה לאור)³⁷.

38. Chepesiuk. (2009). Missing the dark: Health effects of light pollution. Environ. Health Perspect. 117(1), A20.

אדם הנחשף בלילה לתאורת נורת להט בעוצמות הארה נמוכות למשך 39 דקות בלבד, יסבול מדיכוי ייצור המלטונין בגופו בכ-50%. שיבושים כאלה בייצור ובהפרשה של המלטונין משפיעים על ויסות של תהליכי חילוף חומרים, על תפקודי יתרת הכליה ועל בלוטת התריס.

הראו הימצאות קולטני מלטונין ברקמות הלימפטיות ובתאים האחראים על סירקולציה של מערכת החיסון. צמצום המלטונין על ידי תאורה קבועה נוטה לדכא תאי דם לבנים מסוג תאי T בפעילות אוטואימונית. כמו כן, נמדדה ירידה בכמות נוגדנים אצל עופות שנחשפו לזיהום אור³⁷.

• **עקה חמצונית** – עקה חמצונית נוצרת כאשר כמות הרדיקלים החופשיים גוברת על נוגדי החמצון. העקה נגרמת משום שמנגנונים פיזיולוגיים האחראים על מאזן נוגדי החמצון בתוך הגוף נפגמים, כך שהגוף מתקשה להתמודד. עקה חמצונית עשויה להזיק למולקולות השונות ולפגוע במבנה התא ובתפקודו. מלטונין הוא לא רק נוגד חמצון מוכר, בעל תפקיד מהותי בהגנה האנטי-אוקסידנטית, אלא גם בעל תפקיד של ויסות הייצור והפעילות של אנזימים נוגדי-חמצון, כגון גלוטטיון. חשיפה לאור הפוגעת בייצור המלטונין, עשויה להוביל לעקה חמצונית שתגרום להשפעות שליליות, ובכללן נזק לתאים של מערכת החיסון ורקמות אחרות בגוף, עלייה בשכיחות סרטן והאצה בתהליכי הזדקנות פיזיולוגיים. לדוגמה, אצל חולדות תחת תאורה קבועה נמדדה עלייה בתהליכי חמצון שומנים בכבד, בכליות ובמוח³⁷.

• **העלאת הסיכון לסרטן** – תהליכים אנדוקריניים, נוגדי חמצון ופעילות של מערכת החיסון הם לעתים תנגודת יעילה לסרטן. כעת ידוע כי שלל התהליכים הללו עשויים להשתבש כתוצאה מחשיפה לאור. נמצא כי מלטונין סייע בהפחתת רמות התפשטות התאים, והגביר ריכוזים של חומרים נוגדי גידולים ורעלים. מלטונין עשוי לשנות את האיזון התוך-תאי מהתפתחות מואצת לחלוקה, כך שהוא מסוגל למנוע גידולים. מחקרים מראים כי למלטונין השפעה ישירה על גידולים סרטניים ועל התפשטותם³⁷. הולכים ומצטברים מחקרים הקושרים בין חשיפה לאור לבין הסיכון לחלות בסוגי סרטן שונים בקרב בני האדם (בעיקר עובדי משמרות) ובעלי חיים. מחקרים עדכניים הראו כי חשיפה לאור קבוע ועמום בעוצמה של 0.21 לוקס הגבירה באופן מובהק גידולים של סרטן השד שהוזרקו לבעלי חיים, כמו כן הגבירו את הספיגה הכוללת של גידול חומצות השומן, חומצה לינולאית וחומרים נוספים³⁷. מחקרים הבודקים קשרים עקיפים הראו גם הם קשר בין תאורת לילה לבין סרטן הערמונית והמעיים הגס³⁹.

• **דיכוי יכולות ההתמודדות הטבעיות של מערכת החיסון עם מצבי עקה ותחלואה** – מספר מחקרים

Kloog et al. (2009). Global co-distribution of light at night (lan) and cancers of prostate, colon, and lung in men. Chronobiol. Int. 26, 108-125 .39

השפעות בריאותיות של צפייה במסכי לד לפני השינה

סקר שנערך בקרב האוכלוסייה הבוגרת בארה"ב ב־2011 מצא שרוב הנשאלים צופים במסכים זמן קצר לפני השינה⁴⁰. לקבוצות גיל שונות נמצאו הרגלי צפייה שונים: במסך הטלוויזיה צפו בעיקר אלה שעברו את גיל 30 (דור ה־X ודור הבייבי בום שקדם לו), בעוד שהמחשב הנייד היה נחלתם של בני העשרה ודור ה־Y (צעירים בשנות ה־20 לחייהם), וכך גם השימוש בטאבלט, בטלפון החכם ובמשחקי הווידאו לסוגיהם.

מסכי הלד פולטים קרינה רבה בתחום הכחול, המפריע לייצור המלטונין ופוגע בתהליכים פיזיולוגיים בגוף, בערנות וביכולות שכליות⁴¹⁻⁴⁴. חשוב לציין כי בשעות היום התאורה הכחולה דווקא תורמת לערנות ולביצוע משימות⁴⁵.

לא במפתיע, נמצא באחד המחקרים הללו⁴⁰ שבני העשרה הם גם הישנוניים ביותר, לאחר שהיו עסוקים בטלפון הנייד לפני השינה. אחוז לא מבוטל מבני הנוער גם דיווחו שהתעוררו בכמה לילות בכל שבוע לאחר שקיבלו שיחת טלפון או מסרון מחבר.

מחקרים נוספים מרחבי העולם הראו תוצאות דומות ואף חמורות יותר⁴⁶. מחקר שנערך בנורווגיה ושבחן 10,000 בני 16 עד 19, מצא שכמעט כולם השתמשו במחשב או בטלפון נייד בשעה לפני ששכבו לישון⁴⁷. המחקר מצא שככל שבני הנוער השתמשו במסכים זמן רב יותר, כך התארך הזמן שלקח להם להירדם – עובדה שקיצרה את משך שנת הלילה שלהם. נתוני ארגון הבריאות העולמי מצביעים על כך שכיום בפינלנד 20% מהנערות ו־10% מהנערים סובלים ממה שמכונה "עייפות כרונית". ההערכות הן שהעלייה בצריכת משקאות האנרגיה ושימוש תכוף בטלפונים הניידים הם שהביאו לעלייה של פי שניים בבעיות שינה בקרב הנוער במדינה זו⁴⁸. מחקר נוסף שנערך בארה"ב מצא שאצל בני נוער שנחשפו למסכים סמוך לשעת השינה שלהם נמצאו רמות נמוכות ב־23% של מלטונין ברוק⁴⁹. כמו כן, ככל שזמן החשיפה למסכים עלה (משעה לשעתיים) כך התחזקה ההשפעה על דיכוי ייצור המלטונין – עד כדי 38%.

40. Gradisar et al. (2013). The sleep and technology use of Americans: Findings from the National Sleep Foundation's 2011 sleep in America poll. *J. Clin. Sleep Med.* 9, 1291-1299

41. Higuchi et al. (2005). Effects of playing a computer game using a bright display on presleep physiological variables, sleep latency, slow wave sleep and REM sleep. *J. Sleep Res.* 14, 267-273

42. Nathanson et al. (2014). The relation between television exposure and executive function among preschoolers. *Dev. Psychol.* 50, 1497-1506

43. Nathanson & Fries. (2014). Television exposure, sleep time, and neuropsychological function among preschoolers. *Media Psychol.* 3269, 1-25

44. Higuchi et al. (2003). Effects of VDT tasks with a bright display at night on melatonin, core temperature, heart rate, and sleepiness. *J. Appl. Physiol.* 94, 1773-1776

45. Cajochen et al. (2011). Evening exposure to a light-emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance. *J. Appl. Physiol.* 110, 1432 LP-1438

46. Chang et al. (2014). Evening use of light-emitting eReaders negatively affects sleep, circadian timing, and next-morning alertness. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 112, 201418490

47. Hysing et al. (2015). Sleep and use of electronic devices in adolescence: results from a large population-based study. *BMJ Open* 5, e006748-e006748

48. Kronholm et al. (2015). Trends in self-reported sleep problems, tiredness and related school performance among Finnish adolescents from 1984 to 2011. *J. Sleep Res.* 24, 3-10

49. Figueiro & Overington. (2016). Self-luminous devices and melatonin suppression in adolescents. *Light. Res. Tech.* 48(8), 966-975

{6}

השפעות אקולוגיות על החי והצומח

.....

בעיקר אם נבחן את התופעה לאורך זמן, עוצמה, תפוצה, תזמון או רמת תפזורת של הזיהום. מערכות ביולוגיות עוצבו בראשיתן על ידי אור. החשיפה של חשכת הלילה הטבעית לתאורה מלאכותית הביאה לשינוי דפוסי ההארה באופן נרחב וחדשני. על אף התרומה החשובה של התאורה המלאכותית למין האנושי, זיהום אור מביא עמו השפעות ביולוגיות רבות⁴.

זיהום אור משפיע על תהליכים רבים שהאור משמש בהם משאב ומקור מידע (טבלה 3), כגון יצרנות ראשונית, חלוקת זמני פעילות, תיקון והבראה של תפקודים פיזיולוגיים, מדידת זמן באמצעות השעון הציורקי, מחזורי ירחיים ועונתיים (איור 13), איתור משאבים ואויבים טבעיים, ניווט והתמצאות במרחב. מחקר מועט נעשה על השלכות של זיהום האור על תהליכים ברמת האוכלוסייה או המערכת האקולוגית, כגון פוריות, תמותה, יצרנות של חברות, הרכב מינים ויחסים בין רמות הזנה בשרשרת המזון. מחקרים שזיהו תהליכים כאלה נעשו במגוון דיסציפלינות מחקריות שונות, בעיקר על חולייתנים ועל מערכות אקולוגיות (טבלה 3). לרוב, ההקשר למנגנון הפיזיולוגי חסר במחקרים אלה⁶. במחקר שהתפרסם לאחרונה הראו החוקרים כי בבריטניה, באזורים שיש בהם זיהום אור משמעותי, הניצנים יוצאים מוקדם יותר מבאזורים שאינם תחת זיהום אור. שינוי זה יוצר בעיות במעלה שרשרת המזון: זחלים אינם בוקעים בסנכרון עם העלים, וכך נפגע מזונן של הציפורים⁵¹.

ההשפעות האקולוגיות של תאורה מלאכותית על החי והצומח כוללות שיבוש מחזור התאורה היומי והירחי, ושיבוש השינוי העונתי של אורך היום. קווי הרוחב השונים על פני כדור הארץ מתאפיינים במשטרי אור המשתנים בצורה מחזורית וקבועה. עם התפתחותה של האוכלוסייה האנושית וטכנולוגיות ההארה, גוברת ההארה המלאכותית הפולשת לחשכה ומתפרסת על פני מרחב, זמן והרכבים ספקטריים מגוונים. האור הטבעי הוא משאב מועיל ומקור מידע לגבי הסביבה. לאור מלאכותי יש יכולת לשבש זאת, והתאורה הגוברת מייצגת את ההסטה הפוטנציאלית במחזוריות הטבעית של אור וחושך⁶.

נוסף למחזורי היממיים והעונתיים הנובעים מהחשיפה לאור יום וממשך שעות האור, ידוע כי אור הירח משמש אות עבור מגוון מינים. השפעת אור הירח רק החלה להיחשף, ונדרש מחקר נוסף להבנת תפקידו. הפערים אף גדולים יותר בכל הנוגע להבנת המנגנונים הקשורים לתגובת אורגניזמים לאור הירח. חשוב לערוך מחקר בתחום תזמונים ביולוגיים של אור הירח בייחוד בחברות מתועשות שזיהום האור בהן רחב היקף⁵⁰.

השינויים האנתרופוגניים הסביבתיים הנגרמים כתוצאה משיבוש משטר האור הטבעי הם חסרי תקדים, גם אם ננסה להשוותם לשינויים סביבתיים אחרים כמו ריכוז ה- CO_2 , שינויי טמפרטורה או התמרה של בתי גידול. לא קיימות אנלוגיות טבעיות דומות למצב של זיהום האור,

Kronfeld-Schor et al. (2013). Chronobiology by moonlight. Proc. Biol. Sci. 280(1765), 20123088 .50

Ffrench-Constant et al. (2016). Light pollution is associated with earlier tree budburst across the United Kingdom. Proc. R. Soc. London .51
Biol. Sci. 283 (1822), 20160813

איור 13: השפעות הארה על התפקוד הפיזיולוגי-עונתי של העץ - קצב השלכת משתנה ביחס לחשיפה לאור מלאכותי. עלי העץ שמרוחקים ממקור האור כבר נשרו, ואלה הסמוכים למקור האור (המדמה משך יום ארוך שמאפיין את העונה החמה) רק החלו בשלכת. אילוסטרציה.



טבלה 3. השפעות זיהום אור ושינויים במשטר ההארה על אורגניזמים שהאור משמש להם משאב ומקור מידע⁶

ספקטרום	זמן	מרחב	פוטוסינתזה	האור כמשאב
השפעה אפקטיבית בטווח רחב של אורכי גל, בין 400 ל-700 ננומטר, בחפיפה עם מערכות הארה המותאמות לראיית אדם; קיימות רגישויות שיא בכחול ובאדום	אפקטיביות מרבית כאשר האור רציף במהלך פאזה שחשוכה באופן טבעי. מידת ההשפעה תפחת עם משך ההארה	השפעה מקומית, כנראה משמעותית אקולוגית רק בבתי גידול שחשוכים באופן טבעי, כדוגמת מערות		
אורכי גל בעלי השפעה משתנים בהתאם לשיוך הטקסונומי	כנראה קריטי בייחוד סביבי הדמדומים והזריחה, אף על פי שהארה מתמשכת עשויה להרחיב את השפעותיה אל תוך הלילה	השלכות עשויות להיות רחבות היקף, כמו השפעותיה של זהירת הרקיע שמאפשרות הגברת פעילות לילית, או מקומיות מאוד, כאשר אור ישיר בקרבת מנוורות מאפשר למינים פעילי יום או שפעילים בשעות הערביים ולפני השחר (Crepuscular) להרחיב את זמני פעילותם לזמנים שחשוכים באופן טבעי. הטרוגניות מרחבית בכתמי אור וחושך עשויה להוביל לחלוקה מרחבית של משאב האור	חלוקת פעילות בין יום ללילה	
הארה בכחול וב-UV-A עשויה להביא לתיקוני די-אן-איי על ידי טיפול באור (PR - Photoreactivation); אור כחול עלול לשבש ייצור מלטונין אצל חולייתנים עליליים	עשוי להימצא בעל השפעה במהלך הלילה; פולסים קצרים של אור עלולים להספיק כדי להפריע לייצור מלטונין	עשוי להיות נרחב - יש מעט מידע זמין על אודות המנגנון הפיזיולוגי ועוצמות האור הנדרשות עבור המינים השונים	מנגוני אישוש ותיקון די-אן-איי	
השפעות נוטות להשתנות בין קבוצות טקסונומיות שונות; צמחים עשויים להיות רגישים לפרופורציות בין אדום ל"Far-red" (טווח האדום הקיצוני הנראה, המצוי בין אדום לתת-אדום) באמצעות הפיטוכרום (חומר אורגני רגיש לאור אדום), ולא דווקא לעוצמות מוחלטות של הארה באורכי גל נתונים. נוסף על כך, צמחים ובעלי חיים עשויים להגיב לאור כחול באמצעות הקריפטוכרום (חלבון רגיש לכחול המשמש קולטן אור)	לתאורה נמוכה, רציפה או מקוטעת, יש השפעה; פולסים קצרים של אור במהלך הלילה יש בהם כדי לשבש הן את השעונים הביולוגיים הן את התגובות לאורך היום אצל מינים מסוימים	ההשפעות עשויות להיות נרחבות, אך במרבית המקרים הדוגמאות שתועדו נמצאו בסמיכות למקורות האור (למשל, היעדר שלכת אצל צמחים נעירים בסמיכות לפנסי תאורה, שינויים בקצבי חלוקה אצל אצות)	שונים ביולוגיים ואורך היום	
טווחי אורכי גל בעלי השפעה משתנים בין קבוצות טקסונומיות. מקורות אור בעלי פיזור ספקטרי נרחב יותר נוטים להעניק הגדרת צבע טובה יותר, ומסייעים בזיהוי של אובייקטים ובהבחנה בהם על פני הרקע למרבית המינים	ככל הנראה, ההשפעות המרביות הן סביבי הדמדומים והזריחה, הארכת משך הפעילות של מינים שבאופן טבעי הם פעילי יום או שפעילים בשעות הערביים ולפני השחר, אך עשוי גם לאפשר פעילות במהלכו של הלילה (למשל למיני חופמאים)	עשוי להימצא בשכיחות גבוהה על פני אזורים נרחבים; השפעות זהירת הרקיע עשויות להשתוות לעוצמות הארת הירח או לחרוג מעבר להן	תפיסה חזותית	האור כמקור מידע
תאורה בעלת UV גבוה (למשל פנסי כספית - Mercury vapour) מפריעה לחרקים; תאורה אדומה מפריעה לחלק ממיני העופות	אור המופיע לסירוגין (אור מקוטע) עשוי להיות בעל השפעה פחותה - הארה במהלך זמני מפתח של תנועה (למשל במהלך אירועי נדידה) עשויה להיות בעלת ההשפעה הניכרת ביותר	למינים שונים רגישות גבוהה לאור ישיר, גם כשעוצמת האור נמוכה, כך שמקורות אור מבודדים עלולים לשבש יכולת ניווט על פני סקלות שונות במרחב. מקורות אור מפוזרים, כגון זהירת רקיע, עשויים למסך אותות טבעיים של הארה המשמשים לניווט, כולל מיקום הירח ואור אטמוספרי מקוטב	אוריינטציה מרחבית וסביבת הארה	

השפעות אור מרמת האורגניזמים לרמת החברה

על העדפות הצבות לקינון במקומות חשוכים⁵² ועל יכולת הניווט של צבי הים הבוקעים מהביצה. זיהום אור עלול לפגוע זמנית בראייה, כמו שקורה למשל אצל צפרדעים. הוא עלול לגרום למשיכה של ציפורים ועטלפים לאזור מואר, ויש לציין כי נרשמת אצלם תמותה מוגברת באזורים בנויים מוארים, בעיקר בזמני נדידת לילה. חרקים רבים נמשכים אף הם לאור, בעוד חרקים אחרים נדחים על ידו¹⁰. משיכת חרקים לאור עשויה להשפיע בדרכים עקיפות על מערכות אקולוגיות שלמות. לדוגמה, זיהום אור פוגע באוכלוסיות עשים, ועשים הנמשכים לאור מבליים פחות זמן בהאבקה של פרחים⁵³.

רבייה

התנהגות רבייה עלולה להשתנות כתוצאה מזיהום אור. לדוגמה, נקבת צפרדע מהמין *Physalaemus pustulosus*, נוטה להיות ברנית פחות בבחירת זכר להזדווגות כאשר רמות ההארה מוגברות, ככל הנראה מתוך העדפה להזדווג כמה שיותר מהר כדי למזער סיכוני טריפה מוגברים, תחת הארה, במהלך ההזדווגות¹⁰. תאורה עלולה לפגוע בתנועה הלילית של דו-חיים הנעים אל אתרי רבייה או חזרה מהם. צפרדעים שהוחזקו במכלאות ניסוי הפסיקו להזדווג בלילות ששודרו בהם משחקי פוטבול, כשהארה סמוכה הגבירה את זהירת הרקיע. ההזדווגות התחדשה רק לאחר שהמכלאות כוסו ונמנעה חדירת אור¹⁰.

בקרב ציפורים, ראיות מצביעות על כך שתאורה עלולה להשפיע על שיקולי בחירת אתר לקינון. במחקר שבחן השפעת תאורת כבישים על בחירת אתרי קינון בקרב הלימוזה (*Limosa limosa*), מין של חופמאי, שהוא עוף המקנן באזורים לחים, נמצא כי צפיפות הקינונים

השפעת זיהום אור על הפרט תתחיל באופן המתואר לעיל במנגנון הפיזיולוגי ובהשפעות בריאותיות. נוסף על השפעות פיזיולוגיות אלה יהיו השפעות התנהגותיות נרחבות שייגרמו ממנגנונים פנימיים ומהשפעות חיצוניות. התנהגויות ברמת הפרט ישפיעו ברמת האוכלוסייה והחברה דרך אינטראקציות אקולוגיות קלסיות, כמו יחסי טורף-נטרף, תקשורת ותחרות¹⁰. בסביבה טבעית הוכחו השפעות של זיהום אור על אקולוגיה התנהגותית ועל אקולוגיה של חברות (טבלה 4). נמצא כי השפעות מתאפיינות בשינויים ביכולת ההתמצאות – חוסר יכולת להתמצא או התמצאות שגויה, כמו גם משיכה לאזור חשוף לאור או התרחקות ממנו, מה שעשוי להשפיע גם על שיחור מזון, רבייה, נדידה, תקשורת, תחרות ויחסי טורף-נטרף¹⁰.

התמצאות וחוסר התמצאות, משיכה ודחייה

התמצאות וחוסר התמצאות הן תגובות לתאורה אופפת, דהיינו, לכמות הארה על אובייקטים מסביב לבעל החיים. מנגד, דחייה ומשיכה מתרחשות בתגובה למקורות האור עצמם, על כן הן תגובות להפצת האור או לבהירות מקור האור.

יש להבדיל גם בין תגובות להארה זמנית לבין זיהום אור כרוני, לאורך זמן, שעלול להגביר התנהגות יומית, או כזו של אורגניזמים שפעילותם הטבעית מתרחשת לפנות ערב או לפני עלות השחר, כך שפעילותם תימשך אל תוך הלילה בזכות יכולתם להתאים את עצמם לשינוי בהארה. מדובר ביתרון עבור מינים המסוגלים לנצל זאת, אך בחיסרון לטרפם¹⁰.

זיהום אור עלול להגביר התנהגות טריטוריאלית אצל ציפורים, להשפיע על יכולות ניווט של צבות ים מטילות,

Mazor et al. (2013). Can satellite-based night lights be used for conservation? The case of nesting sea turtles in the Mediterranean. *Biol. Conserv.* 159, 63-72

Macgregor et al. (2016). The dark side of street lighting: impacts on moths and evidence for the disruption of nocturnal pollen transport. *Glob. Chang. Biol.* 23(2), 697-707

נמוכה יותר במרחק של עד 300 מטרים מתאורת כבישים, לעומת אזורי הביקורת הסמוכים לכבישים שאינם מוארים⁵⁴. נמצא גם כי עופות ישנו את תזמון הרבייה שלהם בהתאם לרמות האור שהם חווים, ושתזמון זה יהיה שונה גם אצל עופות שוכני עיר לעומת עופות בשטחים פתוחים⁵⁴.

רביית אלמוגים תלויה באור הירח. חשיפת אלמוגים לתאורה לילית תשפיע על קצבי הרבייה ועל תוצריה, ואף עלולה למנוע רבייה⁵⁵.

תקשורת

תקשורת חזותית בין מינים עלולה להיות מושפעת מזיהום אור. ישנם מינים המשתמשים באור לצורכי תקשורת, ומשום כך הם רגישים במיוחד להפרעה מסוג זה, אך ישנם גם דפוסי תקשורת המושפעים באופן עקיף מתאורה. דוגמה לכך היא זאב הערבות (קוויט – *Canis latrans*) שעושה שימוש ביללותיו ובנביחותיו הקבוצתיות באופן מוגבר בלילות מולד ירח, בשמי לילה חשוכים. תקשורת זו הכרחית להפחתת הסגות גבול וכניסה לטריטוריה של להקה אחרת, או להתארגנות של להקה לצורכי ציד של טרף גדול יותר בתנאי חשכה. זהירות רגיע עלולה לפגום בדפוס התנהגות תקשורתית זו באזורים המזוהמים¹⁰.

דוגמה נוספת הן ציפורי שיר החשופות לאור פנסי רחוב, ומקדימות בשל כך את שירת הבוקר שלהן⁵⁶.

גחליליות ובעלי חיים אחרים המשתמשים באור כימי בגופם למשיכת בן זוג עלולים לסבול ממיסוך של ההבהובים שלהם.

תחרות

זיהום אור מפריע לאינטראקציות בין מינים המראים

חלוקת משאבים ביחס לשינויי הארה. למשל, לעתים מופיעה חלוקה בזמני שיחור בין מינים המעדיפים רמות אור מסוימות (למשל מינים שונים של צפרדעים משחרים לטרף ברמות תאורה שונות). מיני עטלפים רבים נמשכים לחרקים המתקהלים סביב מקורות אור. אף על פי שאפקט של עלייה בריכוז מזון עשוי להתפרש כחיובי, מדובר בהשפעה המועילה רק למין המפיק תועלת ממקור האור, מה שעלול להביא לשינוי במבנה החברה. עטלפים ממינים מסוימים ניצלו את מקור המזון החדש, בעוד מיני עטלפים אחרים לא יעשו שימוש במשאב זה¹⁰.

טריפה

ניתן לחשוב כי הארכת חלון הזמן לשיחור לטרף תחת תנאי הארה מלאכותיים הוא יתרון עבור פעילי היום, אך כל עלייה בזמני פעילות עלולה להביא לעלייה גם ברמות סיכוני הטריפה. האיזון בין תועלת מהארכת משך השיחור לעומת סיכוני הטריפה, הוא נקודת התייחסות מהותית הנוגעת לשרשרת ההזנה, בכל הנוגע ליונקים קטנים, לזוחלים ולעופות. מכרסמים זעירים משחרים פחות ברמות הארה גבוהות, נטייה שנראתה גם בקרב ארנבאים, דגים, עטלפים, נחשים, חסרי חוליות ימיים וקבוצות נוספות. שינויים בלתי צפויים בתנאי הארה עלולים להפרי יחסי טורף-נטרף¹⁰.

מצב המדמה ליל ירח מלא תמידי, כתוצאה מחשיפה להארה מלאכותית, יהווה יתרון למינים סובלנים לאור, ויזחה מינים אחרים. מינים שמגבירים את פעילותם בזמני מולד ירח עלולים להיכשל בצבירת אספקת אנרגיית הסף הנדרשת¹⁰.

מינים מסוימים עלולים להיות מושפעים מרמות אור נמוכות מאוד. מכרסמי מדבר מסוימים, כמו ירבוועניים ואוגרים, יפסיקו את פעילותם בנוכחות פנס אחד במחנה מטיילים¹⁰.

54. Dominoni et al. (2013). Artificial light at night advances avian reproductive physiology. Proc. R. Soc. London B Biol. Sci. 280(1756), 20123017
55. Kaniewska et al. (2015). Signaling cascades and the importance of moonlight in coral broadcast mass spawning. Elife 4, e09991
56. Kempnaers et al. (2016). Artificial night lighting affects dawn song, extra-pair siring success, and lay date in songbirds. Curr. Biol. 20, 1735-1739

זואופלנקטון, המושפעת מאור. באזורים מוארים יימנעו הזואופלנקטון מתזונה בפני השטח בלילה, דבר שעלול להביא לעלייה בנוכחות מזונם, אצות חד-תאיות, ולפגוע באיכות מי הים¹⁰.

להשפעות המצטברות של שינויי התנהגות הנגרמים כתוצאה מזיהום אור על יחסי טורף-נטרף יש פוטנציאל ליצירת הפרעות בתפקודי המערכת האקולוגית. כדוגמה ניתן להסתכל על שינויים קיצוניים בנדידה אנכית של



טבלה 4. השפעות של רמות הארה על תפקודים ביולוגיים⁶. הציטוטים המלאים מופיעים במאמר המקורי.

מקור	תאורת הלילה בשימוש	השפעה	מעבדה/ שדה	מינים
Dice (1945)	1.6×10^{-6} * לוקס	איתור הטרף	מעבדה	Barred owl <i>Strix varia</i>
	2.7×10^{-6} * לוקס			ינושף עצים <i>Asia wilsonianus</i>
	5.7×10^{-6} * לוקס			תנשמת <i>Tyto alba</i>
	2.8×10^{-4} * לוקס			כוס המחילות <i>Speotyto cunicularia</i>
Larsen & Pedersen (1982)	2.8×10^{-4} לוקס (קבוע)	הגברת איתור טרף	מעבדה	קרפדה מצויה <i>Bufo bufo</i>
Evans et al. (2007a)	0.01 לוקס (קבוע)	שיבוש המקצב הביולוגי	מעבדה	אוגר זהוב (אוגר סורי) <i>Mesocricetus auratus</i>
Metcalf et al. (1997)	0.01-5 לוקס (קבוע)	הגברת איתור טרף	מעבדה	סלמון אטלנטי <i>Salmo salar</i>
Bachleitner et al. (2007)	0.03 לוקס (קבוע)	רמות פעילות הוגבר, שיאי הפעילות השכיחים במהלך הבוקר והערב הוסטו ללילה	מעבדה	תסיסנית המחקר <i>Drosophila melanogaster</i>
Dauchy et al. (1997)	0.2 לוקס (קבוע)	האצת רמות גידול של גידול סרטני והאצת חילוף החומרים	מעבדה	חולדת חוף <i>Rattus norvegicus</i>
Cos et al. (2006)	0.21 לוקס (קבוע)	הגברת רמות גידול של גידול סרטני	מעבדה	חולדת חוף <i>Rattus norvegicus</i>
Santos et al. (2010)	0.74 לוקס (קבוע)	צריכת טרף גבוהה יותר	ניסוי שדה	חופמי צווארון <i>Charadrius hiaticula</i>
				חופמי אלכסנדרין <i>Charadrius alexandrinus</i>
				חופמי מנומר <i>Pluvialis squatarola</i>
				חופית אלפינית <i>Calidris alpina</i>
				ביצנית לבנת כנף <i>Tringa totanus</i>
Falkenberg & Clarke (1998)	0.93 לוקס (קבוע)	הפחתת פעילות לילית	מעבדה	אוגר יערוני <i>Peromyscus maniculatus</i>

מינים	מעבדה/ שדה	השפעה	תאורת הלילה בשימוש	המקור
עכסן <i>Crotalus viridis</i>	מעבדה	הפחתת פעילות	1 לוקס	Clarke et al. (1996)
קיכלי אדום חזה American robin <i>Turdus migratorius</i>	תצפיות שדה	הקדמת תחילת שירה	ממוצע 1.26 לוקס טווח 0.05-3.06 לוקס; (קבוע)	Miller (2006)
Yellow-rumped leaf-eared mouse <i>Phyllotis xanthopygus</i>	מעבדה	הפחתת פעילות לילית	1.5 לוקס (קבוע)	Kramer & Birney (2001)
Darwin's leaf-eared mouse <i>Phyllotis darwini</i>	מעבדה	הימנעות מטורפים, צריכת מזון מופחתת	<2.0 לוקס (קבוע)	Vasquez (1994)
אוגר סיבירי <i>Phodopus sungorus</i>	מעבדה	דיכוי מערכת החיסון	5 לוקס (קבוע)	Bedrosian et al. (2011b)
אצות כחוליות	תצפיות שדה	נדרשה תאורה מזערית להמשך צמיחה פוטוסינתטית במערות	10-50 לוקס 50-180 לוקס 250 לוקס	Johnson (1979)
טחבים				
שרכים				
סלמון אטלנטי <i>Salmo salar</i>	ניסוי שדה	שיבוש התזמון של נדידה לילית	14 לוקס (קבוע) נמדד בגובה פני המים	Riley et al. (2012)
נשפון <i>Myotis dasycneme</i>	תצפיות שדה	הפחתת רמות שיחור מזון, שיבוש דפוסי תעופה	<30 לוקס (קבוע)	Kuijper et al. (2008)
פרסף גמדי <i>Rhinolophus hipposideros</i>	ניסוי שדה	הפחתת פעילות, עיכוב בתחילת היוממות	ממוצע הארה 51.67 לוקס (קבוע)	Stone et al. (2009)
נברן חברתי <i>Microtus socialis</i>	מעבדה	שיבוש אקלום עונתי - ויסות חום	450 לוקס פולס של 15 דקות	Zubidat et al. (2007)
עכבר שדה הודי קטן <i>Mus booduga</i>	מעבדה	שיבוש המקצב הביולוגי	1,000 לוקס פולס של 15 דקות	Sharma et al. (1997)

*המרה מערכים שנמסרו ביחידת המידה קנדלה.

יש לשים לב כי: (1) במקרים רבים מיוצגות רמות של טיפולים בניסוי, ולא ניתן לדעת באופן מדויק מה ערכי הסף; (2) על אף השימוש הנרחב ביחידות הלוקס, הן מדגישות התייחסות לרמות בהירות באורכי גל הנראים לעין על ידי אדם. המחקרים סודרו על פי עוצמות הארה בלוקס - מהעוצמה הנמוכה ביותר לעוצמה החזקה ביותר.

{7}

אסדרה לצמצום זיהום אור בעולם ובארץ

.....

7.1 בזבוז אנרגיה בתאורה וצמצומו

הנורות בשימוש ומעבר לתאורת לד שתשתית ההארה שלה גמישה יותר⁵.

משוער כי במדינות בעלות הכנסה בינונית ונמוכה נעשה שימוש ב-670 מיליון מנורות נפט שנועדו להארה בלילה, תוך פליטה שנתיית של 74 מגה-טונות פחמן דו-חמצני. לשימוש באנרגיה מבוססת דלקים מחיר כבד לא רק בהיבטים של יעילות בשימוש באנרגיה אלא גם מבחינה בריאותית, והוא קשור למחלות בדרכי הנשימה ולסיכונים כוויית. בהקשר זה, תאורת לד המופעלת באמצעות טכנולוגיה של אנרגיית שמש נחשבת החלופה המועדפת סביבתית. אף על פי שהמיקוד העיקרי בפיתוח תאורה זו כוון לצרכן הביתי, ישנן יוזמות לאספקת תאורת רחוב על בסיס אנרגיית שמש שתשתלב בתעשיית התאורה⁵.

מדינות רבות תופסות את מתקני התאורה בלילה, ואת תאורת הרחוב באופן ספציפי, כסמל סטטוס למעמד חברתי-כלכלי מפותח במדינה. בתוך כך, כמעט שלא הובאו בחשבון ההשלכות ופוטנציאל הנזק של הכנסת תאורה לאזורים שעד ימינו היו חשוכים, כמו גם דרכי פעולה שיש לנקוט לצמצום התופעה⁵.

נדרשת השקעת אנרגיה משמעותית לצורך הארה לילית, והיא מלווה בפליטות פחמן דו-חמצני וגזי חממה נוספים. קיימות הערכות שלפיהן 19% מייצור החשמל העולמי משמש לתאורה חשמלית. האנרגיה הנדרשת לתאורה מייצרת מדי שנה 1,900 מגה-טונות של פחמן דו-חמצני והעלות השנתית היא 360 מיליארד דולר (עבור ציוד, ייצור אנרגיה ושעות עבודה).

לנוכח משברים כלכליים ולחץ ציבורי, פעלו גופים מוניציפליים וממשלתיים בשלל מדינות מפותחות למציאת פתרון להפחתת עלויות התאורה הציבורית, בפרט תאורת הרחוב. עיקר התמקדותם הייתה בפן הכלכלי, על אף ההשלכות הידועות הנוגעות לפליטת פחמן דו-חמצני⁵.

דרכי הפעולה שנקטו לצורך צמצום העלויות התמקדו בעיקר במעבר נרחב לבחירה בטכנולוגיות הארה יעילות מבחינת שימוש באנרגיה ולפתרונות כגון הארה בחלק מהלילה וכיבוי מערכות התאורה הציבורית מיד לאחר חצות. נוסף על כך, היו שנקטו מדיניות של התקנת מתקני עמעום תאורה, אך המתקנים הצריכו מערכות ניהול תאורה מרכזיות, שחייבו לעתים שינוי של סוגי

7.2 אסדרה בעולם

לעתים אינה יעילה. עם זאת, אם יחליט המחוקק לתקן את החוק כך שאחת ממטרותיו תהיה הפחתת זיהום האור ולא רק חיסכון באנרגיה, תשתית האסדרה קיימת כבר, ולצד התקן בדבר שימור אנרגיה ניתן להוסיף תקן שעיקרו מניעת זיהום אור. לצד החקיקה הפדרלית ניתן למצוא ברמה המדינית חקיקה שמיועדת לאסדר את נושא זיהום האור.

האגודה הצפון אמריקאית להנדסת תאורה (IESNA) והארגון הבין-לאומי לשמיים חשוכים (IDA) פרסמו תקנת תאורה (להלן MLO), שמטרתה לספק מענה לצורכי האדם (בטיחות, מאור וכיו"ב) תוך מזעור זיהום אור, הגברת יעילות השימוש באנרגיה, מזעור פליטות גזי החממה וחסכון כלכלי.⁶¹

הדרישות העיקריות שמובאות בתקנה כוללות: 1. כיוון אור פנסי התאורה ישירות למקום שהאור נחוץ בו, על ידי שימוש בכיסוי; 2. שימוש במנורות שפידורן הספקטרי גורם נזק מזערי; 3. שימוש בקוצבי זמן ובחיישנים להדלקה ולכיבוי אוטומטיים של האור בהתאם לזמנים שהוא נחוץ בהם; 4. הגדרת רמות תאורה מתאימות לאזורים בעלי דרגה מוגדרת של רגישות לאור בהתאם לשימוש הקרקע באזור. לתקנת MLO מצטרפים שלושה תקנים של ה-IESNA,⁶² המתמקדים בהיבטים תכנוניים וטכניים ספציפיים מפורטים לשימוש אנשי מקצוע. תקנת MLO של ה-IDA וה-IESNA בצירוף של שלושת התקנים של IESNA היו בסיס לחקיקה שבוצעה במספר מדינות בארה"ב ובעולם.

ניכר כי על אף המודעות ההולכת והגדלה, מרבית מדינות העולם עדיין אינן מסדירות את נושא זיהום האור בחקיקה ראשית. באירופה ניתן למצוא אסדרה של זיהום האור במדינות שאינן נמנות על המדינות המובילות בגוש האירופי, כמו צ'כיה וסלובניה⁵⁷. בארה"ב אין בנמצא חקיקה פדרלית, אולם מספר מדינות וערים לקחו את הנושא על עצמן והן מסדירות את זיהום האור⁵⁸. בפרק זה נציג את האסדרה הקיימת במספר מדינות, נבחן כיצד הנושא נדון מסביב לעולם, ומה ניתן להסיק מכך לגבי הפעולות שמדינת ישראל צריכה לנקוט כדי להתמודד עם בעיית זיהום האור בשטחה.

ארה"ב

אין בנמצא בארה"ב חקיקה ברמה הפדרלית המסדירה באופן ישיר את נושא זיהום האור. הנושא מוסדר בצורה לא ישירה דרך ה-*Energy Independence and Security Act of 2007*⁵⁹. החוק עוסק בייעול צריכת האנרגיה באמצעות קביעת תקנים, שימור אנרגיה בבניינים ובתעשייה וכן במקומות ציבוריים וממשלתיים. המטרה המרכזית היא חיסכון באנרגיה, אולם החוק מגדיר באילו נורות ניתן להשתמש ובאילו לא, וקובע למעשה תקן עבור נורות ליבון או להט, ונורות פלואורסצנטיות. הבעייתיות היא שמטרת החוק היא חיסכון באנרגיה, והוא אינו מתיימר לעסוק כלל בזיהום אור. משום כך, החוק מעודד שימוש בנורות לד, שהן אמנם חסכוניות מבחינת צריכת האנרגיה ועומדות בתקן שמציב החוק, אולם פולטות אור בספקטרום רחב התורם משמעותית לרמות הזיהום⁶⁰. דוגמה זו ממחישה שאסדרה לא ישירה

57. Morgan-Taylor. (2012). Light pollution, nuisance and planning laws in the UK: the legal methods of controlling light pollution in the UK. in proceedings of 8th Sustainable Healthy Buildings Conference, Seoul. pp. 258-259

58. Bogard. (2013). Bringing back the night: a fight against light pollution. 360 ENVIRONMENT http://e360.yale.edu/features/bringing_back_the_night__a_fight_against_light_pollution

59. Sissine et al. (2013). Energy savings act of 2007 (S. 1321): Summary of major provisions. In: Juhász & Halász (eds.). Carbon capture and greenhouse gases. pp. 157-162

60. Elvidge et al. (2010). Spectral identification of lighting type and character. Sensors 10, 3961-3988

61. IDA-IES. (2011). Joint IDA-IESNA Model Lighting Ordinance (MLO) with user's guide. IDA International Dark-Sky Association and IES Illuminating Engineering Society

62. IESNA. (2000). Technical memorandum on light trespass: research, results, and recommendations (Reaffirmed 2011)

פליטות פחמן. הוא ממליץ שכל אורות הליד יהיו בעלי סוכך שימנע סנוור, יהיו בטמפרטורת אור נמוכה מ-3,000 מעלות קלווין כדי למנוע השפעות סביבתיות ובריאותיות שליליות, וכן שכל האורות יעומעמו לאחר שעות השימוש העיקריות בהם⁶⁶.

על פי חוקי מדינת וושינגטון בארה"ב, נושא התאורה המתאימה חייב להיכלל בתסקיר סביבתי המוגש עם תכנית פיתוח או בנייה⁶⁷. הסקירה חייבת לכלול התייחסות לסוג האור ולזמן התאורה, הערכה של מידת ההפרעה של האור לנוף הלילי ולבטיחות, סמיכות למקורות אור נוספים, מזידות מוצעות להפחתה ולבקרה של האור ורמת הסנוור. עם זאת, מדובר בהנחיות כלליות בלבד. רשויות מוניציפליות במדינת וושינגטון אימצו תקנים ותקנות ספציפיים יותר⁶⁸.

הוועדה המדעית המייעצת לסוכנות להגנת הסביבה (EPA) מכירה בזיהום אור כגורם פוטנציאלי להעלאת הסיכון להפרעות לבעלי החיים ולצמחים, ובכך שקיים הכרח לנהל סיכון זה⁶³. למרות זאת, ה-EPA לא הצביעה עד כה על זיהום אור כגורם משמעותי בדו"ח גורמי הסיכון הסביבתיים ("Report on the Environment")⁶⁴. תקנות הנוגעות להשפעת זיהום אור על בני האדם בסביבה הציבורית נחקקו בעיקר על בסיס מקומי.

אירגון הרפואה האמריקאי (AMA) קבע מדיניות הדוגלת בטיפול בזיהום אור ובהפחתת הבוהק ממקורות מלאכותיים במרחב הציבורי והפרטי, לשמירת בריאות הציבור ובטיחותו, להפחתת תופעות הפרעה למנגנונים צירקדיים ולשימור אנרגיה⁶⁵. לאחרונה המליץ האיגוד על מעבר לתאורת לד כדי לחסוך באנרגיה ולהפחית



Aubrecht et al. (2010). Lighting governance for protected areas and beyond—Identifying the urgent need for sustainable management of artificial light at night. <https://earthzine.org/2010/12/20/lighting-governance-for-protected-areas-and-beyond-identifying-the-urgent-need-for-sustainable-management-of-artificial-light-at-night>

EPA. (2016). EPA's Report on the Environment (ROE). United States Environmental Protection Agency Available at: <https://cfpub.epa.gov/roe>

CSAPH. (2012). Adverse effects of nighttime lighting. Council on Science and Public Health Report 4. Light pollution. American Medical Association, Annual Meeting, Chicago, IL

CSAPH. (2016). Human and environmental effects of light emitting diode (LED) community lighting. Council on Science and Public Health Report 2-A-16. American Medical Association

Washington State Legislature. WAC 197-11-960 Environmental checklist

Development standards and guidelines. 18.15.040 Outdoor lighting Chapter 18.15

<http://www.codepublishing.com/WA/BainbridgeIsland/html/BainbridgeIsland18/BainbridgeIsland1815.html#18.15.040>

ניו-מקסיקו העבירה אף היא חוק שכותרתו הגנה על שמי הלילה⁷⁰. מטרת החוק היא לנהל את גופי התאורה החיצוניים במטרה לשמר את שמי הלילה תוך כדי הגברת הבטיחות, שימור אנרגיה ושימור הסביבה לאסטרונומיה. החוק קובע כי לאחר כניסתו לתוקף יוצב סוכך על גופי התאורה במרחב הציבורי, למעט גופי תאורה שמפיצים אור עד 125 ואט. באשר לגופי תאורה שלא ניתן להציב עליהם סוכך, הם יוכלו להישאר על כנם אם ניתן באופן אוטומטי לכבותם מהשעה 11 בלילה ועד לזריחה. כל גופי התאורה המוצבים במקומות פנאי, ציבוריים ופרטיים, יכובו לאחר השעה 11 בלילה. החוק גם מגדיר שורה של גופי תאורה המוחרגים מתחולתו, כגון גופי תאורה שהכרחיים לשם בטיחותם של עובדים.

בקליפורניה מתייחס החוק לשטחים ציבוריים, ואוסר על מקורות תאורה מעל 175 ואט המכוונים לעבר הרקיע. כמו כן, החוק אוסר על הארת שלטי חוצות כלפי מעלה, ומחייב בתי עסקים להיות מסוגלים לשלוט בכמות התאורה היוצאת מהעסק, ולהפחיתה בשעות שהעסק אינו פעיל. תקנה של המושל מחייבת הפחתה של עוצמת התאורה הזולגת החוצה ב-50% לכל הפחות בשעות שהעסק אינו פעיל⁷¹.

קנדה

חוק משנת 2010 מגדיר בצורה מדויקת את עוצמת האור המותרת בשטחים ציבוריים: כבישים, מזרקות, מקומות חניה, מזרקות וכדומה. לכל מקום ציבורי מוגדרת עוצמת האור המותרת כדי לאפשר רמת בטיחות מיטבית. החוק קובע איסור על תאורה המופנית כלפי השמים במרחבים ציבוריים. כמו כן, תאורת אובייקטים, כגון בניינים, חייבת להיות כבוייה בשעות 23:00-05:00⁷².

תקנות אלה נוגעות להפחתת זיהום האור על ידי התקנת גופי תאורה ותחזוקתם המונעות את תופעת "האור הפולש", הכוונת האור כלפי מטה באמצעות מגנים ייעודיים, איסור הארה שתגרום לפיזור אור לכיוון הרקיע, כגון תאורה של גופי מים והארת עצמים כלפי מעלה. גם במדינת **מינסוטה** התקנות הן בעיקר תכנוניות ונוגעות לאלמנטים הנדסיים ותכנוניים הקשורים לתאורה המלאכותית בלילה, שמטרתם צמצום התופעות הקשורות לזיהום אור. פנס תאורת חוף חייב להיות מוגבל אלומה (cutoff), כך שלא יופנה אור מעל המישור האופקי, וכן בעל יכולת ויסות של עוצמת גוף התאורה. סעיף מעניין קשור לתאורת כבישים: התנאי להשקעה בתאורת כבישים הוא שמטרת ההארה אינה יכולה להיות מושגת באמצעים אחרים כגון פסים מחזירי אור, קווי הפרדה, תמרורים בולטים וכדומה. כמו כן, החוק מצייץ מקרים יוצאים מן הכלל, שניתן לחרוג בהם מהכללים שלעיל, כגון תאורה זמנית, תאורה אסתטית ותאורה הכרחית מבחינה בטיחותית⁶⁹.

מדינת **קונטיקט** קיבלה חוק שמטרתו להסדיר את סוגיית סנוור נהגים והולכי רגל ברחובות המדינה, ואת זיהום האור שנגרם ממערכות תאורה במרחב הפרטי. החוק קובע איסור על הצבת גופי תאורה המיועדים להארת המרחב הפרטי שהאור שהם מפיצים עולה על 1,800 לומן, וחובה לשימוש במגביל אלומה בכל גוף תאורה מעל 1,800 לומן (חוקים דומים גם ב**טקסס**, **בדלוור**, **במרילנד** וב**מינסוטה**). בקולורדו, וברוד איילנד מגדיר החוק 3,200 לומן במקום 1,800. בכך מגדירים למעשה החוקים תקן. החוק קובע תקופה של שנתיים שבמסגרתה יש להבטיח שגופי התאורה שהיו קיימים טרם קבלת החוק פועלים בהתאם לתקן החדש. מדינת

69. Minnesota Statutes. 16B.328 Outdoor lighting fixtures model ordinance 2015

70. Night Sky Protection Act. N.M. Stat. Ann. 74-12-1 through 74-12-10

71. Flamm et al. (2003). California outdoor lighting standards (Revised 2004)

72. Hiscocks. (2011). Summary of lighting regulations city of Toronto

אוסטרליה

נקבע תקן בקרה על ההשפעות הפולשניות של תאורת חוץ, שמתווה קווים מנחים לבקרה על השפעות אלה, וממליץ על רמות סף של תאורה שיקיימו זאת⁷³. התקן מגדיר תאורת חוץ ככל צורה של תאורה חיצונית או בתוך מבנה שפולטת אור המשפיע על הסביבה החיצונית. תקן זה משודרג כיום לתקן חדש משותף עם ניו זילנד⁷⁴.

אירופה

האיחוד האירופי מסדיר את הנושא של זיהום אור בצורה מצומצמת בלבד במסגרת הדירקטיבה לתכנון אקולוגי של מוצרים צורכי אנרגיה⁷⁵. בדומה למצב בארה"ב ברמה הפדרלית, הנושא של זיהום אור כלל לא נזכר בה, אלא היא עוסקת בחיסכון באנרגיה. גם כאן, הדירקטיבה יכולה לשמש אכסניה לחקיקה בתחום זיהום האור, אולם כרגע לא כך הם פני הדברים. הנושא של זיהום אור נזכר בהחלטות של מועצת האיחוד האירופי. ההתייחסות אל זיהום האור היא כאל מטרד, בדומה למטרד רעש. החלטות אלה הן הצהרתיות בלבד, הן מכירות בבעייתיות שבזיהום אור וקוראות לבחון אם יש לקבל אמנה שתסדיר את הנושא^{77,76}.

יש לציין שהאיחוד תומך בפעילות ענפה כנגד זיהום אור באמצעות תשתית שיתוף הפעולה בין חוקרים ואנשי מקצוע (COoperation in Science and Technology) COST. בתוך מסגרת זו המיזם "אבדן שמי הלילה" (Loss Of the Night Network) LONNE שם לו למטרה לשפר את הידע בתחום זיהום האור וזהירת רקיע, לחפש

טכנולוגיות חדשות ומדיניות לטיפול בסוגיית זיהום האור וזאת על ידי יצירת קשרים בין מדענים ואנשי מקצוע, הפריית יכולות הדדיות ובניית תכניות מחקר לפתרון הסוגיות הללו⁷⁸.

מספר מדינות חברות באיחוד קיבלו שורה של הסדרים שמטרתם לתת מענה לזיהום האור:

ציכיה מתייחסת לנושא של זיהום אור כחלק מהחוק העוסק בהגנה על האוויר. אחת ממטרות החוק היא להגדיר שורה של אמצעים שיש לנקוט כדי להפחית את זיהום האור. החוק מגדיר זיהום אור בצורה רחבה: כל צורה של הארה באור מלאכותי המתפזר מחוץ לאזור שיעד לו, בייחוד אם הוא מכווון מעל לקו האופק. החוק מחייב כל ישות משפטית למנוע הישנות של זיהום אור למעט במקומות שיותר זיהום שכזה בחקיקה. המפר היה חשוף לקנס כספי בשווי 80–24,000 ש"ח⁷⁹.

בסלובניה התקבל ב-2007 חוק הגבלת ערכים בשל זיהום אור של הסביבה, מהמחמירים ביותר באירופה, שדורש שבוהק האור לא יעלה כלל מעל קו האופק, ושנורות התאורה יכוסו בכיסוי מלא. החוק גם מגביל את צריכת החשמל השנתית של מועצות מקומיות לתאורה. החוק מחריג תאורת בטיחות שהכרחית על פי תקנות ממשלתיות, תאורת בטיחות סביב מבנים לאומיים ומשטרה, שלטים בכבישים, בדרכים ובשדה התעופה, אירועים פרטיים וציבוריים ותאורה דקורטיבית בין ה-10 בדצמבר ל-15 בינואר. החוק מגביל את התאורה המרבית בבניינים ציבוריים ובבתי עסק על פי שטחם

73. Australian Standard. (1997). Control of the obtrusive effects of outdoor lighting. AS 4282.

74. Lighting Council. Major revision planned to obtrusive outdoor lighting standard AS 4282. <http://www.lightingcouncil.com.au>

75. Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council of 6 July 2005. establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-using products and amending Council Directive 92/42/EEC and Directives 96/57/EC and 2000/55/EC of the European Parliament and of the Council

76. Parliamentary Assembly. (2010). Noise and light pollution, Resolution 1776. Parliamentary Assembly, Council of Europe

77. Parliamentary Assembly. (2010). Noise and light pollution, Recommendation 1947. Parliamentary Assembly, Council of Europe

78. LoNNe. LoNNe Loss of the night network. Available at: <http://www.cost-lonne.eu>

79. Clean Air Act (CZ). (2002). The Czech Act on Protection of the Air, including Light Pollution prevention (English translation of the relevant sections of the law). <http://amper.ped.muni.cz/light/law/czairlaw3>

רמת סף של תאורה מלאכותית שמעליה נגרמת הפרעה.

באיטליה החלה חקיקה בנושא בשנת 2001, והיא קיימת ב-15 אזורים. בשמונה מהאזורים מתבצעת אכיפת החוק. כדי לאמוד את קיום זיהום האור, מודדים את עוצמת האור ביחידות של קנדלה למ"ר (cd/m^2). המקסימום המותר ברוב האזורים (פרט לאלה שחייבים להיות מוארים בעוצמה חזקה יותר מטעמי בטיחות) הוא $1\text{cd}/\text{m}^2$. הגבלה זו לגבי עוצמת התאורה חלה על שטחים ציבוריים ופרטיים כאחד. במסגרת החוק האובייקט חייב להיות מואר כך שהתאורה לא זולגת מעבר לגבולותיו, אסור שאור יתפזר מעבר לשטחים שחייבים להיות מוארים, אסור להאיר את השמיים, ויש לכוון את התאורה כך שלא תאיר מעל האופק. קנסות מוטלים על המציבים תאורה בניגוד לחוק, וגובה הקנס פרופורציוני למספר גופי תאורה שמפריים את החוק⁸⁵.

בשווייץ פרסם משרד הסביבה הפדרלי המלצות כלליות הדורשות הפחתת זיהום האור מצד גורמים נוספים: 1. הוכחת נחיצות התאורה החיצונית, מתוך הנחה כי במקרים רבים אין בה צורך ממש. 2. הגבלת משך ההארה ככל שניתן, ו"כיבוי אורות" לאחר השעה 22:00, בעיקר באזורים רגישים מבחינה אקולוגית⁸⁶.

לסיכום, ניכר שארה"ב ומדינות האיחוד האירופי מכירות בחשיבות אסדרת הנושא של זיהום אור, אולם עדיין לא התקבלה חקיקה מתאימה כוללת ברמה הפדרלית, וזאת אף על פי שהתשתית כבר קיימת, וניתן להוסיף לצד סעיפים העוסקים בזיהום הסביבה ובחיסכון באנרגיה נדבך נוסף של זיהום אור.

ועל פי שעות הפעילות, וקובע מקסימום של 180 ואט לכל התאורה ללא תלות בשטח⁸⁰.

החקיקה המקיפה ביותר בתחום התקבלה בצרפת. החוק קובע כי כל בנייני הציבור יחויבו לכבות את התאורה החיצונית לכל המאוחר שעה לאחר שהעובד האחרון עזב. החוק לא רק מפחית בצורה דרמטית את זיהום האור, אלא אף חוסך אנרגיה השווה ל-750,000 משקי בית. באשר לחלונות הראווה, בהם יכבו את האור בין 01:00-07:00 או שעה לפני פתיחת החנות, המאוחר מבין השניים⁸¹.

בבריטניה הנושא של זיהום אור מוסדר כחלק ממדיניות התכנון הלאומית⁸². המדיניות קובעת כי יש לבחון את נושא זיהום האור בעת תכנון בתים או כאשר התאורה משפיעה על חזית הבניין. זיהום אור נחשב מבחינה משפטית לעוולה, כמו מטרד רעש. הטיפול בזיהום אור מעוגן בשני חוקים: 1. סעיף 79 של Environmental Protection Act, 1990, שמחייב את המועצות המקומיות לחקור תלונות תושבים על תאורה מלאכותית המפריעה או מזיקה להם; 2. Clean Neighborhoods and Environment Act, 2005, שמטפל בהשפעת זיהום אור כמטרד בעל השלכות מזיקות לבריאות האדם, ומטרתו להפחית את בודהק האור החודר מתאורה בחוף אל תוך בתי התושבים⁸³. ב-2007 פורסמו גם הוראות לחוק זה לגבי חרקים וזיהום אור⁸⁴.

על פי החוק, המועצה המקומית יכולה לפעול כנגד מקורות של אור פולש כשמוכח שהוא מהווה מטרד, למשל אור המאיר אל תוך חלונות של בתים סמוכים. עם זאת, בניגוד לחוקים במדינות האחרות שנסקרו לעיל, החוק אינו קובע מגבלה על שעות התאורה, ואינו מגדיר

80. Mohar. (2007). Slovene light pollution law, an unofficial, shortened summary of the final version <http://www.darkskiesawareness.org/slovene-law.php>

81. Morgan-Taylor. (2013). The regulation of light pollution in Europe. in 11th International Symposium on Sustainable Healthy Buildings

82. DCLG. (2012). Department for Communities and Local Government. UK National Planning Policy Framework

83. Department for Environment Food and Rural Affairs. (2013). Artificial Light in the Environment Policy Update

84. DEFFRA. (2007). Statutory nuisance from insects and artificial light

85. Cinzano. Laws against light pollution in Italy. <http://www.lightpollution.it/cinzano/en/page95en.html> (Accessed: 20th March 2016)

86. Righetti. (2007). Recommendations instead of prohibitions. the Swiss approach against negative light emissions. In: StarLight, A common heritage. International initiative in defence of the quality of the night sky and the right to observe the stars (eds. Jafari, J. & Marin, C.)

שלעיתים היא מחייבת גם פרטים במרחב הפרטי באותן חובות החלות על המרחב הציבורי, היא אינה מתייחסת כלל להבחנה בין זיהום אקולוגי לבין השפעת זיהום האור על בני האדם. להפחתת זיהום האור יהיו השפעות חיוביות על בני האדם ועל המערכת האקולוגית גם יחד, וכנראה משום כך אין התייחסות להבחנה האמורה.

זיהום אור בשמורות טבע

נושא זיהום אור בטבע מקבל התייחסות באתר של שירות הפארקים הלאומי האמריקאי, שמנטר מעל 100 פארקים בצורה שוטפת⁸⁷. באתר מומלץ להשתמש באור רק כאשר צריך, ולהשתדל להשתמש בהספק נמוך ככל האפשר: 25-40 ואט לנורת ליבון ו-9 ואט לנורת פלואורסצנט. המלצות האיחוד האירופי בנושא יובאו להלן בפרק על ישראל.

המדינות החברות באיחוד האירופי לא מחכות לאסדרה על-מדינית, ומפתחות אסדרה ברמה הלאומית. האסדרה יורדת לפרטים ומגדירה בדיוק מהו זיהום אור. ייתכן שדווקא חקיקה ברמה הפדרלית בארה"ב או ברמת האיחוד האירופי הייתה מובילה לאחידות בין המושגים הללו (הגם שמדינות ארה"ב שומרות על אחידות בהגדרות גם ללא חקיקה פדרלית המחייבת אותן בהגדרה שכזו).

עיקר ההתייחסות בחקיקה המטפלת במזעור זיהום אור היא לתאורת חוץ במרחב הציבורי (כבישים, דרכים, מגרשי חניה וכיו"ב). התייחסות ספציפית להפרעה הנגרמת מגופי תאורה בשטח פרטי יש באוסטרליה, בבריטניה ובפורטו ריקו. בעוד שהאסדרה הלאומית מבחינה בין המרחב הציבורי למרחב הפרטי, הגם



National Park Service. (2016). Night skies. <https://www.nps.gov/subjects/nightskies/index.htm> .87

(שצ"פים)⁹⁰ ובהנחיה לדבוק בתקן הישראלי הישן 1862, אבל בהנחיות אלה אין התייחסות לסוככים על הנורות ואין התייחסות לצבע האור. במסמך של משרד הבינוי והשיכון מ-2013 המפרט את הנוהל לבחינת יעילות תאורת כבישים בטכנולוגיית לד, יש דרישה לשימוש בנורת לד בעלת טמפרטורה של 4,000 מעלות קלווין⁹¹. נוהל זה עודכן ל-3,000 מעלות קלווין ב-2015 כנספח ד' למסמך 'מפרט טכני ומדריך ליישום תאורת לד בכבישים ובשטחים ציבוריים פתוחים'. בהמלצות העדכניות (2016) של משרד הבינוי והשיכון ב"קובץ הנחיות למתכנן לתאורת כבישים, רחובות וגנים ציבוריים"⁹², ממליצים על התאמת איכות התאורה לתקן הישראלי החדש לתאורת דרכים ת"י 13201, וממליצים להשתמש בתאורת לד בטמפרטורה מרבית של 3,000 מעלות קלווין, עם ערך מרבי (פיק) של הקרינה בתחום הכחול של הספקטרום, 420-500 ננומטר, של עד 55% מהעוצמה המרבית (פיק) הנפלטת. הנחיות אלה מחייבות רק מתכננים של משרד הבינוי והשיכון, והן חוזרות גם במפרט הכללי לעבודות בנייה בפרק 08⁹³.

התקן הישראלי לתאורת דרכים, ת"י 13201, מסדיר אזורי תאורה שונים, עוצמות מינימום להארה וסוגי סוככים לשימוש. עם זאת, תקן זה אינו תקן מחייב, וזיהום האור בתוך היישובים ומסביבם אינו מטופל כמעט.

הדרישה להתייחס אל זיהום האור וצמצומו מופיעה בהנחיות לביצוע תסקירי השפעה על הסביבה של המשרד להגנת הסביבה.

האסדרה הישראלית מתייחסת לזיהום אור, אך לרוב לא באופן מחייב. החוק המתייחס לקרינה בלתי מייננת (חוק הקרינה הבלתי מייננת, התשס"ו-2006) מחריג את האור הנראה, כך שגם החוק למניעת מפגעים סביבתיים (חוק למניעת מפגעים סביבתיים (תביעות אזרחיות), התשנ"ב-1992) אינו חל על קרינת אור. קיימת מדיניות במשרדי ממשלה שונים בעניין תאורה והפחתת זיהום אור: רשות הטבע והגנים (רט"ג) מתייחסת לנושא תאורת הכבישים⁸⁸, המעבר לתאורת לד⁸ ותאורה באזורים מוגנים במדיניות חדשה שיצאה יחד עם שותפים מהאיחוד האירופי (במסגרת תכנית COST)⁸⁹ הקובעת שיש להחליט היכן האור הכרחי והיכן ניתן לצמצמו או לכבותו כליל.

על פי המדיניות המומלצת, תאורה באתרים שמורים חייבת להיות מכוונת בקפידה כדי להאיר רק את מה שרוצים להאיר, עוצמת האור צריכה להיות מזערית ככל הניתן, וצבע האור שלא יעלה על 3,000 מעלות קלווין, ועדיף שיהיה 2,000 מעלות קלווין. מדיניות זו תורגמה לאחרונה למדיניות רשמית של רט"ג (ראו נספח 9 בתקליטור), שמצהירה כי היא מכירה בתפקידם החשוב של משטרי התאורה הטבעיים בהתהוות תהליכים ביולוגיים טבעיים ובאבולוציה של מינים, ולפיכך תפעל לשמר משטרי חושך טבעיים ומרכיבים נוספים של משטרי התאורה הטבעיים באתריה.

מחוץ לשמורת הטבע עלה נושא זיהום האור לראשונה בהנחיות של משרד הבינוי והשיכון במסמך "הנחיות לתכנון תאורה בשטחים ציבוריים פתוחים בערים

88. לידר. (2008). השלכות אקולוגיות של תאורת כבישים בישראל והצעות לפתרון.

89. LoNNe. (2015). Statement of the EU-COST Action ES 1204 LoNNe. Loss of the Night Network. Protected areas in Europe: essential for safeguarding the nighttime environment

90. אבישר ואחרים. (2006). הנחיות לתכנון תאורה בשטחים ציבוריים פתוחים בערים (שצ"פים). משרד הבינוי והשיכון, מנהל תכנון והנדסה.

91. אליהו. (2013). נוהל לבחינת יעילות תאורת כבישים בטכנולוגיית LED

92. משרד הבינוי. (2016). קובץ הנחיות למתכנן לתאורת כבישים, רחובות וגנים ציבוריים

93. הוועדה הבין משרדית לסטנדרטיזציה של מסמכי החוזה לבנייה (2015). המפרט הכללי לעבודות בנייה, פרק 08, מפרט כללי למתקני חשמל, אופני המדידה ותכולת המחירים.



{8}

סיכום והמלצות ועדת המומחים

.....

שונים. אנו פותחים בהמלצות למדיניות לאומית: אלה המלצות ברמת המאסדר וברמה של הכרזה והכרה בזיהום אור כבעיה. לאחר מכן אנו מפרטים המלצות כלליות להפחתת בזבז אור ולהקטנת כמות האור. לאחר ההמלצות הכלליות סיכמנו את המלצות הוועדה בהתאם לשימושי קרקע ולבעלי עניין: המלצות לשטחים פתוחים ולאזורים מוגנים, המלצות לשלטון המקומי במרחב ציבורי בנוי באזורים כפריים ועירוניים, המלצות למרחב ביטחוני או לתאורה ביטחונית, ולבסוף המלצות למרחב הפרטי או למקומות עבודה.

יש לציין כי קיימים תקנים מסודרים המסדירים את עניין התאורה, ושתכנון תאורה מסודר, על פי התקנים להלן, על ידי אנשי מקצוע, יפחית מאוד את זיהום האור ואת בזבז האנרגיה והכסף.

לעתים תיתכן חזרה על ההמלצות העיקריות המשותפות לאזורים אלה או לבעלי עניין שונים.

האור הכרחי לרווחתנו ולבטחוננו האישי, וחשוב לתכנן אותו באופן ראוי ויעיל, כך שייטיב להועיל לצרכינו מבלי לגרום לפגיעה בסביבת החיים שלנו.

• זיהום האור פוגע בכולנו ועולה לנו כסף רב בגלל תשלום על אור שאיננו צריכים כלל או שדולק בזמן לא מתאים.

• זיהום האור ובזבז האור מעלים את צריכת האנרגיה הגורמת לפליטות גזי חממה מעבר לרצוי.

• זיהום האור פוגע בנו כשפנסי תאורה מחייבים הגפת תריסים כדי שנוכל לישון שינה בריאה, וכאשר אנו מסונוורים כנהגים וכהולכי רגל מאור שעוצמתו רבה מדי או שהוא לבן מדי. הסנוור נותן לנו תחושה מטעה שאנו רואים הכול, אך בעצם מה שלא מואר באור הבהיר - חשוך לגמרי.

• זיהום האור פוגע בטבע סביבנו (התנהגות ופיזיולוגיה של בעלי חיים וצמחים, הפרעה בצפייה בשמי הלילה).

המלצות הוועדה שיובאו להלן, מפורטות בפרקים המתאימים לקהלים שונים ועבור שימושי קרקע

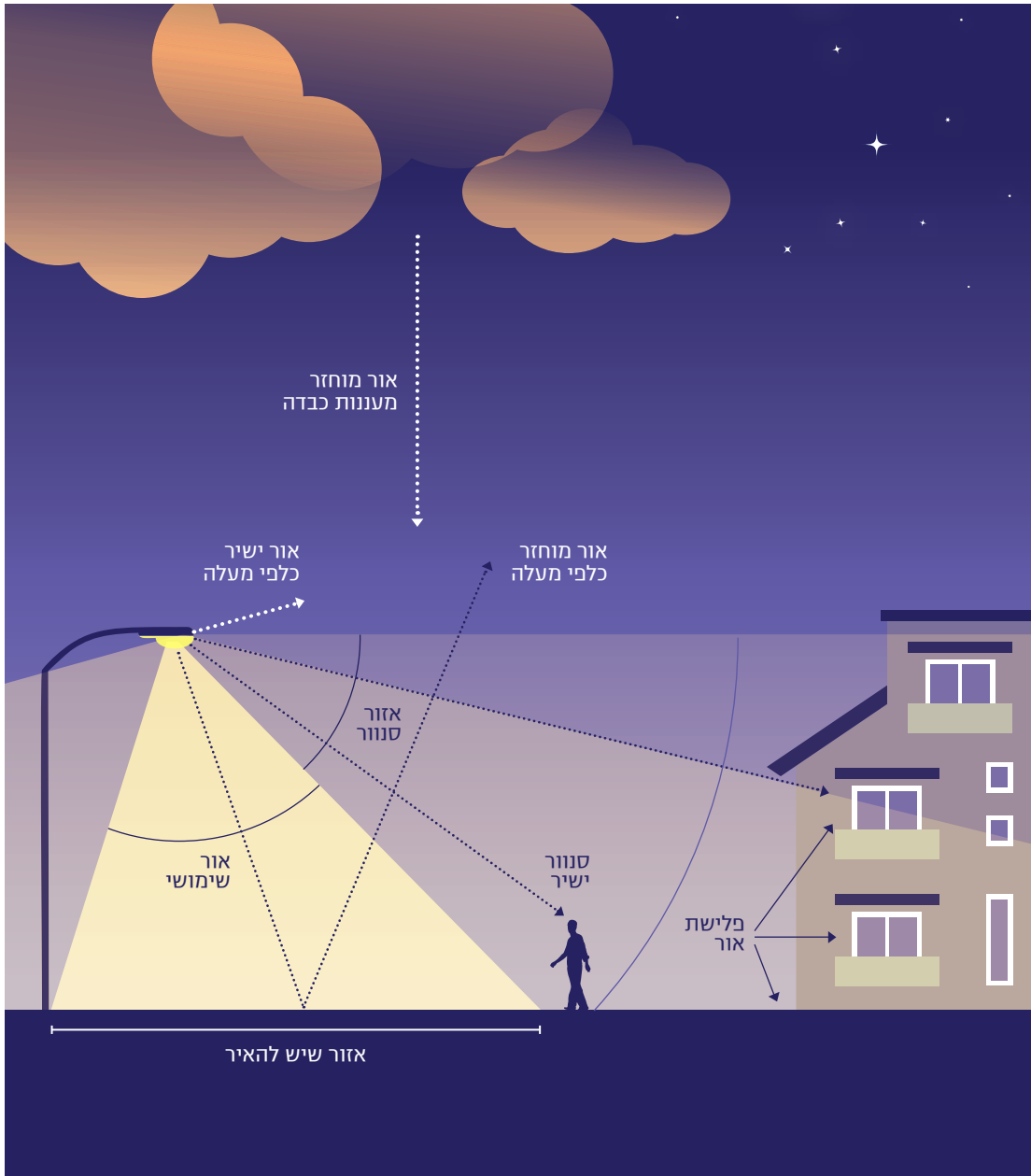
המלצות למדיניות לאומית בנושא זיהום אור

- על מדינת ישראל להפנים את הצורך בתכנון מסודר של נושא התאורה כדי למנוע ולצמצם את זיהום האור. על הממשלה לערוך שינויים מהותיים בנושא התאורה, ויש צורך בקביעת תקופת מעבר, שלאחריה התאורה בישראל תהיה תאורה מתוכננת בהתאם לתקנים קיימים ולקווים המנחים במסמך זה.
- יש להכיר בזיהום אור כמפגע סביבתי המחייב נקיטת צעדי אסדרה למזעורו, בראש ובראשונה על ידי המשרד להגנת הסביבה ועל ידי משרד הבריאות כאחראים לאסדרה, ולאחר מכן ליישם ולהטמיע את הצעדים במערכת התכנון, בגופי תשתית וביוני, ברישוי עסקים, במערכת הביטחון, בחברות ממשלתיות וכדומה. יש לתכנן תאורה ולפעול על פי התקנים המתאימים.
 - יש להעלות את המודעות לנושא זיהום האור בקרב הציבור ובקרב מקבלי החלטות.
 - יש לחייב תכנון תאורה על פי תקנים קיימים, לשפר תקנים שמצריכים שיפור, ולהשלים במהרה תקנים חסרים. זאת כדי להבטיח כי תאורת הלילה תהיה יעילה בצריכת האנרגיה ותאפשר את צורכי האדם תוך מזעור ההשלכות השליליות של זיהום אור על האדם ועל הסביבה.
 - יש לנקוט אמצעים שיבטיחו שהאור יאיר במקום, בזמן ולמטרה לשמה הוא מיועד. אמצעים אלה כוללים פרמטרים טכניים של גוף התאורה והנורה, מיקום גוף התאורה במרחב וכוונונו, וכן שעות התאורה ומשכה. בתוך כך יש:
- א. למנוע ולהפחית זיהום אור באזורים רגישים (שמורות טבע, שטחים פתוחים, אזורי מגורים) ובזמנים שהחשכה הכרחית (שעות הלילה).
- ב. למנוע זהירות רגיע על ידי מניעת פליטת אור ישירות אל קו האופק או מעליו.
- ג. למנוע פיזור אור מחוץ לאזור שהוא מיועד אליו (פלישת אור).
- ד. למנוע סנוור הנגרם מאור עודף, בעוצמה רבה מדי או שאינו ממוקם במקום הנכון.
5. יש לצמצם בלילה את השימוש באור לכן שעוצמתו רבה בתחום אורך גל קצר (440-480 ננומטר) שפוגע בטבע ובאדם, למשל על ידי עמידה במפרט הכללי לעבודות בנייה פרק 08.
6. מומלץ כי המשרד להגנת הסביבה ורשות הטבע והגנים יקיימו מערך לניטור זיהום אור בשטחים הפתוחים ובשמורות הטבע, וכן מומלץ כי יתבצע ניטור תאורה באתרי טבע ובפארקים עירוניים.
7. יש לעגן את נושא תכנון התאורה וזיהום האור בקורסים אקדמיים, למשל בהנדסאות ובהנדסת חשמל, בתכנון, באדריכלות וכדומה בפקולטות המתאימות.
8. יש להקים מערך להכשרה מתאימה לעוסקים בתכנון תאורה, בביצוע ובפיקוח (מעבדות, מפקחים, המוסד לגיהות, המשרד להגנת הסביבה).
9. יש לתמוך במחקרים להשלמת פערי ידע בתחום ההשפעה הבריאותית והסביבתית של זיהום אור.

המלצות להפחתת בזבז אור ולהורדת כמות האור

- המפתח לתאורה נכונה, בעוצמה מתאימה, שאינה בזבזנית באנרגיה ושגורמת להשפעות שוליות מזעריות, הוא תכנון תאורה.
- יש להפחית את כמות האור הפונה כלפי מעלה. יש להאיר רק את מה שצריך להאיר. אין תועלת לאדם באור הפונה כלפי מעלה,
- ואור בזווית הקרובה לאופק יוצר סנוור ומפחית את הראות. נוצרים כאן בזבז והפרעה. אנו ממליצים על שימוש בגופי תאורה שחוסמים תאורה מעל קו האופק ומפחיתים מאוד תאורה קרוב לקו האופק (לדוגמה, סיווג סיכוך G6, איור 15, או עמידה בתנאים המחמירים יותר של תקן

איור 14: השטח המואר לעומת האזור שברצוננו להאיר

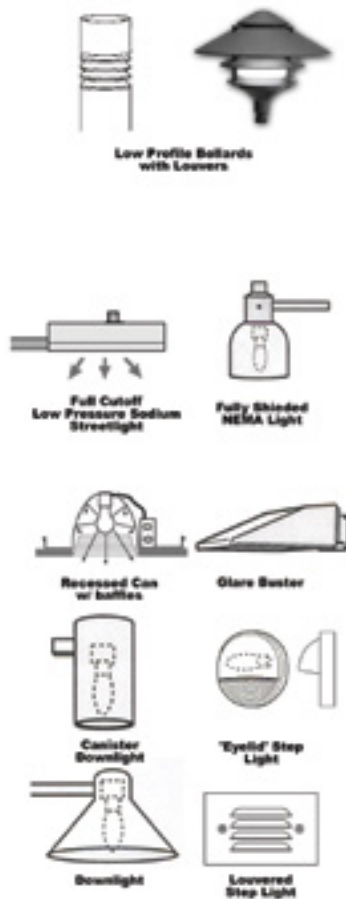


התקן האירופי EN 12464-2:2014 מאמץ הנחיות אלה. אנו ממליצים לתכנן את התאורה על פי הנחיות תקנים אלה כך ששטף האור כלפי מעלה יהיה 0% משטף גוף התאורה, ובכל מקרה שלא יעלה על הערך המירבי המוגדר בתקנים (למעט תאורה דקורטיבית).

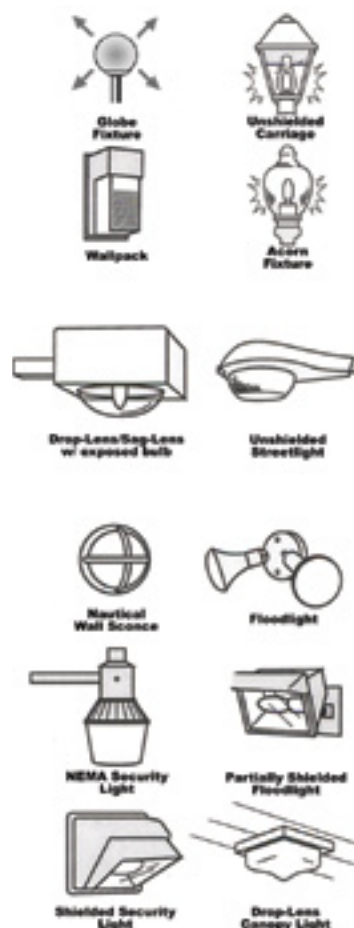
אירופי EN 12464-2:2014). בתקנים CIE 126-1997 ו-CIE 150:2003 מניעת תאורה כלפי מעלה מוגדרת על ידי אחוז האור העולה מעל קו האופק מתוך שטף התאורה של הנורה. התקן מגדיר את ערכי המקסימום על פי אזורים, ובכל מקרה ממליץ על 0 ועל הפחתת כמות האור באופן כללי (טבלה 4). גם

איור 15: סוגי סוככים: מימין, סוככים לא רצויים הפולטים אור מעל קו האופק ומשמאל, סוככים רצויים ללא פליטת אור מעל קו האופק (סיווג G6 מתוך Kaua'i Seabird Habitat Conservation Program⁹⁴).

סוככים רצויים



סוככים לא רצויים



Lighting for Home and Business. Kaua'i Seabird Habitat Conservation Program, accessed Feb 2017. <http://kauaiseabirdhpc.com/lighting-homes-businesses/>

למטרת ההארה. אנו ממליצים שעוצמות האור בת"י 13201 יהיו עוצמות אור מרביות, ושכל מקרה לא תותר חריגה מעבר ל-30% מהתקן (כולל מדדי התחזוקה). התקן מגדיר את העוצמה המזערית המתחזקת המתאימה לכל צורך. הארה שגבוהה מהצורך היא הארה מיותרת, בזבזנית ומזהמת. בתקן האירופי יש גם מקום לעמעום ההארה בשעות שהתנועה בכביש דלילה יותר (ואז הדרישות משתנות ואיתן עוצמות ההארה). במדינות רבות באירופה עוצמת התאורה בשימוש נמוכה בהרבה מתקן זה. אם בכל המקומות ינהגו בתקן כבסיס לעוצמות מזעריות, כפי שמתבצע כעת, רמת פליטות הפחמן ובזבוז האנרגיה יעלו.

*** יש לציין כי הוועדה הישראלית להנדסת תאורה - ISRAEL CIE - אינה מסכימה עם המלצה זו, וגורסת כי תקן לתאורה חיונית מזערית אינו יכול להכיל הגבלות מקסימום, מכיוון שבכך יהווה הכרזה של כל סוגי התאורה כזיהום.**

5. **יש לקבוע מדיניות לתאורה ברשויות מקומיות.**
6. **יש להגדיר את כמות האור הנדרשת על פי אפיון אזורים שונים.**

כדי לנסות ולצמצם את זיהום האור במרחב יש להגדיר היטב מהם צורכי בני האדם בתאורה במקום מסוים לעומת הנזקים שעשויים לנבוע מזיהום אור באותו מקום. מכיוון שזיהום אור עשוי להימצא בכל מקום, תחת מנהלי קרקע שונים ותחת רשויות שונות, יש ליצור חלוקה של המרחב שתקל על מעקב ועל אסדרה ברמות שונות. יש להתייחס גם למרחב הימי ולהשפעת תאורה באזורי החוף על הסביבה הימית.

לדעתנו, יש להבדיל בין מרחב פרטי לציבורי ובין שטחים מוגנים, כשמורות טבע, שטחים פתוחים, שטחים כפריים שטחי פרברים ומרכזי ערים. זו החלוקה המינימלית, ויש להוסיף עליה מרקמים שונים בנוף שצריכים לקבל התייחסות פרטנית. כמו כן, יש צורך ליצור אזורי חייך בין אזורים שונים כדי לשמור על האזור הרגיש יותר. תקן CIE 126-1997 מגדיר את גודל אזורי החייך.

2. מומלץ להחליף תאורה שאינה תואמת את הסעיף הקודם לתאורה בעלת סוכך אינטגרלי מתאים. ניתן להחריג גופי תאורה שמפיצים אור חלש (יש לקבוע בתקנות הגדרה לאור חלש). החלפת תאורה שכזו חוסכת אנרגיה.

3. **יש להקטין ככל הניתן את הרכיב הכחול בתאורה חיצונית בלילה.**

יש מספר סיבות להימנעות מאור זה: 1. רגישות השעון הביולוגי לקרינה קצרת גל בתחום הספקטרום הכחול; 2. פגיעות העין לקרינה קצרת גל (בטיחות פוטוביולוגית); 3. לאור כחול יש בוחק גדול יותר, בעיקר אצל אנשים מבוגרים, דבר היוצר סנוור וסכנה; 4. בלילות בהירים לאור כחול סיכוי גבוה יותר להיות מוחזר מהאטמוספירה ובתוכה וליצור זהירת רקיע. מסיבות אלה יש לתכנן תאורה במרחב הציבורי כך שההרכב הספקטרי של האור יכלול מרכיב קטן ככל האפשר של הרכיב הכחול. לפיכך, אנו ממליצים להשתמש בתאורה בטמפרטורה נומינלית של 3,000 מעלות קלווין, ולשם הזהירות המונעת גם להגביל את הערך המרבי (פיק) של הקרינה בתחום הכחול של הספקטרום, 420-500 ננומטר, עד 55% מהעוצמה המרבית הנפלטת. הגבלה זו של הערך המרבי של הקרינה נוחה למדידה ולהשוואה ובכך יש לה יתרון על שיטות אפשריות אחרות.

המלצות ברוח זו הוטמעו כבר במפרט הממשלתי הכללי לעבודות בנייה, פרק 08, מפרט כללי למתקני חשמל⁹³, וכן בהמלצות של משרד הבינוי והשיכון ב"קובץ הנחיות למתכנן לתאורת כבישים, רחובות וגנים ציבוריים"⁹².

*** יש לציין כי קביעת הערך המרבי של הקרינה בתחום הכחול נובעת מזהירות מונעת ואינה מתבססת על מחקרים או על תקנים קיימים הקובעים ערך סף לתחום הכחול המזיק.**

עקב כך, הוועדה הישראלית להנדסת תאורה - ISRAEL CIE - אינה מסכימה עם הקביעה כי יש להגביל את גובה הערך (פיק).

4. **יש להעריך את עוצמת האור הדרושה בהתאם**

קלווין נומינלית ולספקטרום בעל ערך מרבי (פיק) בכחול שאינו עולה על 55% מהעוצמה המרבית, בעלי עמעום עצמאי או מרכזי ויכולת כיוון הפנסים באופן אופקי, פותר את רוב הבעיות שהוזכרו, וגם מביא לחיסכון באנרגיה ובכסף. כאשר האור חזק יותר מהדרוש, כל התופעות השליליות שהוא עלול לגרום מתחזקות באותו היחס. פנסים העומדים בכללים הללו אינם יקרים יותר ולרוב אף זולים יותר, מכיוון שהם הפנסים היחידים שרשויות וחברות, כמו נתיבי ישראל וכביש 6, מאשרות לשימוש, והם נמכרים בכמויות גדולות.

ת"י 13201 החדש עונה על חלק מהצרכים הללו, ומגדיר היטב אזורי תאורה שונים על פי התנועה באזור ואת צורכי התאורה בכל אזור תאורה. התקן מפורט ביותר ומבוסס על התקן האירופי. לדעת ועדת המומחים יש לחייב תכנון תאורת דרכים במקומות שרוצים להאיר על פי ת"י 13201 ולהוסיף ערכי חריגה מרביים מהתקן על פי הסעיף הקודם. כיום מציינים התקנים רק ערכים מזעריים לתאורה, וללא תוספת הנחייה אינם מביאים לחיסכון. שימוש בפנסים בעוצמת אור על פי התקן, בעלי סוכך שאינו פולט אור מעל קו האופק, עם הגבלת גוון האור ל-3,000 מעלות

טבלה 5. הצעה לחלוקה לאזורי תאורה על פי The Institution of Lighting Professionals של בריטניה ואירלנד⁹⁵. ILP. E1-E4 הם אזורים המוגדרים בהתאמה מלאה לתקן CIE 126-1997. יש תוספת של אזורי שמורות אור כוכבים E0. % שטף מרבי הוא אחוז מרבי של שטף האור כלפי מעלה מתוך שטף גוף התאורה. האור המותר הוא מגבלת מקסימום שיש לשאוף כלל לא להגיע אליה, ויש לשאוף למינימום שניתן להשיג (על פי תקן CIE 126-1997). יש לשים לב כי ILP החמירו את הדרישות המרביות (בסוגריים).

אזור	סביבה	סביבת אור	דוגמה	% שטף מרבי כלפי מעלה
E0	מוגנת מאור	חשוכה	שמורות אור כוכבים	0 (0)
E1	טבעית	עקרונית מוחשכת	שמורות טבע, גנים לאומיים, יערות, שטחים פתוחים על פי תמ"א 35, אזורים שבדרך כלל הכבישים אינם מוארים בהם	0 (0)
E2	כפרית	בהירות נמוכה	כפרים באזורים חשוכים יחסית	0-5 (2.5)
E3	פרברית	בהירות בינונית	עיירות או אזורי פרברים	0-15 (5)
E4	עירונית	בהירות גבוהה	מרכזי ערים ועיירות בעלי פעילות לילה ערה	0-25 (15)

באופן מדויק ולא להאיר את כל הסביבה. כאשר חייבים תאורה בשעות הלילה אנו ממליצים לתכנן את עוצמת התאורה המרבית בשעות חוסר פעילות על פי תקן CIE 126-1997 (טבלה 5). זיהום האור אינו נגרם רק בגלל תאורת החוצות, אלא גם מכל תאורה אחרת, כגון שלטי פרסומת, "טלוויזיות" פרסומת, זרקורים, תאורה ארכיטקטונית, תאורת מגרשי ספורט ועוד, שעליהם יכולה לשלוט רק הרשות באמצעות רישיון ההפעלה. התקנים האירופיים CIE 126-1997 ו-CIE 150:2003 וכן התקן EN 12464-2:2014 עונים על דרישות התכנון למצבים הללו.

7. יש להגביל את זמני ההארה וליצור שעות חושך בכל מקום אפשרי.

בהתאם למטרת התאורה יש לכבותה או לעמעמה בשעות הלילה כדי לחסוך באנרגיה, לצמצם את זיהום האור ולהאריך את חיי גופי התאורה. מומלץ כי הרשויות יקבעו מדיניות מוסדרת בנושא, לדוגמה, כיבוי גופי התאורה המוצבים במקומות פנאי, בין ציבוריים ובין פרטיים, וכן כיבוי מוקדם של גופי תאורה בסביבות מגורים (בעולם מקובלת השעה 11 בלילה). ניתן לערוך מיפוי ולהשאיר תאורה דולקת במקומות שהיא חשובה לבטיחות הציבור. בכל מקרה, תאורה שכזו צריכה להיות מכוונת לשביל

95. ILP. (2011). Guidance notes for the reduction of obtrusive light. Institution of Lighting Professionals.

טבלה 6. הגבלות תאורה להפחתת זיהרת רקיע ואור פולש על פי ILP⁹⁵ בהתאמה מלאה לתקנים האירופיים CIE 126-1997 ו-CIE 150:2003. יש לשים לב כי ILP החמירו בדרישותיהם למניעת אור כלפי מעלה (ראו טבלה 4). ההבדל בין ערב ללילה הוא שעת סף, שלאחריה יש הקטנה בפעילות ויופעלו תקנות מחמירות יותר, בדרך כלל על פי קביעת סמכות התכנון במקום ועל פי השימוש במקום. אם לא נאמר אחרת, המלצתנו היא 23:00 בהתאם לתקנות הנהוגות לרעש.

אזור	% שטח האור המרבי כלפי מעלה על פי ILP	אור מרבי במישור האנכי הפרעת אור לחלונות (lux)		עוצמה מרבית של מקור האור (cd)		תאורה על הבניין (cd/m ²)
		ערב	לילה	ערב	לילה	
E0	0	0	0	0	0	ממוצע cd/m ²
E1	0	2	0	2,500	0	0
E2	2.5	5	1	7,500	500	5
E3	5.0	10	2	10,000	1,000	10
E4	15	25	5	25,000	2,500	25

10. הוועדה ממליצה כי המלצות מסמך זה ייכנסו להמלצות האגף למניעת קרינה ורעש במשרד להגנת הסביבה כחלק מעבודתו למניעת מפגעי קרינה בלתי מייננת ורעש, ויוגדרו כהנחיות מחייבות על ידי מוסדות התכנון השונים (לרבות הוועדה למתקנים בסחוניים) בבואם לאשר תכניות סטטוטוריות. למעשה, לפי הידע כיום, ייתכן מאוד שההשפעה של תאורה על בריאות האדם גבוהה בהרבה מההשפעה של קרינה סלולרית וקרינה אלקטרומגנטית בתדר נמוך (שזכות להתייחסות נרחבת).

8. הוועדה ממליצה לרשויות מקומיות לתכנן את התאורה על פי הנחיות משרד השיכון, ת"י 13201 והתקנים האירופיים שלעיל, לשם תכנון מדויק של התאורה, צמצום זיהום האור בתחומן, מניעת בזבז אנרגיה וחיסכון כלכלי.

9. הוועדה ממליצה כי תבוטל החרגת האור הנראה מחוק הקרינה הבלתי מייננת (חוק הקרינה הבלתי מייננת, התשס"ו-2006) וכך יחול החוק למניעת מפגעים סביבתיים (חוק למניעת מפגעים סביבתיים (תביעות אזרחיות), התשנ"ב-1992) גם על קרינת אור נראה.

המלצות הוועדה על פי אזורים וסוגי שימוש שונים

בעוצמה המזערית האפשרית, בעל טמפרטורה נומינלית של 3,000 מעלות קלווין, ובעדיפות ל-2,000 מעלות קלווין. לא יותר אור המאיר מעל קו הרקיע, ויש לכוון את התאורה רק לאזור שהיא חייבת להאיר. רצוי להכריז על אזורי חיצו לאור, כאשר שמורת הטבע היא האזור השמור ביותר. יש לנטר את כמות האור בשמורה לאורך זמן ולהעלות מודעות לנושא זיהום האור בציבור. יש לתכנן על פי אזורים E1-E0 בתקן CIE 126-1997.

שטחים פתוחים ואזורים מוגנים כשמורות טבע

- יש לתכנן על פי תקן CIE 126-1997. יש להקפיד על נורות בטווח ספקטרי חם עד 3,000 מעלות קלווין נומינלית בכל מקרה (כולל תאורת לד). יש להימנע מכיוון תאורה כלפי מעלה ולהשתמש בגופי תאורה בעלי סיווג המתאים לכך. יש לוודא כי ספקטרום מקור האור אינו כולל רכיב בתחום הכחול העולה על 45% מהמקסימום (החמרה מההמלצות של משרד השיכון לאזורים בנויים).
- באתרי רט"ג יש לדאוג לחושך. אור חיוני יהיה



לעבוד עם אור תת-אדום ומצלמות. יש לצמצם למינימום את עוצמת התאורה וכמות הפנסים. יש לעודד הקמת שמורות חשוכות וכן לעודד הקמת קהילות שומרות שמיים על פי הקריטריונים של IDA (International Dark Sky Places).

מרחב ציבורי בנוי באזורים כפריים ועירוניים (ערים, רשויות מקומיות, שלטון מקומי)

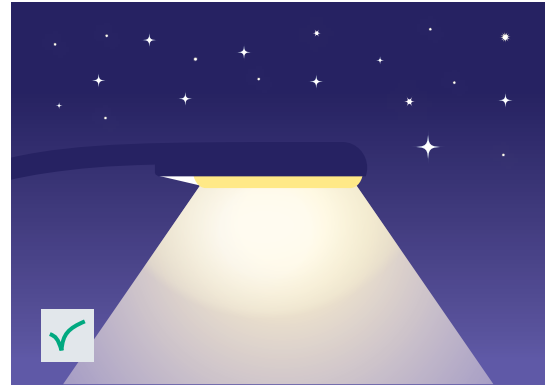
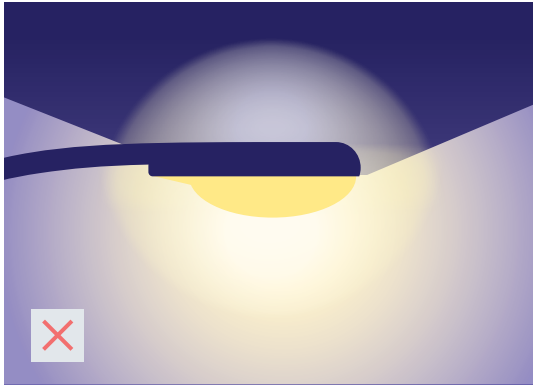
יש לתכנן על פי הצרכים ובהתאם לתקנים המתאימים CIE 126-1997 , CIE 150:2003 , 13201 לדרכים, EN 12464-2:2014 עבור שטחים שאינם דרכים).

- יש לבצע הערכה לנחיצות התאורה:
 1. האם אכן התאורה נדרשת?
 2. אם כן, מה מטרת התאורה?
 3. מה עוצמת התאורה הדרושה למטרה?
 4. באילו שעות בדיוק נחוצה התאורה לצורך הגשמת המטרה?
 5. האם יש פליטת אור מעל קו ה-90 מעלות?
 6. האם יש בעיה של אור שחודר למקומות שלא כיוונו אליהם, שאינם רצויים או שאינם דרושים?
 7. האם קיימת בעיית סנוור?
- בהתאם לתשובות הללו:
 1. אין להאיר אזור אם אין צורך בכך.

- במסדרונות אקולוגיים ארציים, לרבות שטחי יער כפי שמוגדרים בתמ"א 22 ובתמ"א 1 ולרבות שטחים טבעיים המשמשים חייך בתוך שטחים ביטחוניים, יש להקטין ככל הניתן את זיהום האור וליצור מעברים חשוכים.
- במעברים אקולוגיים קטנים (מעברי בעלי חיים) ובסביבתם, בתשתיות הקוטעות שטחים פתוחים, יש להקפיד על חושך.
- יש להתייחס למרחב ביסופרי כמו למסדרון אקולוגי.
- בכבישים מוארים יש להשתמש בתקן 13201 ובעוצמות הרשומות בו, ובלא יותר מאשר 30% מעוצמת התאורה בתקן, כולל מדדי תחזוקה. התנאי להשקעה בתאורת כבישים הוא שמטרת ההארה אינה יכולה להיות מושגת באמצעים אחרים כגון פסים מחזירי אור, קווי הפרדה, תמרורים בולטים וכן הלאה.
- במעבר לתאורות לד יש לעבוד על פי המלצות המפרט הכללי לעבודות בנייה פרק 93⁰⁸ ולפי המלצות משרד הבינוי והשיכון "קובץ הנחיות למתכנן לתאורת כבישים, רחובות וגנים ציבוריים"⁹².
- תשתיות אחרות יש לכבות על ידי שעון אסטרונומי המתואם תמיד ללוח השנה ופועל לפי שעות השקיעה והזריחה האמתיות. במקרה שהאור נדרש לבטיחות, יש לדאוג לנורות חמות, ובמקום שניתן,

- אפשר להשיג תאורה איכותית, ידידותית לסביבה וחסכונית גם באמצעות פנסי נל"ג, ואז צריך לאפשר חריגה עד 35% ומקדם תחזוקה 0.8 בגלל מגבלות רצף ההספק של מנורות אלה.
- יש להקפיד כי תאורה במרחב הציבורי לא תזלוג לתוך המרחב הפרטי, ולא תפריע לאזרחים. אין שום סיבה שתאורת רחוב תאיר את הבניינים לידיה. כמו כן, על תאורה פרטית להאיר אך ורק את האזור הדורש הארה בתחום השטח הפרטי.
- יש ליצור שיווי משקל בין הצורך בהרגשת ביטחון לבין תאורה עודפת. במחקרים לא נמצא שום קשר בין תאורה ברמות שונות ורמת תאונות הדרכים או הפשע²¹. זאת ועוד, אור חזק ומסנוור יפגום בביטחון, וייצור צללים בלתי חזירים המאפשרים הסתתרות. תאורה המופעלת על ידי חיישן עשויה לעזור בהתראה מפני פורצים.
- לגבי שטחים ציבוריים פתוחים (שצ"פים), יש תקנים מתאימים של משרד הבינוי והשיכון⁹⁰. חשוב לתכנן אמצעי הפעלה נכונים (שעון אסטרונומי), כולל שעות החשכה, כאשר המתקן אינו בשימוש. לגבי תחושת הביטחון, התקנים כוללים הגברה של התאורה באזורי סיכון. אפשר להאיר רק שבילים, אבל אם לא מכבים כאשר האור לא נחוק, הם יהיו מכשול. אפשר לקבוע בסופי שבוע שעות תפעול ארוכות, ובמהלך שבוע העבודה החשכה מוקדמת יותר.
- נקודת תורפה ידועה היא מגרשי ספורט ביישובים, בדגש על יישובים כפריים המוקפים שטחים פתוחים. מגרשים אלה מתאפיינים בתאורה חזקה במיוחד. במקרה זה יש לחייב את התקנת הפנסים בתהליך כיוון מפוקח, כדי לוודא שהפנסים מכוונים כלפי המגרש ואין זליגת אור לשטחים הפתוחים.
- מומלץ למנות בכל רשות בעל תפקיד לטיפול בפניות אזרחים בתלונות לגבי מפגעי אור למיניהם (פלישה, סנוור וכו'). בעל התפקיד יפעל למצוא פתרונות בתיאום ובשיתוף עם מהנדס הרשות.
- 2. יש לכבות אורות כאשר אין בהם שימוש.
- 3. כדי לחסוך באנרגיה, יש להיצמד לתקן, ואין להשתמש בתאורה מוגזמת.
- 4. יש להשתמש בשעונים אסטרונומיים, בעמעמים ובחיישני תזוזה בכל הזדמנות.
- 5. יש להימנע מכיוון תאורה כלפי מעלה.
- 6. יש להשתמש בנורות חסכוניות אך שעומדות בהנחיות כמו אלה של משרד השיכון – יש להקפיד על נורות בטווח ספקטרי חם עד 3,000 מעלות קלווין נומינלית בכל מקרה (כולל תאורת לד) ולוודא כי אין רכיב בתחום הכחול העולה על 55% מהמקסימום (ראו דעת מיעוט של הוועדה הישראלית להנדסת תאורה בגוף הדו"ח).
- תאורת גדר יישובית או ביטחונית יש להתקין בעוצמה המזערית ההכרחית ולכוון את האור כך שיאיר רק את מה שחייבים. בכל מקרה אין להאיר למרחק העולה על פעמיים גובה עמודי התאורה. יש להתקין נורות חמות. רצוי להתקין חיישני קרבה המותאמים לאדם. ניתן לעבוד עם אור תת-אדום ועם מצלמות במקומות שהדבר מתאפשר.
- באזורים כפריים ובמקומות שיש בהם טבע עירוני, יש לדאוג שהמקום יהיה חשוך ברוב שעות הלילה על ידי שימוש בשעונים אסטרונומיים. כדי לשמור על הטבע המקומי בגינות ובפארקים יש להשתמש בתאורה המאירה את השבילים בלבד, בטווח ספקטרי חם ולהשתדל להפעיל שעון אסטרונומי לפחות לגבי חלק מהתאורה, כדי שהשביל לא יהווה מחסום בפני חיות ליליות למשך כל הלילה.
- ניתן גם לשלב שימוש ב"גלאי נפח" שאינם מופעלים על ידי בעלי חיים.
- לתאורת כבישים ושבילים, יש להשתמש בת"י 13201 ובעוצמות הרשומות בו, ובלא יותר מאשר ב־30% מעוצמת התאורה בתקן, כולל מדדי תחזוקה.
- תאורת כבישים, כולל המגבלה של עד 30% מעל התקן לפי מקדם תחזוקה 0.8, בהחלט סבירה לתאורת לד. בזכות יכולת העמעום הרציף של הלד ניתן להשיג זאת בנקל.

איור 16: אור פולש לעומת אור מכוון כראוי בהספק נמוך בהרבה



תאורת הצפה הלוגן 200 ואת שאינה מכוונת כראוי



תאורת הצפה הלוגן 40 ואת מכוונת כראוי.

מרחב ביטחוני או תאורה ביטחונית

מתקנים שגובלים באזורים ירוקים אך מצויים גם באזורים עירוניים האירו, ועדיין מאירים, את הסביבה הטבעית שלא צורך.

תחום מצלמות האבטחה התפתח מאוד בשנים האחרונות, וניתן להתקין מצלמות הרואות בחשכה מוחלטת או מצלמות זולות יותר, הרואות באור מועט של 1.5-1 לוקס. על ידי שימוש במצלמות מתקדמות ובאמצעי בקרה ואזהרה אחרים ניתן להקטין משמעותית את עוצמת התאורה המתוכננת בהיקף הגדר.

ניתן גם להשתמש בחיישני קרבה למטרות התרעה ולהימנע מתאורה רציפה.

יש להסדיר נושא זה במסגרת פקודות הצבא והנחיות משטרת ישראל.

בישראל קיימים אלפי מתקנים מאובטחים בכל אזורי המדינה, ואחד ממרכיבי האבטחה הוא תאורה ביטחונית. מתקנים רבים גובלים בשטחים פתוחים ואף בשמורות טבע, ויש להם השפעה נרחבת. לדעת חברי הוועדה יש להגדיר רמות מרביות של עוצמת תאורה ביטחונית.

עד לפני עידן מצלמות האבטחה הנוכחיות, הדוקטרינה שרווחה בקרב האנשים שהיו אמונים על ביטחון מתקנים אלה הייתה, שהתאורה הביטחונית המותקנת בהיקף המתקן צריכה להתווסף להארת השטח לגילוי איומים, גם כדי לסנוור את כל מי שמתקרב לגדר המתקן וגם כדי ליצור הרתעה ופחד מגילוי בעצם נוכחותה.

בעקבות הדרישות, כאמור, תוכננה תאורה שהאירה את אזור הגדר והרבה מעבר לגדר. כך קרה, שמאות

המרחב הפרטי, כולל מקומות עבודה

יש להפחית את השימוש במסכי לד הפולטים תאורה כחולה בשעות הערב ובייחוד סמוך לשעות השינה. יש לבדוק פתרונות טכנולוגיים המנטרלים אורכי גל בלתי רצויים.

הבתים מוארים בעוצמה רבה, וכל אור בעוצמה חזקה יפגע באיכות השינה. מסיבה זו ההמלצה החשובה ביותר היא כיבוי אורות. שימוש בתאורה חמה ככל הניתן (לכיוון האור האדום) ועמעומה לרמות הנמוכות ביותר האפשריות יקטינו את הבעיות הקשורות לחשיפה לזיהום אור.

כל אדם בביתו הפרטי רשאי לעשות כרצונו, כל עוד אינו פוגע בסובבים אותו. לפיכך, אנחנו יכולים במקרה זה רק לתת המלצות ולא הנחיות מחייבות לתאורה בתוך הבית. תאורה הפונה החוצה לכיוון השכנים או לשטח פתוח, יש להתייחס אליה כאל תאורת רחוב ולהקפיד על כיוון האור, עוצמתו והספקטרום שלו.

בשעות היום רצויה תאורה רבת עוצמה ולבנה, הכוללת אורכי גל כחולים. כניסת אור מבחוץ היא העדיפות הראשונה. עם רדת החשכה יש לצמצם שימוש בנורות בעלות רכיב כחול רב-עוצמה, לעבור לאורכי גל חמים יותר, ובכל מקרה לא מעבר ל-3,000 מעלות קלווין נומינלית.

המלצות הוועדה להשלמת פערי ידע

- במסגרת עבודת הוועדה ראינו כי למרות הידע הרב הקיים, ישנם תחומים שעדיין חסר בהם ידע רב, לדוגמה: במסגרת ההשפעות על האדם איננו יודעים מה הם ערכי סף לפגיעה כרונית ואקוטית מזיהום אור. נמצא כבר כי עובדי משמרות החשופים לפגיעה משמעותית בשעון הביולוגי סובלים מכך וחשופים לשלל מחלות ובעיות פיזיולוגיות, אך איננו יודעים מה הקשר בין שעות החשיפה ומשך החשיפה לאור כחול בלילה לבין אותן מחלות.
- מה עוצמות התאורה המזעריות הנדרשות, ומה שקלול התמורות (tradeoff) המיטבי בין תאורת דרכים, תאורת המכוניות והקטנת מספר תאונות הדרכים?
- מהי החשיבות היחסית, בתנאי תאורה שונים, של סכנת פשיעה לעומת הפחד מפני פשיעה?
- אילו מערכות יקשרו לנו בין הורדת עלויות האנרגיה, הפחתת פליטות והפחתת פגיעה אקולוגית?
- כיצד ניתן להשתמש באור למטרות אמנות ויפוי תוך הקטנת פלישת אור וזיהום הרקיע? כיצד נמדוד זאת?
- מה הקשר בין אור חיצוני פולש להפרעות שינה ולבריאות?
- מה הקשר בין שעות החשיפה לשעות השינה ולהפרשת מלטונין?
- מה משך ההפרשה המומלץ למלטונין, ובאיזו כמות?
- האם אפשר לחפות על זיהום האור בכדורי מלטונין?
- אילו מערכות אקולוגיות רגישות יותר לזיהום אור, ואילו בעלי חיים רגישים יותר?
- מהן ההשפעות ההתנהגותיות והפיזיולוגיות של תאורת דרכים ותאורה בכלל על מגוון בעלי חיים וצמחים?
- מה הקשר בין עוצמת האור הכחול הנפלט (יחסית לעוצמת ההארה הכללית וגם בערכים מוחלטים) להשפעה הסביבתית והבריאותית?
- מה הבסיס המשפטי המועדף בישראל לשילוב המלצות לצמצום זיהום אור?
- מהם החסמים הפסיכולוגיים, התודעתיים והארגוניים לקידום ההמלצות לצמצום זיהום האור בישראל, וכיצד ניתן להתגבר עליהם בצורה אפקטיבית?



| רשימת נספחים |

נספח 1

סוגי זיהום אור נוספים

נספח 2 (דיגיטלי)

מסמך אור מכוון: המלצות לתקנות תאורת חוצות

נספח 3 (דיגיטלי)

מסמך אור מכוון: המלצות אור מכוון כתוספת למרכזי תאורה

נספח 4 (דיגיטלי)

ניתוח מרחבי של זיהום אור בישראל (וייל ולידר, 2010)

נספח 5 (דיגיטלי)

מדיניות רט"ג לתאורת דרכים – השלכות אקולוגיות של תאורת כבישים בישראל והצעות לפתרון (לידר, 2008)

נספח 6 (דיגיטלי)

מדיניות רט"ג למעבר לתאורת לד – חוות דעת בנושא תאורת לד (לידר, 2010)

נספח 7 (דיגיטלי)

מפרט טכני ומדריך ליישום תאורת לד בכבישים ובשטחים ציבוריים פתוחים (משרד הבינוי והשיכון, 2015)

נספח 8 (דיגיטלי)

מסמך של COST למדיניות אירופית לשמירת שמי הלילה

נספח 9 (דיגיטלי)

מדיניות שימור משאבי אור טבעיים (lightscares)

נספח 1

סוגי זיהום אור נוספים

.....

תאורה מלאכותית מרצדת – תופעה שבעבר נחשבה נדירה באופן טבעי

תדירות הספק הכוח האלקטרוני. מערכת הראייה של האדם לעתים אינה מבחינה במודע בהבהובים הללו, אך תחת תנאים מסוימים עשויים ריצודים אלה וריצודים מעשה ידי אדם, עשויים להביא לתגובה ביולוגית כמו כאבי ראש, לתגובות נוירולוגיות, לתגובות אפילפטיות, לתגובות ברשתית ולתגובות בראייה (טבלה 7). תגובות ביולוגיות ופיזיולוגיות נצפו גם במערכות ראייה של מגוון אורגניזמים שונים (טבלה 8)^{96,5}.

כיום יש תקן חדש לתאורה מרצדת IEEE1789.

מקורות תאורה מלאכותיים הביאו את תופעת האור המרצד (מהבהב, פרסומות אקטיביות בשלטי חוצות וכדומה) בדרך כלל בתדירויות של מעל 100 הרץ, מצב שהיה נדיר לפני כן באופן טבעי. התאורה המלאכותית המרצדת לא רק מופיעה באופן שכיח יותר מאשר בסביבה טבעית, אלא גם תדירויותיה גבוהות בהרבה, והן נפרסות על אזורים נרחבים הרבה יותר. אור מהבהב בסביבה הטבעית עשוי להימצא באירועי שרפות טבעיות ובהופעת קרני שמש החודרות מבין עלי כיסוי צומח צפוף⁵. ברקנים עשויים לרצד – רמת הריצוד תיקבע כפונקציה של

טבלה 7: השפעות של תאורה מרצדת על בני אדם

Effects	Source of flicker	Frequency (Hz)
Headaches/Visual Effects	Low frequency fluorescent	100
Neurological Effects	Malfunctioning fluorescent	50
Neurological Effects	Amplitude-moderated flickering light	20-75
Neurological Effects in photosensitive epileptics	Xenon gas discharge photo-stimulatio	3-60
Physiological effects in agoraphobics	Low frequency fluorescent	100
Selzures in photosensitive epileptics	Various	Various
Unperceived neurological effects	Ligh-emitting diode	Up to 200 Hz
Unperceived neurological effects	Computer monitor	42.5-75
Unperceived retinal effects	Various	76-162
Unperceived retinal effects	Cathode ray tube	76
Visual effects	Low frequency fluorescent	100
Visual effects	Cathode ray tube	50 & 100
Visual effects	Low frequency fluorescent	120
Visual effects	Computer monitor	70-110

Inger et al. (2014). Potential biological and ecological effects of flickering artificial light. PLoS One 9, e98631 .96

טבלה 8. השפעות של תאורה מרצדת על בעלי חיים⁹⁶

Species common name	Species scientific name	Effects
Honeybee	<i>Apis mellifera</i>	Behavioural
Minute Pirate Bug	<i>Orius tristicolor</i>	Behavioural
White Fly	<i>Aleyrodidae</i>	Behavioural
Southern House Mosquito	<i>Culex quinquefasciatus</i>	Behavioural
Housefly	<i>Musca domestica</i>	Behavioural
Pink bollworm	<i>pectinophra gossypiela</i>	Behavioural
House cricket	<i>Acheta domesticus</i>	Behavioural
Housefly	<i>Musca domestica</i>	Behavioural
European Starling	<i>Sturnus vulgaris</i>	Physiological
European Starling	<i>Sturnus vulgaris</i>	Behavioural
European Starling	<i>Sturnus vulgaris</i>	Possible physiological stress
European Starling	<i>Sturnus vulgaris</i>	Physiological stress & behavioural
European Starling	<i>Sturnus vulgaris</i>	Behavioural
European Starling	<i>Sturnus vulgaris</i>	Physiological stress & behavioural
Albino Rat	<i>Rattus norvegicus</i>	Physiological stress
Laboratory Mouse	<i>Mus musculus</i>	Visual

זיהום תאורה מקוטבת

בעיקר חרקים, הרגישים מאוד לקיטוב האור ולחזרתו ממשטחים כגון משטחי מים. קיטוב מלאכותי יכול ליצור מלכודות אקולוגיות חמורות בקרב אוכלוסיות הרגישות לקיטוב. זיהום כזה עשוי לשבש את יחסי הטורף והנטרף בין מינים שדפוס תאורה מקוטבת שימרו את יחסיהם באופן טבעי על ידי נתינת יתרון יחסי לאחד הצדדים. זיהום באור מקוטב עשוי לשנות מבנים של חברות מבחינת מגוון ודינמיקה⁹⁷.

זיהום כזה כולל אור מקוטב מלאכותי המוחזר מבניינים חשוכים או מאובייקטים מלאכותיים אחרים, על ידי פיזור האור באטמוספירה או בהידרוספירה במקום או בזמן שאינם טבעיים.

אור מקוטב נוצר כאשר השדה החשמלי של גל האור מסודר כולו במישור אחד, לעומת אור שמש או נורה, שכיוון השדה החשמלי בהם אקראי. ישנם בעלי חיים,

Horváth et al. (2009). Polarized light pollution: A new kind of ecological photopollution. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7, 317–325. 97

האגודה הישראלית
לאקולוגיה ולמדעי הסביבה



מחברים: מרסל אסניבה

www.isees.org.il